



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Diseño de baldosas de presión para el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica como energía alternativa en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida.

Br. Heli Josue Avendaño D'Jesus.

MÉRIDA, OCTUBRE DE 2021.



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Diseño de baldosas de presión para el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica como energía alternativa en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida.

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electricista

Autor: Heli Josue Avendaño D'Jesus.
Tutor(es): Msc. Ana Angelissis Arraiz Budovalchew.

MÉRIDA, OCTUBRE DE 2021.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Diseño de baldosas de presión para el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica como energía alternativa en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida.

Br. Heli Josue Avendaño D'Jesus.

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

www.bdigital.ula.ve

Prof. Marco A. Molina P.
Jurado.

Prof. Carlos A. Muñoz B.
Jurado.

Prof. Ana A. Arraiz B.
Tutor

DEDICATORIA

A la ilustre Universidad de Los Andes y su Facultad de Ingeniería, por ser mi casa de estudios y aprendizaje, por abrir sus puertas como institución y dar la oportunidad de formar personas con actitudes virtuosas.

A mi tutora, Msc. Ana Arraiz, por ser una guía durante la carrera y en este proceso, por cada detalle y momento dedicado para aclarar cualquier tipo de incertidumbre, por la claridad y exactitud con la que enseñó cada clase, discurso y lección. Gracias por haber elegido ser Docente y por haberme permitido el desarrollo de esta tesis. Mi respeto y admiración siempre por el gran ser humano y gran profesional que es.

A todos mis familiares y amigos que con su apoyo incondicional me han hecho posible llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso y a la Virgen de Guadalupe, por darme vida, salud y sabiduría a lo largo de este proceso.

A mis abuelos, Marino, Flor, Leopoldo y Ana, gracias por brindarme tanto cariño y momentos lleno de felicidad, por guiarme y enseñarme tantos valores, y lo más importante que con constancia, trabajo y humildad todo es posible. Siempre los querré y tendré presente.

A mis padres, Iraima y Aníbal, sin ustedes nada de esto hubiese sido posible. Mamá, por estar a mi lado en cada momento, tu apoyo moral y entusiasmo que me brindas en cada propósito. Papá, por el tiempo que estás conmigo compartiendo tus experiencias, conocimientos y consejos, por todo el amor que me dan ustedes, Gracias, los amo.

A mi segunda madre, Marleny, gracias por todo tu cariño incondicional, por estar ahí siempre para darme tus sabios consejos e inculcarme tantas cosas buenas, te quiero mucho.

A mi hermano, Alfredo, gracias por tu cariño incondicional, por tu amistad sincera, por ser mi compañero de estudio y por compartir tantas experiencias a lo largo de mi vida.

A mis tíos y primos a quienes quiero mucho, gracias por compartir momentos significativos conmigo y siempre estar dispuestos a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mi novia, Andrea, por ser parte esencial de mi vida, todo el apoyo que me has brindado ha sido sumamente importante, has estado conmigo en los mejores y peores momentos, siempre ayudándome y dándome palabras de aliento, por su paciencia y su amor incondicional. Te amo.

Br. Heli Josue Avendaño D'Jesus. Diseño de baldosas de presión para el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica como energía alternativa en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida. Universidad de Los Andes. Tutor: Msc. Ana A. Arraiz B. Octubre 2021.

RESUMEN

La creciente demanda de energía eléctrica y la destrucción del medio ambiente han impulsado a la investigación de nuevas formas de generar energía eléctrica. Por ende, merece especial interés la cosecha de energía, la cual se basa en el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, tal como es la estudiada en esta investigación, que capturan las vibraciones producidas al caminar cosechándola a través del fenómeno de la piezoelectricidad, mediante generadores piezoeléctricos. Estos generadores emplean materiales activos que emiten cargas eléctricas al ser deformados mecánicamente. Se diseñó el sistema de cosecha de vibraciones del caminar y se comprueba su viabilidad, simulando un sistema de baldosas piezoeléctricas en las áreas con mayor flujo peatonal del Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA), dicha área es la entrada de acceso principal al nivel plaza, la cual se determinó a partir de encuestas digitales. A su vez se evaluaron las áreas prioritarias del mismo, determinando así la demanda eléctrica del área de cuidados neonatales (P28) que debía suplir el sistema de energía de respaldo. Por tal motivo se seleccionó las baldosas Pavenge V3, gracias a su disposición triangular asegura que la tecnología maximice la producción de energía y datos en tiempo real de cada paso. Finalmente, mediante la herramienta computacional AutoCAD® se implementó el diseño del sistema de baldosas, los cuales consisten en módulos de baldosas que aseguran la máxima transferencia de energía por paso y un rendimiento óptimo para instalaciones interiores y exteriores, cubriendo así la demanda de dicha área.

Palabra clave: energy *harvesting*, energía renovable, piezoelectricidad, baldosas piezoeléctricas.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1

Capítulo	pp.
-----------------	------------

1 EL PROBLEMA.....	3
---------------------------	----------

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
-------------------------------------	---

1.2 JUSTIFICACIÓN.....	4
------------------------	---

1.2. OBJETIVOS.....	6
---------------------	---

1.2.1. General.....	6
---------------------	---

1.2.2. Específicos.....	6
-------------------------	---

1.3 METODOLOGÍA.....	6
----------------------	---

1.4. ALCANCE.....	7
-------------------	---

1.5. LIMITACIONES.....	8
------------------------	---

2 ESTADO DEL ARTE DE (<i>ENERGY HARVESTING</i>) Y EXPLORACIÓN TEÓRICA DE LA PIEZOELECTRICIDAD.....	9
---	----------

2.1 COSECHA DE ENERGÍA (<i>ENERGY HARVESTING</i>).....	9
--	---

2.2. CLASIFICACIÓN DE COSECHA DE ENERGÍA.....	10
---	----

2.3 MODELO AL CAMINAR.....	11
----------------------------	----

2.4 APLICACIONES DE COSECHA DE ENERGÍA.....	12
---	----

2.4 ANTECEDENTES.....	17
-----------------------	----

2.5 ORIGEN DE LA PIEZOELECTRICIDAD.....	19
---	----

2.6 PIEZOELECTRICIDAD.....	20
----------------------------	----

2.7 ECUACIONES CONSTITUTIVAS.....	22
-----------------------------------	----

2.8 PARÁMETROS DEL EFECTO PIEZOELÉCTRICO (CONSTANTES).....	25
--	----

2.9 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS	31
2.9.1 CLASIFICACIÓN.....	34
2.9.1.1 Materiales Naturales.....	35
2.9.1.2 Materiales Ferroeléctricos y Cerámicas	35
2.10 CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS	40
2.11 Definición	40
2.12 Preparación Cerámicas Piezoeléctricas	41
2.13 Tipos de cerámicas	42
2.13.1 Cerámicas Blandas	42
2.13.2 Cerámicas Duras.....	43
2.14 PZT. Propiedades y procesos de fabricación.....	43
2.15 Tipos de cerámicas PZT	44
2.16 MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE	46
2.17 Tipos de configuración	50
2.17.1 Viga en voladizo (<i>Cantilever</i>)	50
2.17.2 Tipo Címbalo (<i>Cymbal</i>).....	50
2.17.3 Tipo Pila (<i>Stack</i>)	51
2.17.4 Tipo Concha (<i>Shell</i>).....	52
2.18 Aplicaciones	52
2.18.1 Sensores	53
2.18.2 Actuadores	54
2.18.3 Transductores	54
2.18.4 Acelerómetros.....	55
2.18.5 Generadores.....	55
2.19 TIPOS DE CONEXIÓN (SERIE – PARALELO)	56
2.20 Piezoeléctricos generadores de electricidad	58
2.21 DISEÑO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO	58
2.22 CIRCUITO ACONDICIONADOR DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO	63
2.22.1 Rectificador de Onda completa	63
2.22.2 Convertidor DC/DC.....	65
2.23 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA COSECHADA	68
2.23.1 Tecnologías de almacenamiento de energía	68
2.24 INSTITUTO AUTÓNOMO HOSPITAL UNIVERSITARIO DE LOS ANDES (IAHULA), MÉRIDA	68
2.24.1 Demanda Eléctrica.....	70

3 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	78
3.1 DISEÑO METODOLÓGICO	78
3.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.....	78
3.3 ETAPA 1: EVALUACIÓN DE LAS ÁREAS PRIORITARIAS DEL HOSPITAL	80
3.4 ETAPA 2: DETERMINACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA.....	83
3.4.1 Determinación de la carga de energía.....	83
3.5 ETAPA 3: EVALUACIÓN DE FABRICANTES DE BALDOSAS.....	86
3.5.1 Evaluación de alternativas	86
3.5.2. Baldosas piezoeléctricas comerciales.....	86
3.6 ETAPA 4: DISEÑO DEL CONJUNTO FORMADO POR LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	91
3.6.1 Programa a utilizar (AutoCAD®)	91
3.6.2 Tipos de almacenamiento de energía.....	91
 4 DEMANDA ELÉCTRICA Y SELECCIÓN DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS .95	
4.1 DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y DEMANDA. .95	
4.1.1 Estimación y cálculo de la demanda eléctrica en el Área P28 (Cuidados Neonatales).	97
4.1.2 Cantidad de energía estimada al caminar.	98
4.2. Selección de baldosa.....	100
4.2.1. Características generales de la baldosa V3.....	101
4.2.2 Capacidad de la baldosa V3.....	102
4.2.3 Componentes y partes principales de la baldosa V3	103
4.2.4 Guía de instalación Módulos Baldosas <i>Pavenge</i>	104
4.3. IDENTIFICAR LAS ÁREAS CON MAYOR FLUJO PEATONAL Y CANTIDAD DE PERSONAS QUE TRANSITAN.....	109
4.4. CALCULO DEL NÚMERO DE BALDOSAS Y POTENCIA.	110
4.5 DISEÑO MEDIANTE AUTOCAD DEL CONJUNTO FORMADO POR LOS MÓDULOS DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS	112
4.6 Determinación del banco de baterías.....	117
CONCLUSIONES.....	121
RECOMENDACIONES	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	pp.
Figura 2.1. Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica...	10
Figura 2.2. Modelo de caminar como péndulo invertido	12
Figura 2.3. Energía consumida en actividades que realizan algunas partes del cuerpo y cantidad que se puede recuperar	14
Figura 2.4. Efecto piezoeléctrico directo	21
Figura 2.5. Efecto piezoeléctrico inverso	21
Figura 2.6. Numeración ejes en cerámica piezoeléctrica y dirección de polarización	26
Figura 2.7. Efecto piezoeléctrico en un cristal de cuarzo	32
Figura 2.8. Ejes cristalográficos de un cristal de cuarzo. Corte en el eje X.	33
Figura 2.9. Variación de los coeficientes piezoeléctricos con la orientación y dirección de polarización	38
Figura 2.10. Estructura cristalina de una cerámica piezoeléctrica antes y después de ser polarizada (Pb: Plomo, O2: Oxígeno, Ti: Titanio, Zr: Circonio)	41
Figura 2.11. Polarización cerámica piezoeléctrica	42
Figura 2.12. Circuito equivalente de un piezoeléctrico	46
Figura 2.13 Simplificación de los valores del circuito equivalente	47
Figura 2.14. Modelo de circuito equivalente de piezoeléctrico cantiléver.	48
Figura 2.15. Modelo de circuito equivalente piezoeléctrico, Actuando como carta, (b) Actuando como generador	48
Figura 2.16. Circuito equivalente simple de generador piezoeléctrico con impedancias en serie	49
Figura 2.17. Estructura tipo Cantilever	50
Figura 2.18. Estructura tipo Címbalo	51

Figura 2.19. Estructura tipo pila	51
Figura 2.20. Estructura tipo concha	52
Figura 2.21. Stack de piezoeléctricos, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo	56
Figura 2.22. Potencia entregada por stack de PZTs, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo	57
Figura 2.23. Medidas de tensión en circuito abierto, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo	58
Figura 2.24. Etapas sistema cosecha de energía	63
Figura 2.25. Rectificador. Rojo Vin positiva. Verde Vin negativa.	64
Figura 2.26. Señal rectificada onda completa	64
Figura 2.27. Convertidor Reductor	66
Figura 2.28. Convertidor Elevador	67
Figura 2.29. Corte Vertical del plano del IHULA	69
Figura 3.1. Eco-baldosas PAVEGEN	87
Figura 3.2. Baldosa piezoeléctrica modelo V3	88
Figura 3.3. Diagrama de interconexión baldosa piezo power	89
Figura 3.4. Partes de baldosa piezo power	89
Figura 3.5. Baldosa PowerLeap	90
Figura 4.1. Dimensione de la Baldosa piezoeléctrica modelo V3	101
Figura 4.2. Baldosa PAVEGEN.	102
Figura 4.3. Alojamiento del generado.	103
Figura 4.4. Puntillas.....	103
Figura 4.5. Hoja superior.....	104
Figura 4.6. Módulo de baldosa PAVEGEN.	106
Figura 4.7. Despiece de baldosa PAVEGEN.	107
Figura 4.8. Instalaciones de Módulos de Baldosas PAVEGEN.....	107
Figura 4.9. Diagrama del sistema PAVEGEN.	108
Figura 4.10. Encuesta digital.	109
Figura 4.11. Módulos de baldosas piezoeléctricas PAVEGEN.	112
Figura 4.12. Ciclos de vida útil VS porcentaje de descarga en baterías TROJAN,	119
Figura 4.13. Esquema de conexión del banco de baterías TROJAN tipo L16-AGM.	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	pp.
Tabla 2.1. Energía humana consumida en diferentes actividades.....	13
Tabla 2.2. Cerámicas policristalinas comerciales. Propiedades piezoeléctricas.....	36
Tabla 2.2. Cerámicas policristalinas comerciales. Propiedades piezoeléctricas (continuación).....	37
Tabla 2.3. Materiales Monocristalinos comerciales orientados en la dirección 001. Propiedades	37
Tabla 2.3. Materiales Monocristalinos comerciales orientados en la dirección 001. Propiedades. (continuación).....	38
Tabla 2.4. Comparación entre los materiales más usados y el PVDF.....	39
Tabla 3.1: cálculo de la carga de energía de lámparas fluorescentes compactas (Compact Fluorescent Lights, CFL).....	84
Tabla 4.1. Distribución de las Áreas de Servicios del IAHULA.	96
Tabla 4.2. Equipos o artefactos del Área P28 (Cuidados Neonatales).....	97
Tabla 4.3. Cálculo de la Demanda Eléctrica.	98
Tabla 4.4. Tiempo promedio que tarda una persona en caminar.....	99
Tabla 4.5. Cuadro comparativo de baldosas.	100
Tabla 4.6. Características vs Beneficios Baterías TROJAN.	118

ÍNDICE DE PLANOS

Plano	pp.
Plano 4.1. PLANO NIVEL PLAZA.....	113
Plano 4.2. PLANO NIVEL PLAZA ÁREA C1, C2 y C3.....	114
Plano 4.3. PLANO NIVEL PLAZA ÁREA C1,C2	115
Plano 4.4. PLANO NIVEL PLAZA ÁREA C2 y C3.....	116

www.bdigital.ula.ve

INTRODUCCIÓN

Históricamente, la sociedad humana se ha enfocado en el aprovechamiento de fuentes energéticas primarias del tipo fósil como lo es el carbón, el petróleo y gas natural en una constante búsqueda de poseer confort, estabilidad y desarrollo, que en otras palabras no es más que el mejoramiento de la calidad de vida.

Asimismo, la producción y el uso de energía no renovable hoy en día representa una de las causas del calentamiento global, siendo afectados el aire, los suelos y aguas, produciendo así lluvia ácida y gases de efecto invernadero. Estos gases a su vez son provenientes principalmente de combustibles fósiles que con el pasar de los años son más escasos y de mayor precio. Debido a esto y a otros factores, en los últimos años el uso de energías renovables ha ido en aumento, tratando de algún modo contrarrestar el uso de energía proveniente de combustibles fósiles, centrales hidroeléctricas o termoeléctricas.

Por tal motivo el mundo pasa por un momento crítico en cuanto a generación de energía, no en vano muchos investigadores se han concentrado en el estudio de fuentes alternativas y en el desarrollo de sistemas capaces de aprovechar las diferentes formas de energía que se encuentra en el ambiente; ejemplo de esta es la energía eólica, la energía solar, la energía hidráulica, entre otras. En la actualidad las energías alternativas son tanto una necesidad como una realidad, debido a que se conciben como un recurso alternativo a la generación de energía producida a partir de los combustibles fósiles, reduciendo su dependencia y buscando un impacto positivo en el ya avanzado cambio climático.

Bajo este contexto, se busca contribuir a la mejora del sistema energético implementando un tipo de energía renovable que emplea la energía piezoeléctrica, mediante baldosas piezoeléctricas que permitirán gracias a las pisadas de las personas generar energía. Estas baldosas tienen la capacidad de convertir la energía cinética perdida en los pasos de un individuo

en electricidad renovable, a través de la deformación mecánica de varios dispositivos piezoeléctricos; es decir, se trata de una fuente de energía limpia y abundante.

Teniendo en cuenta que el lugar donde se implementará esta tecnología será en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida, en tal sentido se estudiarán las áreas con mayor afluencia peatonal y se evaluarán los servicios prioritarios del mismo, determinando así la demanda eléctrica que debería suplir el sistema de energía de respaldo.

Este trabajo presentará una propuesta conveniente en cuanto a energía eléctrica proveniente de energías renovables, como lo es la energía piezoeléctrica, dando a conocer una energía que puede tener diversos usos de forma innovadora. Con la finalidad de implementar un sistema de baldosas piezoeléctricas que sirva de respaldo en una institución hospitalaria.

Para un mejor entendimiento del trabajo desarrollado se presentan cuatro capítulos en los cuales se da toda la explicación teórica, la manera de implementar dicha teoría para la solución del problema planteado y los resultados obtenidos. Todo esto organizado de la siguiente manera: el **Capítulo I**, se realiza el planteamiento del problema, se trazan los objetivos, se plantea la metodología, justificación, alcances y limitaciones. El **Capítulo II**, explica el fenómeno de la piezoelectricidad a través de la historia, enfocándose en el fenómeno físico, el porqué de éste, las ecuaciones que gobiernan su comportamiento. El **Capítulo III**, se efectúa el estudio de los diversos servicios y áreas del lugar, lo cual permitirá mediante encuestas e inspección la identificación de las áreas con mayor flujo peatonal, así como la evaluación de las áreas prioritarias del Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IHULA). Por último, en el **Capítulo IV**, haciendo uso de la metodología comparativa, se revisarán las diferentes alternativas de la tecnología de baldosas piezoeléctricas buscando la generación de potencia con una eficiencia adecuada, donde se determinó la carga de energía y demanda eléctrica. Paralelamente se propondrá la simulación de la aplicabilidad del diseño, en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida. Cuyos resultados obtenidos y análisis de los mismos nos indicaran la factibilidad de implementar esta tecnología como energía de respaldo.

CAPÍTULO I

¿PUEDE LA ENERGÍA PIEZOELÉCTRICA FUNCIONAR COMO ENERGÍA DE RESPALDO EN EL INSTITUTO AUTÓNOMO HOSPITAL UNIVERSITARIO DE LOS ANDES (I.A.H.U.LA) DEL ESTADO MÉRIDA?

En este capítulo se describe el planteamiento del problema, posteriormente se concreta la justificación, después se definen los objetivos que se desarrollan en la investigación y por último se determinan los alcances y limitaciones del presente trabajo.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el consumo energético mundial depende notoriamente de las energías convencionales no renovables (gas, carbón, petróleo, entre otras), cuya extracción y producción genera notables beneficios económicos. Sin embargo, los beneficios ambientales asociados a la extracción de estos recursos son prácticamente nulos, y sus impactos negativos; la deforestación, vertimiento de sustancias tóxicas, desplazamiento de la fauna por nombrar algunas, conllevan afectaciones importantes en los ecosistemas y en los recursos agua, aire y suelo. Por otro lado, el modelo de crecimiento exponencial que está sufriendo la población mundial, ligado a la abundante producción industrial, trae consigo un gran desequilibrio ambiental debido a que, los porcentajes de consumo asociado a los recursos naturales son más elevados a comparación del

tiempo de regeneración que tiene el ambiente, la tierra llegara a un estado donde no podrá regenerar los recursos consumidos.

Así pues, ante este panorama, la utilización de las energías renovables o limpias, se están convirtiendo en una de las opciones más potencializadas para suplir la demanda energética a nivel mundial. Por otro lado, ante un fallo de este sistema de abastecimiento, el uso de la energía renovable supondría una ayuda importante para la obtención energía, ya que su obtención se basa en flujos de la naturaleza o cotidianidades, como la energía piezoeléctrica, que aprovecha las pisadas del flujo masivo de las personas.

Caminar es una de las actividades que el ser humano ejecuta en toda su vida, se estima que en promedio una persona puede llegar a dar más de doscientos (200) millones de pasos; teniendo en cuenta que la energía piezoeléctrica aprovecha el flujo de las pisadas, esta sería una opción bastante viable ante una posible emergencia energética por el fallo de las hidroeléctricas que lo abastecen, debido a que esta energía se produciría diariamente y sin causar impactos negativos al ambiente en su proceso de producción. El desconocimiento de esta tecnología lleva al desaprovechamiento de la producción energética infinita que se tiene en las pisadas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la generación de energías alternativas y sostenibles se manifiesta como una necesidad que va en crecimiento, puesto que es un recurso necesario y básico que contribuye en el desarrollo de cada sociedad, es por ello, que su innovación tecnológica se ha convertido en fuente de investigación en busca de soluciones capaces de generar este recurso vital.

Las fuentes de energías renovables luego de su utilización son sometidas a procesos de renovación, ya sean de manera natural o artificial, siendo así una fuente inagotable del recurso utilizado. Entre las energías renovables existentes se encuentran:

Energía Mareomotriz: producida por el movimiento de las masas de agua provocado por las subidas y bajadas de las mareas, así como por las olas que se originan en la superficie del mar por la acción del viento.

Energía Hidráulica: producida por el agua retenida en embalses o pantanos de gran altura (que posee energía potencial gravitatoria). Si en un momento dado se deja caer hasta un nivel inferior, esta energía se convierte en energía cinética y, posteriormente, en energía eléctrica en la central hidroeléctrica.

Energía Eólica: producida por el viento. Esta posteriormente se transforma en electricidad mediante el uso de equipos llamados aerogeneradores (molinos de viento especiales).

Energía Solar: llega a la tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del sol, el aprovechamiento de la energía solar se puede realizar de dos formas: conversión térmica mediante sistemas fototérmicos y conversión fotovoltaica mediante paneles solares.

Entonces, el uso de sistemas capaces de producir y almacenar energías sostenibles mientras mitigan las consecuencias ambientales que se generan en la producción de electricidad, puede ser la solución a esta necesidad latente. En la indagación de una solución amigable y eficiente, esta investigación busca determinar la viabilidad de la implementación de nuevas tecnologías en la infraestructura del Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida, como lo son los materiales piezoeléctricos, los cuales son capaces de generar y recolectar energía.

La energía alternativa piezoeléctrica es una fuente de energía limpia, inagotable y crecientemente competitiva. Se diferencia de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero –causantes del cambio climático- ni emisiones contaminantes. Además, surge la necesidad del aprovechamiento y utilización de este tipo de energía en nuestro país como opción para dar solución el déficit. En tal sentido, las baldosas piezoeléctricas son un sistema sostenible que se constituyen como una forma poco usual de energía alternativa, reduciendo considerablemente la contaminación ambiental y disminuyendo a la vez el consumo convencional con productos sostenibles.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

Diseñar baldosas de presión mediante el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica como energía alternativa en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (I.A.H.U.L.A) del estado Mérida.

1.2.2. Específicos

- Analizar los principios y características de la energía piezoeléctrica.
- Estimar la demanda eléctrica en las áreas de mayor prioridad del I.A.H.U.L.A.
- Identificar las áreas con el flujo peatonal más concurrente para el aprovechamiento de la energía piezoeléctrica.
- Dibujar mediante herramientas computacionales el plano de ubicación de las baldosas piezoeléctricas.

1.3 METODOLOGÍA

En el siguiente trabajo se elaborará una investigación documental la cual se realizará por medio de documentos, textos científicos y resultados obtenidos de la utilización de esta tecnología con la finalidad de obtener datos para la aplicación de la tecnología de piezoeléctrica.

El desarrollo de esta investigación será con base en el tipo de estudio exploratorio metodológico empírico analítico cuantitativo, para comprender cada una de estas partes a continuación de explicará cada una con la finalidad de dar una mejor comprensión del tipo de estudio que gobernará esta investigación.

Cuando se habla de estudio exploratorio se hace referencia, a un estudio basado en la investigación un tema determinado o en la formulación de un problema de investigación, que no ha sido profundizado en un campo determinado, abriendo la posibilidad la generar una investigación sobre el desarrollo de una suposición, donde la investigación realizada busca determinar un resultado preliminar del tema.

Se procederá a dar explicación a las características del tipo de estudio, cuando se habla de empírico analítico cuantitativo, se hace referencia a un estudio metodológico basado en las experiencias que ha generado la tecnología a partir de su implementación y en los hechos que se generaron a partir recolección de datos y de su posterior análisis de los resultados de modo cuantitativo, con el propósito de evaluar por medio de este la viabilidad del sistema piezoeléctrico para la generación de energías alternativas y sostenibles.

La metodología para la realización de este trabajo, empieza con la búsqueda de todo el material referente a los principios y características de la energía piezoeléctrica, seguidamente con el estudio de métodos de cálculo de demanda de cada una de las áreas críticas de interés, a continuación, se identifican las áreas con mayor flujo peatonal para la ubicación de las baldosas piezoeléctricas.

Finalmente, dibujar mediante una herramienta computacional el plano que indique las áreas donde se ubicarán las baldosas piezoeléctricas en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida.

1.4. ALCANCE

- El presente trabajo servirá de base para posteriores estudios e investigaciones del fenómeno de la piezoelectricidad, donde se busque optimizar el diseño basados en sistemas de baldosas piezoeléctricas como energías renovables y estudiar otros aspectos relevantes de la misma.
- El estudio realizado contribuye al desarrollo de energías renovables donde se conocerá el gran impacto favorable del uso de esta tecnología para aprovechar las vibraciones mecánicas y energía que pueden ser generadas al caminar.
- La motivación como futuros Ingenieros Electricista es la de buscar soluciones innovadoras a los problemas energéticos actuales. Se puede resolver un problema tan complejo como la generación y suministro de energía eléctrica limpia mediante la utilización de dispositivos piezoeléctricos para la recolección de energía eléctrica e

implementarlos como una manera alterna de energía de respaldo para en el sector hospitalario o de salud.

- Crear y generar el diseño mediante herramientas computacionales para la implementación e instalación de las baldosas piezoeléctricas.

1.5. LIMITACIONES

- Carencia de módulos de baldosas piezoeléctricas de generación de energía para realizar mediciones de potencia eléctrica, debido a la energía mecánica que simulan el movimiento humano.
- Falta de planos digitalizados y actualizados del a estructura del Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida.
- Dificultad para acceder a las diversas áreas y servicios de las instalaciones.

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE DE *ENERGY HARVESTING* Y EXPLORACIÓN TEÓRICA DE LA PIEZOELECTRICIDAD

En el presente capítulo se abordará los orígenes históricos del fenómeno piezoeléctrico, las ecuaciones que relacionan las deformaciones, tensiones y campo eléctrico generados en un material piezoeléctrico. Se tomará en cuenta ciertas propiedades físicas de los materiales que influyen en el comportamiento eléctrico, los parámetros y constantes piezoeléctricas más importantes. Haciendo énfasis en las cerámicas piezoeléctricas, puesto que estas son los materiales piezoeléctricos más usados en la actualidad para todo tipo de aplicaciones. Dentro de estas cerámicas se centrará en las de compuesto Titanato Zirconato de Plomo (PZT). Por lo que se hará un estudio de sus propiedades, características y aplicaciones para elegir el tipo de compuesto que más se adecua a nuestras necesidades.

2.1 COSECHA DE ENERGÍA (*ENERGY HARVESTING*)

La cosecha de energía se define como la captación de pequeñas cantidades de energía de una o varias fuentes de energía de nuestro entorno, acumulándola o almacenándola para un uso posterior [1].

Cuando se habla de cosecha de energía, se hace referencia a sistemas encargados de la recuperación, la reutilización y el aprovechamiento de los diferentes tipos de energía que se

encuentran en el ambiente y usualmente se desperdician [2]. Estos sistemas realizan el proceso de transformación de la energía solar, térmica, eólica, el ruido y las vibraciones, entre otras, en energía eléctrica [3] [4]. El principal objetivo de esta tecnología es proveer una fuente remota de energía eléctrica y/o la recarga de dispositivos de almacenamiento, tales como baterías y capacitores, alcanzando de esta manera un impacto ecológico importante debido a que ayuda a reducir los residuos químicos que se producen al sustituir estos dispositivos de almacenamiento tradicionales [1].

Para apreciar y observar de manera más clara, conviene subrayar que existen diferentes tipos de energías susceptibles de ser aprovechadas mediante cosecha de energía y sus respectivos transductores.

2.2. CLASIFICACIÓN DE COSECHA DE ENERGÍA

Al observar el ambiente que rodea el entorno de cada persona se pueden encontrar diversas formas de energía interactuando, estos diferentes tipos de energía vistos desde la perspectiva de las cosechas de energía son latentes fuentes de potencia, las cuales por lo general son inutilizadas [5].

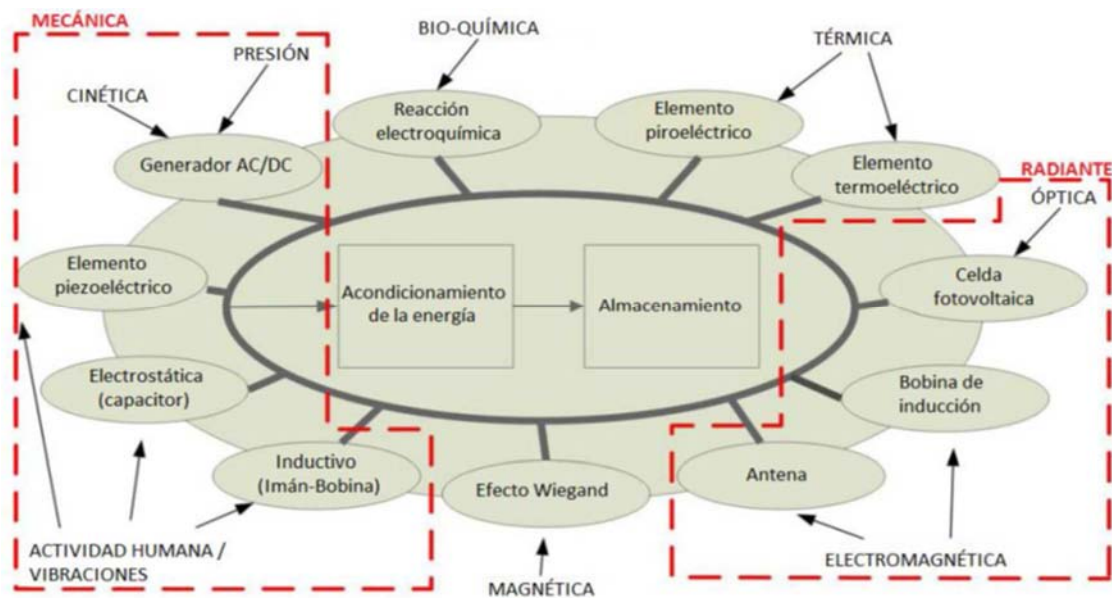


Figura 2.1. Diferentes fuentes de energía y sus respectivos transductores para su conversión a energía eléctrica [5].

La Figura 2.1 muestra la clasificación de las diferentes cosechas de energía de acuerdo al tipo de energía que usan para su funcionamiento y relaciona cada uno con su respectivo transductor, de esta forma es posible visualizar cinco grupos principalmente: los magnéticos, los radiantes, los térmicos, los bioquímicos y los mecánicos. Los magnéticos aprovechan el efecto *Wiegand*, el cual consiste en la conmutación de la magnetización de la zona central de un hilo ferromagnético cuando éste es sometido a un campo magnético externo intenso. Los radiantes como su mismo nombre lo indica aprovechan la radiación tanto electromagnética como óptica para generar energía eléctrica a partir de celdas fotovoltaicas, inducción de bobinas y antenas. Los térmicos usan elementos piroeléctricos y termoeléctricos para su generación, los bioquímicos lo hacen desde las reacciones [6].

Y por último, los mecánicos dentro de estos se encuentran los que usan la presión, la cinética, las vibraciones y las diversas actividades humanas como fuente principal de obtención de energía, la cual es transformada mediante generadores DC/AC, elementos piezoeléctricos, electrostáticos o inductivos [1].

En tal sentido es imperativo destacar y conocer el funcionamiento mecánico del ser humano al caminar, para tener un mejor entendimiento de la cosecha de energía de tipo mecánico.

2.3 MODELO AL CAMINAR

El movimiento humano está controlado por el sistema neuro- muscular, el cual puede ser entendido como un proceso mecánico pasivo. Para caminar intervienen los pies, las rodillas y piernas; el modelo que se acepta para la actividad es el de péndulo invertido, ya que la pierna de apoyo se comporta como el péndulo en movimiento sobre el pie postura, y la pierna en movimiento como un péndulo regular de oscilar alrededor de la cadera [7].

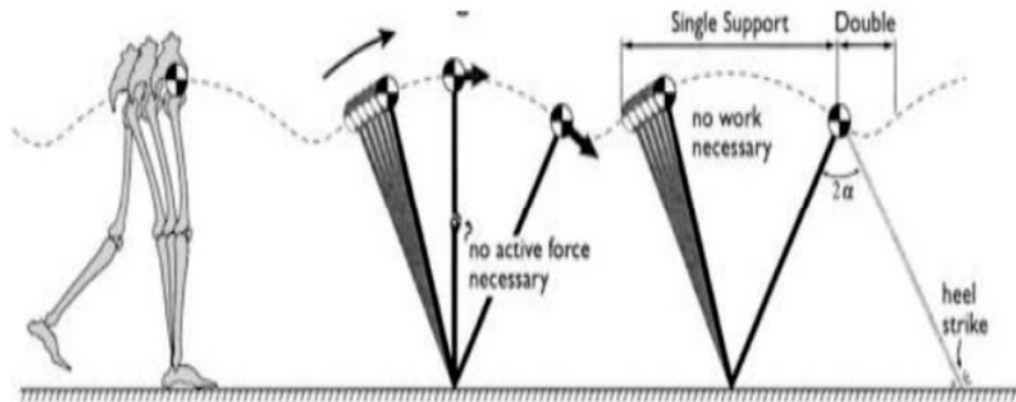


Figura 2.2. Modelo de caminar como péndulo invertido [7].

En la ilustración se muestra el modelo del péndulo invertido simple que se realiza la caminar, la cual requiere energía para redirigir el centro de masa del cuerpo. Cuando una sola pierna hace contacto el suelo, el péndulo rígido conserva la energía mecánica y el centro de masa del cuerpo puede ser mantenido sin ninguna fuerza muscular [7].

De tal forma, el interés principal se halla en la cosecha de energía de tipo mecánico; particularmente, en los que se valen de las actividades humanas para la generación de energía, es por tanto que en la siguiente sección se hará mayor énfasis en el tema esencial de esta investigación.

2.4 APLICACIONES DE COSECHA DE ENERGÍA

La disipación de calor, la rotación de articulaciones, el peso corporal, el desplazamiento vertical de centros de masa e inclusive, las deformaciones elásticas de los tejidos que éste posee, al combinarse con las actividades cotidianas o fenómenos metabólicos, ha abierto una gran posibilidad a las cosechas de energía como fuente de potencia móvil, inclusive para implantes médicos que necesitan energía eléctrica para su funcionamiento, ya que éstos podrían tener autonomía más cantidad de años al ser recargados permanentemente[8]. La Tabla 2.1 hace un inventario de la cantidad de energía en kilocalorías/hora y su correspondencia en vatios, los cuales son consumidos cuando se cumplen diferentes tareas [9].

Tabla 2.1. Energía humana consumida en diferentes actividades [10].

Actividad	kilocal/hr	W
Dormir	70	81
Estar quieto	80	93
Estar sentado	100	116
Estar de pies cómodamente	110	128
Hablar	110	128
Comer	110	128
Dar un paseo	140	163
Conducir	140	163
Tocar violín o piano	140	163
Hacer aseo	150	175
Trabajar en carpintería	230	268
Realizar senderismo 4mph	350	407
Practicar natación	500	582
Practicar montañismo	600	698
Correr	900	1048
Hacer un sprint	1400	1630

Como complemento a la tabla anterior, la Figura 2.3 muestra la cantidad de energía eléctrica que consume el cuerpo en partes específicas y la cantidad que puede ser recuperada (valor dentro del paréntesis) para nuevos usos [10].

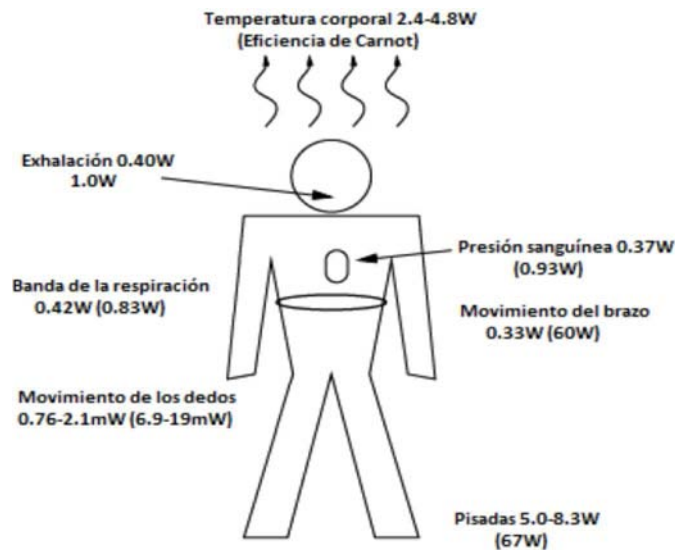


Figura 2.3. Energía consumida en actividades que realizan algunas partes del cuerpo y cantidad que se puede recuperar [10].

Como se puede observar, la mayor cantidad de energía que puede ser recuperada se encuentra en las pisadas, entre 5 y 8.3 vatios (W) de los 67 (W) que son recuperados en esta actividad. La cantidad de energía que se recupera, por ejemplo, en el caso de las pisadas, es calculada para un hombre de 68 kilogramos (Kg) de peso, caminando a una velocidad de 3.5 millas por hora ó 2 pasos por segundo, para éste se estima la energía que puede ser generada por la caída del talón a una altura de 5 centímetros (cm) o 0,005 metros (m) (distancia vertical aproximada del desplazamiento del talón en la marcha humana). De esta manera la energía disponible sería la siguiente [10]:

$$(68 \text{ kg}) \cdot \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0,005 \text{ m}) \left(2 \frac{\text{pasos}}{\text{s}}\right) = 67 \text{ W} \quad (2.1)$$

Es indispensable conocer que la energía mecánica es la sumatoria de la energía potencial y la cinética como se evidencia en la ecuación 2.2 [11]:

$$E_{\text{mec}} = E_{\text{P}} + E_{\text{C}} \quad (2.2)$$

Donde:

E_{mec} : Energía mecánica, (J).

E_{P} : Energía potencial, (J).

E_{C} : Energía Cinética, (J).

La energía cinética es la energía asociada a los cuerpos que se encuentran en movimiento, depende de la masa y de la velocidad del cuerpo cuando el cuerpo se encuentre en reposo el valor de la energía cinética será cero, se compone por la ecuación 2.3 [11]:

$$E_{\text{C}} = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.3)$$

Donde:

m : Masa corporal, (Kg).

V^2 : Velocidad del cuerpo, (m/s²).

E_{C} : Energía Cinética, (J).

Mientras que la energía potencial, está relacionado con la posición que tiene un cuerpo y se expresa mediante la ecuación 2.4 [11]:

$$E_{\text{P}} = mgh \quad (2.4)$$

Donde:

E_{P} : Energía potencial gravitatoria, (J).

m : Masa corporal, (Kg).

g: Aceleración de la gravedad, (m/s^2).

h: Altura, (m).

En general, el cuerpo humano es una gran fuente energética y de información, de la cual se puede obtener al menos una ración de estas [12] [13]. Sin embargo, no toda esta potencia es utilizable o “cosechable”. Para esto, se han desarrollado técnicas en busca de obtener la mayor cantidad de potencia posible del cuerpo humano. Algunas técnicas utilizadas pueden llegar a ser poco amigables con el usuario, desde un zapato con relleno electrónico, hasta una caja anclada a la cintura. Sin embargo, la miniaturización de los dispositivos electrónicos, los desarrollos en baja potencia y el incremento de la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica han permitido desarrollar nuevas tecnologías en la cosecha de energía. Por consiguiente, cada día más el valor de potencia obtenida por los sistemas de cosecha de energía se acerca, de manera paulatina, al valor ideal de, por ejemplo, 67 W [14].

Los dispositivos más importantes para el diseño construcción e implementación de los artefactos que cosechan la energía del cuerpo son los transductores o generadores, en otras palabras, convertidores de energía mecánica a eléctrica. Una de los métodos utilizados para la generación de energía eléctrica es la generación piezoeléctrica en forma de voladizo [12] [15]. Se ha aplicado en múltiples ocasiones para absorber la energía eléctrica del movimiento, vibración y demás [16]. En diferentes artículos, se definen cuáles son los factores pertinentes, se comparan prototipos, se aplican en diferentes partes del cuerpo y al final se estudia cómo ha impactado a la recarga de elementos de almacenamiento, como baterías y supercapacitores, y consumo inmediato [17].

Por último, la conversión de la energía eléctrica AC brindada por el generador debe de ser tratada para su almacenamiento y futuro uso [18]. En consecuencia, se trabaja con circuitos integrados rectificadores de tensión [19].

Por esta razón, la energía potencial que genera el ser humano al caminar, puede ser una fuente importante de cosecha de energía para ser aprovechada en este tipo de actividad.

2.4 ANTECEDENTES

Aunque la piezoelectricidad es conocida desde el siglo XIX y se han realizado aplicaciones en el campo militar y aeronáutico, fue poca la utilización de este efecto para la producción de energía, por lo que es una de las energías alternativas menos desarrollada. Sin embargo, a partir del cambio climático y sus consecuencias, se incentivó a nivel mundial el uso de nuevas tecnologías a través de la implementación del Protocolo de Kioto (1997), lo que originó un nuevo interés en esta tecnología [20].

En el año 2009 una firma de ingeniería de Israel, fue noticia por el desarrollo de una nueva técnica que permite generar electricidad a partir del peso, movimiento, y vibraciones de los vehículos; hay generadores específicos para carreteras, vías férreas, pistas de aterrizaje y circulación de peatones. El producto con mayor cantidad de pruebas ha sido el de los generadores piezoeléctricos que se instalan debajo del asfalto, los generadores se instalan 0.05 m por debajo de la rasante, en este caso la presión de los vehículos sobre los dispositivos se convierte en electricidad, abasteciendo de esta manera los alumbrados públicos en las zonas de influencia de las carreteras, las cifras obtenidas en las mediciones avalan la eficiencia del sistema [11].

En cuanto a baldosas piezoeléctricas, los más reconocidos son la empresa inglesa PAVEGEN, fundada en el año 2009 por Laurence Kembell-Cook, y que cuenta con avanzada tecnología que les permite a sus baldosas obtener por pisada entre 4 – 8 W que puede ser usada directamente o almacenada para su posterior uso, permitiéndole implementar estas en aeropuertos, maratones, estadios, colegios, discotecas, entre muchos otros (Fresneda, 2013) [20].

Conociendo los alcances del efecto piezoeléctrico para la generación de energía, en el año 2008 en Japón, la compañía encargada del metro (*East Japan Railway*) decidió aprovechar el flujo masivo de personas que hacen uso del metro para beneficio propio con la instalación de zonas de paso creadas con materiales piezoeléctricos ubicados en los tornos de entrada, como resultado obtuvieron la generación de 10 W/s con el sistema funcionando al 90% de su capacidad energía que es usada para los torniquetes y carteles electrónicos (Borja, 2008) [20].

En el departamento de arquitectura de MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) dos estudiantes llevaron una investigación en el año 2007 que tenía como objetivo demostrar la capacidad de los peatones en el espacio público. Propusieron la creación de una loseta la cual genera energía mecánica por medio del peso de los peatones a través de materiales piezoeléctricos. El generador está incorporado en la loseta y funciona por el movimiento vertical producido por los peatones. La propuesta ganó un concurso sobre construcciones sostenibles promovido por Holcim en suiza en el año 2007, la propuesta ganadora fue el modelo a instalar en la estación de tren en Turín, Italia, cada panel proporcionaba electricidad para 4 bombillos LED's [11].

En el año 2007 surgió la empresa *Innowattech*, esta es una de las más conocidas a nivel mundial por sus múltiples productos piezoeléctricos, esta empresa desarrollo un método de obtención de electricidad que utiliza la energía mecánica producida por la vibración de vehículos. Estos piezoeléctricos se instalan bajo la capa de pavimento asfáltico, la energía generada es utilizada para la iluminación de las vías y para monitorizar los datos de circulación [11].

En los meses de enero y mayo de 2008 se llevó a cabo la segunda prueba en la estación de Yaesu, ubicada también en Tokio, donde también se realizó la instalación de piezoeléctricos en las entradas de las registradoras y en escaleras, se amplió la zona de acción a 90 m², diez veces más alta que la primera realizada en la estación de Marunouchi, los resultados obtenidos fueron de 500 kW por día (Con esta energía se puede poner en servicio un bombillo de 100 W durante 80 minutos) [11].

En el año 2001 Nathan Shenck y Joseph Paradiso del laboratorio de medios del MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), del grupo de ambiente receptivos, crearon un dispositivo discreto capaz de generar electricidad de la fuerza ejercida en un zapato cuando el usuario camina, siendo este uno de los primeros dispositivos que se crearon para generar energía eléctrica a partir del movimiento peatonal y la fuerza ejercida por las pisadas usando el efecto piezoeléctrico [20].

Esta tecnología también puede ser instalada en aeropuertos, en las pistas de aterrizaje donde se puede aprovechar las vibraciones producidas por los aviones a la hora de despegar o aterrizar. También han sido instaladas en las zonas de alta afluencia de personas, ubicándolas debajo de los espacios transitables así aprovechando al máximo la energía perdida durante el movimiento de los peatones mientras caminan, corren, bailan, entre otras [20].

En los últimos años se han publicado multitud de artículos e investigaciones en diferentes tipos aplicaciones de cosecha de energía relacionadas con las vibraciones y la actividad diaria, hay un extenso estudio de diferentes tecnologías y aplicaciones de la piezoelectricidad relacionadas con la energía generada de forma pasiva por el cuerpo humano. En tal sentido, es conveniente conocer el desarrollo histórico del fenómeno piezoeléctrico.

2.5 ORIGEN DE LA PIEZOELECTRICIDAD

En 1880, Pierre y Jacques Curie, científicos franceses de la Universidad de París, descubrieron un fenómeno que en la actualidad se considera de gran importancia. A través de experimentos con cristales de cuarzo, la turmalina, la blenda o esfalerita y el topacio entre otros, vieron que si una deformación era aplicada a uno de ellos, daba como resultado un potencial eléctrico en la superficie de sus caras. A este fenómeno lo llamaron piezoelectricidad (Piezo significa presión) [21]. Un año después del descubrimiento hecho por los hermanos Curie, el físico Gabriel Lippmann partiendo de consideraciones termodinámicas, predijo el efecto contrario en éstos: un piezoeléctrico sometido a una carga eléctrica podría generar deformaciones mecánicas en el material, lo cual fue probado experimentalmente por los hermanos franceses y a este fenómeno se le llamó efecto piezoeléctrico inverso [22].

La primera aplicación práctica usando piezoeléctricos apareció en 1917 cuando el matemático y físico francés Paul Langevin propuso el uso del eco ultrasónico para el desarrollo de un dispositivo que detectara objetos bajo el agua (Hidrófono), éste fue construido con una placa de cuarzo puesta entre dos láminas de acero, el cual emitía y recibía ondas de baja frecuencia (kHz). La evolución de dicho dispositivo obligó su inclusión y uso generalizado en submarinos, por lo que fue inminente la invención de nuevos sistemas que se valían del efecto piezoeléctrico para

su funcionamiento, ejemplo de esto son los micrófonos, los audífonos, los dispositivos para la grabación de sonido y para la medida de vibraciones, fuerzas y aceleraciones[23].

En 1944 en el Lebedev Physical Institute perteneciente a la USSR (Union of Soviet Socialist Republics), los investigadores B. M. Wool y I.P. Goldman avanzaron en el desarrollo de piezoeléctricos sintéticos, desarrollando así el primer método de sinterización de una piezocerámica o cerámica piezoeléctrica de titanato de bario (BaTiO_3). Más tarde, en Estados Unidos, continuó por esta misma línea desarrollando la piezocerámica de titanato zirconato de plomo $\text{Pb}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3$ más conocida como PZT. A partir de estas invenciones se continuó con la investigación y en 1969 Kawai descubre un fuerte efecto piezoeléctrico en el polímero polifluoruro de vinilideno o fluoruro de polivilideno (PVDF) lo que llevó a muchos otros desarrollos aprovechando la flexibilidad del material. Hoy en día los desarrollos con piezoeléctricos incluyen materiales inteligentes para el control de vibraciones, aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales de superficies y estructuras flexibles, sensores robóticos y novedosos prototipos de cosecha de energía entre muchas otras más [1].

En el presente, se puede comprobar solo con mirar el número de publicaciones anuales, que se sigue investigando y desarrollando aplicaciones piezoeléctricas en todo el mundo, siendo este un mercado en auge, y con grandes posibilidades de crecimiento. Con el propósito de comprender al fenómeno de la piezoelectricidad, se definirá de manera detalla su terminología y los principios que la rigen.

2.6 PIEZOELECTRICIDAD

El término de piezoelectricidad deriva del prefijo “Piezo” que proviene del griego *piezein*, el cual significa apretar u oprimir [20]. La piezoelectricidad es un fenómeno que ocurre en determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, en su masa adquiere una polarización eléctrica y aparece una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie [24]. El efecto piezoeléctrico directo corresponde el comportamiento que se puede observar en la figura 2.4.

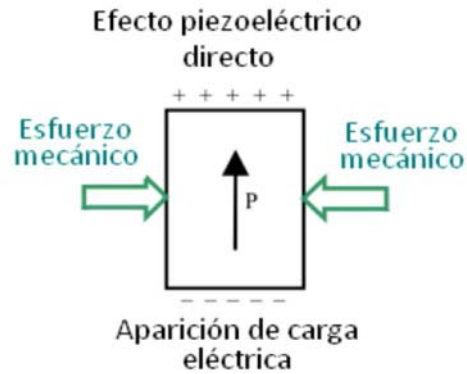


Figura 2.4. Efecto piezoeléctrico directo [1].

Este fenómeno también ocurre de manera inversa, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico es normalmente reversible: al dejar de someter los cristales a un voltaje exterior o campo eléctrico, recuperan su forma [24]. Se puede decir que este sistema se comporta como un condensador donde el dieléctrico es el material piezoeléctrico. La Figura 2.5 que se presenta a continuación muestra el esquema del efecto piezoeléctrico inverso. En ella se puede apreciar cómo al someter el cristal a un campo eléctrico aparecen unas fuerzas de compresión en las caras del cristal sobre las que se ha aplicado la diferencia de potencial [25].

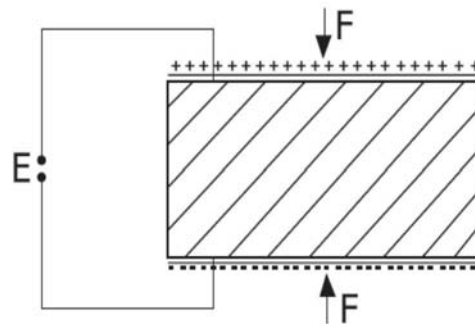


Figura 2.5. Efecto piezoeléctrico inverso [25].

Por esta razón, en el siguiente apartado, se van a analizar las ecuaciones que relacionan las deformaciones, tensiones y campo eléctrico generados en un material piezoeléctrico.

2.7 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

La piezoelectricidad es una forma de acoplamiento bilineal entre el comportamiento mecánico y eléctrico de cerámicas y cristales pertenecientes a ciertas clases; así, cuando un material piezoeléctrico es mecánicamente deformado, se produce una polarización eléctrica, la cual es proporcional a la deformación aplicada, y cuando ésta es polarizada, se genera una deformación en el material [1].

El efecto piezoeléctrico directo viene caracterizado por la siguiente ecuación [26]:

$$P=dT \quad (2.5)$$

Donde:

P: es el vector de polarización piezoeléctrico, (C/m²).

d :es la constante de carga piezoeléctrica, (C/N).

T: es la tensión a la que se ve sometido el material piezoeléctrico, (N/m²).

A su vez, el efecto piezoeléctrico inverso viene caracterizado por la siguiente ecuación [26]:

$$S=dE \quad (2.6)$$

$$S=gD= g \epsilon E \quad (2.7)$$

Donde:

S: es la deformación sufrida por el piezoeléctrico, (CV/Nm).

D: es el desplazamiento eléctrico o densidad de flujo eléctrico, (C/m²)

g:es la constante de tensión (voltaje) piezoeléctrica, (Vm/N).

ϵ :es la permitividad dieléctrica, (C/Vm).

E: el campo eléctrico al que se ve sometido el material piezoeléctrico, (V/m).

Considerando las propiedades elásticas del material piezoeléctrico las ecuaciones (2.8) y (2.9) se puede reformular como [26]:

$$P=dT=dcS=eS \quad (2.8)$$

$$T=cS=cdE=eE \quad (2.9)$$

Donde:

c: es la constante elástica que relaciona el estrés generado al aplicar una deformación, (T=cS),(N²/CVm).

s :es la compilancia elástica del medio a un campo eléctrico constante que relaciona la deformación producida al aplicar una tensión, (S= sT), (CVm/N²)

e: es la constante piezoeléctrica de tensión, (N/Vm)

Si el material piezoeléctrico está sujeto a una deformación (S), esta deformación tendrá dos efectos. Por un lado generara una tensión elástica (T_e=cS), por otro lado generara polarización piezoeléctrica (P_p=eS), esta polarización creara un campo eléctrico (el subíndice *p* indica la causa del campo eléctrico es el efecto piezoeléctrico, el subíndice *e* indica que la causa de la tensión es de origen elástico) [26]:

$$E_p = \frac{P}{p\epsilon} = \frac{eS}{\epsilon} \quad (2.10)$$

Este campo eléctrico de origen piezoeléctrico produce a su vez una deformación (T_p=eE_p)

$$T=T_e+ T_p \quad (2.11)$$

$$S=S_e+S_p \quad (2.12)$$

Si el material piezoeléctrico está sujeto a un campo eléctrico (E) entre los dos electrodos que contienen el material piezoeléctrico, se crea un desplazamiento eléctrico entre ellos, generando una densidad de carga superficial (σ) cuya magnitud es $D = \epsilon E$. Al ser el material además de dieléctrico, piezoeléctrico, este campo eléctrico produce una deformación $S_p=dE$. Esta deformación hace que aumente la densidad superficial de carga ($P_p= eS = dT$). Por lo tanto el desplazamiento eléctrico total será [26]:

$$D=dT+ \epsilon E \quad (9) \quad (2.13)$$

Esta ecuación representa el desplazamiento eléctrico inducido al aplicar una tensión mecánica y un campo eléctrico al material piezoeléctrico [26].

Así mismo la deformación S que se tendrá en el material piezoeléctrico, se obtendrá teniendo en cuenta que la aplicación de un campo eléctrico causa deformación ($S_p = dE$). Esta deformación, produce una tensión elástica ($S_p=sT_e$). Por otro lado, el campo eléctrico ejerce una fuerza en la estructura interna, provocando deformación ($T_p=eE$). Aproximando las expresiones se puede concluir que [26]:

$$S=s^E T+dE \quad (2.14)$$

Esta ecuación representa la deformación en el material piezoeléctrico al aplicar una tensión mecánica y un campo eléctrico externo [26].

El campo eléctrico puede generarse por deformaciones paralelas a la dirección de polarización, o perpendiculares a ella. Debido a esta propiedad de las cerámicas, las ecuaciones anteriores se pueden reescribir de manera matricial de la siguiente manera:

La ecuación (2.15) es la correspondiente al efecto piezoeléctrico directo, y la ecuación (2.16) al efecto piezoeléctrico inverso [26].

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} (S^E)_{11} & (S^E)_{12} & (S^E)_{13} & 0 & 0 & 0 \\ (S^E)_{21} & (S^E)_{22} & (S^E)_{23} & 0 & 0 & 0 \\ (S^E)_{31} & (S^E)_{32} & (S^E)_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (S^E)_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (S^E)_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (S^E)_{66} \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

Será preciso mostrar de forma detallada en el siguiente apartado los parámetros y constantes piezoeléctricas más importantes.

2.8 PARÁMETROS DEL EFECTO PIEZOELÉCTRICO (CONSTANTES)

Para tener en cuenta todas las posibles constantes, hay que considerar que las cerámicas piezoeléctricas son anisotrópicas (sus constantes varían dependiendo de la dirección). Las constantes físicas se relacionaran tanto con la dirección de la fuerza mecánica o eléctrica aplicada, como con la dirección perpendicular a esta. Por lo tanto, cada constante tendrá 2 subíndices que indicaran las direcciones de las fuerzas según la figura 2.6. La dirección de polarización generalmente se hace coincidir con el eje z (dirección 3 positiva) [26].

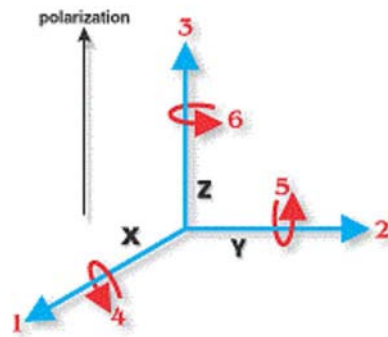


Figura 2.6. Numeración ejes en cerámica piezoeléctrica y dirección de polarización [26].

➤ Constante de carga piezoeléctrica

La constante de carga piezoeléctrica (d) es la polarización generada por unidad de tensión mecánica (T) aplicada a un material piezoeléctrico. También se puede definir como la deformación mecánica (S) experimentada por un material piezoeléctrico por unidad de campo eléctrico aplicado. La unidad de medida de la constante es m/V o C/N [26].

La constante va acompañada de dos subíndices (Ej: d_{11}). El primer subíndice indica la dirección de polarización (P) generada en el material cuando el campo eléctrico es 0. El segundo subíndice indica la dirección de la presión aplicada (T) o la deformación (S) inducida. El parámetro d es un indicador de la idoneidad de materiales para ser usados como actuadores [26].

Por otro lado para materiales que actúan como generadores piezoeléctricos, serán importantes las constantes d_{33} y d_{31} . Los materiales que dependen de presión aplicada perpendicularmente a los electrodos del piezoeléctrico, explotarán el coeficiente d_{33} , mientras que aquellos que dependen de la presión aplicada paralelamente a los electrodos utilizarán el parámetro d_{31} [26].

➤ **Constante de voltaje piezoeléctrica**

La constante de voltaje piezoeléctrico (g) es el campo eléctrico generado por un material piezoeléctrico por unidad de presión mecánica (T) aplicada. También se puede definir como la deformación mecánica (S) experimentada por un material piezoeléctrico por unidad de desplazamiento eléctrico (D) aplicado. La unidad de medida de la constante es mV/N [26].

El primer subíndice de g indica la dirección del campo eléctrico generado en el material. El segundo subíndice es la dirección de la tensión aplicada (T) o la deformación inducida (S). El parámetro g es un indicador de la idoneidad de materiales para ser usados como sensores.

Igual que en el caso de la constante d los coeficientes que más se tendrán en cuenta para las aplicaciones serán el g_{33} y el g_{31} [26].

La constante de voltaje piezoeléctrica se relaciona con la constante de carga piezoeléctrica mediante la siguiente expresión [26]:

$$g = \frac{d}{\epsilon^T} \quad (2.17)$$

➤ **Constante dieléctrica (Permitividad)**

La permitividad (ϵ) es el desplazamiento eléctrico por unidad de campo eléctrico. Esta variable además de definirse mediante subíndices, también lo hace con dos superíndices. El superíndice T (ϵ^T) indica la permitividad a presión constante. El superíndice S (ϵ^S) indica permitividad a deformación constante. De los dos subíndices, el primero indica la dirección del desplazamiento dieléctrico, y el segundo indica la dirección del campo eléctrico [26].

➤ **Compilancia elástica (Flexibilidad Elástica)**

La flexibilidad elástica (s) es la deformación (S) producida en un material piezoeléctrico por unidad de tensión aplicada (T). Como en el caso de la permitividad (ϵ), se tiene la constante definida mediante dos superíndices [26]:

- S_D es la flexibilidad a desplazamiento eléctrico constante.
- S_E es la flexibilidad elástica a campo eléctrico constante.

De los dos subíndices que definen la constante, el primero indica la dirección de la tensión (T). El segundo subíndice indica la dirección de la presión (S) [26].

En el caso de las direcciones 11 y 33, la flexibilidad elástica es a su vez el recíproco del módulo de elasticidad (Módulo de Young) [26].

➤ **Módulo de Young**

El módulo de Young (Y), es un indicador de la rigidez de un material cerámico. Se obtiene a partir de la tensión aplicada (T) dividido por el valor de la deformación resultante en la misma dirección [26].

$$Y = \frac{T}{S} \quad (2.18)$$

➤ **Factor de Acoplamiento Electromecánico**

El factor de acoplamiento electromecánico (k), es un indicador de la eficacia con que un material piezoeléctrico convierte la energía mecánica en eléctrica y viceversa. El primer subíndice para k indica la dirección a lo largo de la cual se sitúan los electrodos. El segundo subíndice para k indica la dirección en que se aplica la energía mecánica al material piezoeléctrico [9].

Dependiendo de las dimensiones y la geometría del material piezoeléctrico se tienen diferentes expresiones del parámetro k [26]:

- Para un disco plano de cerámica piezoeléctrica se tiene k_p , que expresa el acoplamiento radial. El acoplamiento radial, es el acoplamiento entre un campo eléctrico paralelo a la dirección de polarización (dirección 3) y las vibraciones radiales (direcciones 1 y 2) [26].

$$k_p^2 = \frac{2d_{31}^2}{\left((S_{11}^E + S_{12}^E) \epsilon_{33}^T \right)} \quad (2.19)$$

- Para un disco o lámina de material piezoeléctrico cuya superficie es mucho mayor que su grosor se tiene k_t , que expresa el acoplamiento entre un campo eléctrico en la dirección 3 y vibraciones en la misma dirección (k_{33}). La frecuencia de resonancia para estas dimensiones, es mucho mayor en la dirección 3 (dirección del ancho) que en la dirección 1 (dirección de la superficie). Esto hace que $k_t < k_{33}$ [26].

- Para varillas metálicas con longitud 10 veces mayor que el diámetro se usara el parámetro k_{33} [26].

$$k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{(S_{33}^E \epsilon_{33}^T)} \quad (2.20)$$

- Para varillas metálicas se usara el parámetro k_{31} (Plato cerámico) [26].

$$k_{31}^2 = \frac{d_{31}^2}{(S_{11}^E \epsilon_{33}^T)} \quad (2.21)$$

Las ecuaciones anteriores solo son válidas a bajas frecuencias [26].

Los valores máximos que suelen dar los fabricantes para este parámetro se refieren a valores máximos teóricos. A bajas frecuencias de entrada, para el caso de cerámicas piezoeléctricas, pueden convertir entre el 30% y el 75% de la energía recibida [26].

Para una conversión de energía eficiente es necesario un alto valor de k . El valor de eficiencia sin embargo, debe tomarse como la energía convertida por el piezoeléctrico entre la energía absorbida por el piezoeléctrico. Bajo esta medida, la eficiencia puede llegar al 90% [26].

➤ **Factor de Disipación dieléctrico**

El factor de disipación dieléctrico (δ), para un material cerámico mide las pérdidas dieléctricas del material. La tangente de δ ($\tan \delta$), se determina por la relación de conductancia efectiva y susceptancia efectiva en un circuito paralelo, midiéndolo mediante un puente de impedancias. Los valores de $\tan \delta$ se determinan a 1kHz [26].

➤ **Constante de Frecuencia**

La constante de frecuencia (N), describe la relación entre la dimensión geométrica de un elemento piezoeléctrico y su correspondiente frecuencia de resonancia (serie). Las diferentes variantes según la geometría vendrán indicadas mediante un subíndice [26]:

- La relación entre un la constante de frecuencia en modo radial y el diámetro de un elemento cerámico se muestra en la siguiente expresión [26]:

$$N_p = f_s D \Phi \quad (2.22)$$

Donde f_s es la frecuencia de resonancia y $D\Phi$ el diámetro del material [26].

- La constante de frecuencia en modo planar, está relacionada con el grosor (h) del elemento cerámico [26].

$$N_T = f_s h \quad (2.23)$$

- Por último se tiene la contante de frecuencia del modo longitudinal que está relacionada con la longitud del material [26].

$$N_L = fsl \quad (2.24)$$

Los valores típicos para cerámicas piezoeléctricas están entre 800 a 3000 Hzm (hertz*metro). Es un valor a tener en cuenta para dispositivos que trabajan en resonancia [26].

➤ **Factor de Calidad Mecánico**

El factor de calidad mecánico (Q_m), mide el amortiguamiento de un material piezoeléctrico y se determina a partir del ancho de banda a 3dB de la resonancia en serie del material que oscila. El valor recíproco es el factor de pérdidas mecánico [26].

➤ **Temperatura de Curie**

Es la temperatura a la que una red cristalina deja de presentar propiedades piezoeléctricas. Si se supera esta temperatura, el material se despolariza, y deja de servir como transductor de energía eléctrica en mecánica. Para cerámicas piezoeléctricas (PZT) los valores oscilan entre 150°C y 350°C [26].

De manera semejante, antes de empezar a enumerar los diferentes materiales piezoeléctricos, hay que estudiar las diferentes estructuras cristalinas que pueden formar los cristales piezoeléctricos.

2.9 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos, tienen la particularidad de no tener centro de simetría en su estructura [27]. Pueden convertir la tensión mecánica en electricidad, y la electricidad en vibraciones mecánicas [28].

El cuarzo es un ejemplo de un cristal piezoeléctrico natural, están hechos de átomos de silicio y oxígeno en un patrón repetitivo. En este cristal, los átomos de silicio tienen una carga positiva y los átomos de oxígeno tienen una carga negativa. Normalmente, cuando el cristal no está bajo

ningún tipo de estrés externo, las cargas se dispersan uniformemente en las moléculas a través del cristal [28].

Pero Cuando el cuarzo se estira o aprieta, el orden de los átomos cambia ligeramente. Este cambio causa que las cargas negativas se acumulen en un lado y las cargas positivas se acumulen en el lado opuesto. Cuando haces un circuito que conecta un extremo del cristal con el otro, puedes utilizar esta diferencia potencial para producir corriente. Entre más aprietas el cristal más fuerte será la corriente eléctrica [28].

Por el contrario, enviar una corriente eléctrica a través del cristal cambia su forma, esto se puede visualizar en la figura 2.7 [28].

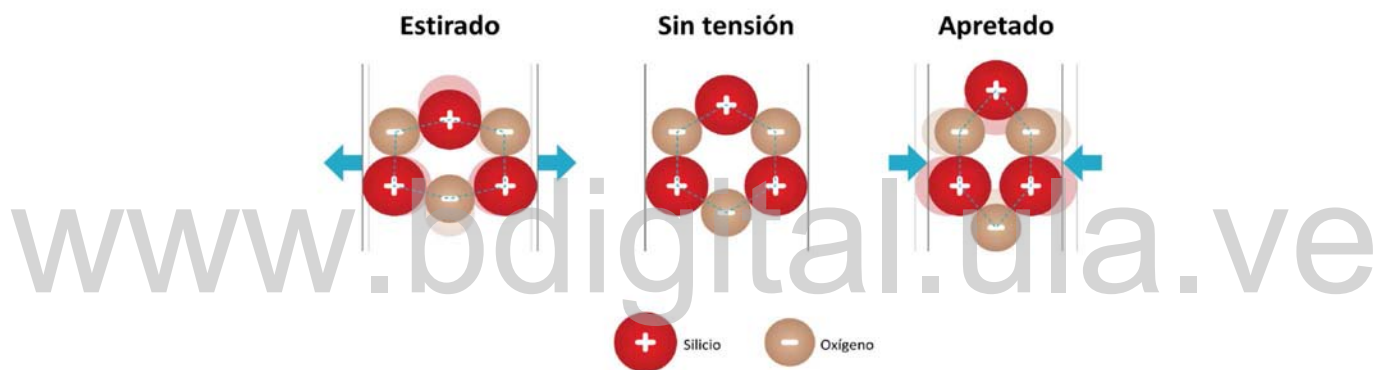


Figura 2.7. Efecto piezoeléctrico en un cristal de cuarzo [28].

El efecto de una tensión de tracción o de compresión produce la disociación de los centros de gravedad de las cargas positivas y negativas, cuando esto ocurre empiezan a crearse dipolos elementales los cuales fomentan que cargas de signo contrario se sitúen en sus caras. Este efecto es denominado polarización neta. La polarización es directamente proporcional a la tensión aplicada, del mismo modo la tensión que aparecerá en el cristal será directamente proporcional al campo eléctrico aplicado [27].

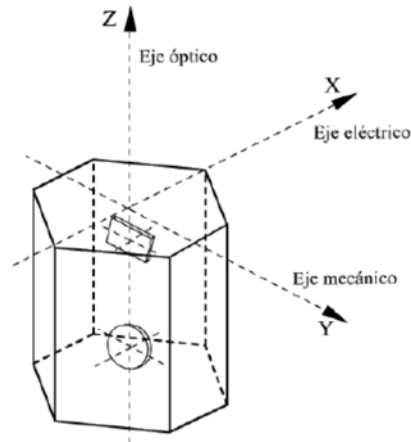


Figura 2.8. Ejes cristalográficos de un cristal de cuarzo. Corte en el eje X [25].

En la Figura 2.8 se ilustran los ejes de referencia típicos para un material piezoeléctrico como son el eje óptico, el eje eléctrico, el eje mecánico. De los cuales para el desarrollo se tienen en cuenta el eje mecánico y eléctrico [25].

El efecto piezoeléctrico se presenta en cristales que tienen uno o varios ejes polares, que a su vez no tienen centro de simetría. Existe una relación entre el esfuerzo mecánico y la carga resultante, siendo máxima la carga según el eje polar del cristal. Es por ello que una vez obtenidas las placas o láminas de estos cristales, éstas se cortarán según las direcciones adecuadas [25].

Si el campo eléctrico aplicado es variable con el tiempo, los cambios de forma y de dimensiones del material son también una función del tiempo. Por tanto, aplicando una excitación eléctrica a una determinada frecuencia, se obtienen variaciones mecánicas a la misma frecuencia, es decir: el cristal vibra a la frecuencia a la que varía la excitación eléctrica. Gracias al principio de equivalencia de frecuencias se puede asegurar que las partículas de aire que envuelven al cristal están vibrando a la misma frecuencia [25].

Anteriormente han aparecido los términos de centro y eje de simetría. Estos se definirán a continuación [25]:

- **Centro de simetría** Punto interior de un cristal que divide en dos partes iguales a todo segmento rectilíneo que pase por él y esté limitado por la superficie del cristal [25].
- **Eje de simetría:** Es toda línea que, tomada como eje de rotación, hace que el cristal coincida consigo mismo dos o más veces en una vuelta. Según el número de coincidencias los ejes pueden ser binarios, ternarios, cuaternarios o senarios [25].
- **Ejes polares:** Son aquellos ejes de simetría que terminan en elementos geométricos de distinta categoría. (Ej.: ejes ternarios del tetraedro que van de un vértice al centro de la cara opuesta) [25].

2.9.1 Clasificación

La mayoría de los materiales piezoeléctricos de interés para aplicaciones tecnológicas son sólidos cristalinos. Estos pueden ser monocristales (naturales o sintéticos) o materiales policristalinos como las cerámicas ferroeléctricas, que polarizándolas se pueden volver piezoeléctricas y tener a escala macroscópica simetría monocristalina al formarse dos polos [29].

La ciencia de la cristalografía proporciona una nomenclatura altamente desarrollada y una gran cantidad de datos útiles para los ingenieros y científicos que trabajan con cristales piezoeléctricos [29].

El termino cristal se aplica a un sólido en que los átomos están dispuestos en un único patrón repetido en todo el cuerpo. En cada cristal, los átomos están agrupados en pequeños grupos, todos ellos iguales, orientados de igual manera y alienados en las tres dimensiones. Cada grupo se puede considerar delimitado por un paralelepípedo [26].

El cristal se forma juntando en las tres dimensiones estos paralelepípedos sin espacio entre ellos. A esto se le llama celda unitaria. La celda unitaria puede tener diferentes formas y

dimensiones dependiendo de los átomos que la formen. La celda unitaria tiene el menor tamaño posible [26].

Las propiedades de un cristal se describen mediante un sistema de coordenadas naturales, indicados por las letras a b y c, que son los bordes de la celda unitaria. Dependiendo de su grado de simetría los cristales se clasifican en siete sistemas: triclinico (el menos simétrico), monoclinico, ortorrómbico, tetragonal, trigonal, hexagonal y cúbico. Los sistemas son a su vez divididos en grupos puntuales según su simetría respecto a un punto [26].

En total hay 32 clases (grupos puntuales), 12 de las cuales presentan grado de simetría demasiado alto para presentar propiedades piezoeléctricas, por lo tanto 20 clases pueden presentar propiedades piezoeléctricas [29].

Se puede hacer una primera separación de los materiales piezoeléctricos en dos grandes grupos como son los materiales naturales y los fabricados artificialmente [29].

2.9.1.1 Materiales Naturales

Los materiales que poseen propiedades piezoeléctricas de manera natural, se encuentran en forma de minerales o cristales en la naturaleza [26].

Entre sus características destacan que sus propiedades casi no varían con el paso de tiempo, pero el mayor problema es que las señales eléctricas que producen son muy pequeñas por lo que no son una buena opción para un sistema de cosecha de energía [26].

Entre los materiales que poseen piezoelectricidad de manera natural destacan el Cuarzo, la turmalina y la sal de Rochelle [26].

2.9.1.2 Materiales Ferroeléctricos y Cerámicas

Estos materiales se pueden polarizar, aplicando un campo eléctrico externo, y así presentan propiedades piezoeléctricas. Estos materiales pueden ser a también cerámicas diseñadas

sintéticamente. Dentro de los materiales sintéticos de alta densidad de energía se tiene las cerámicas, los materiales monocristalinos, los polímeros y películas delgadas [26].

➤ Cerámicas policristalinas

Las cerámicas policristalinas están compuestas por numerosos cristales ferroeléctricos, formando una estructura policristalina. Estas cerámicas son útiles para aplicaciones en las que se requiere materiales con alta densidad de energía [26].

Un material de alta densidad de energía, se caracteriza por un valor alto del producto de la constante de carga (d) y la constante de voltaje (g). Para tener un alto valor de d^*g hay que tener en cuenta la ecuación $|d| = \epsilon^n$, donde ϵ es la permitividad del material y n un parámetro del material con límite inferior de 0.5. En la tabla 2.2 se puede ver una comparación de cerámicas de diferentes fabricantes, así como sus valores de d , g y d^*g [26].

Tabla 2.2. Cerámicas policristalinas comerciales. Propiedades piezoeléctricas [30].

Compuesto	ϵ_{33}/ϵ_0	d_{33} (pC/N)	g_{33} (Vm/N)	$d_{33}^*g_{33}$ (m ² /N)	n
Morgan electroceramics					
PZT 701	425	153	41 x 10 ⁻³	6273 x 10 ⁻¹⁵	1.165
PZT 703	1100	340	30 x 10 ⁻³	10200 x 10 ⁻¹⁵	1.181
PZT 502	1950	450	25 x 10 ⁻³	11250 x 10 ⁻¹⁵	1.204
PZT 507	3900	700	20 x 10 ⁻³	14000 x 10 ⁻¹⁵	1.227
American Piezoelectric Ceramics International					
APC 880	1000	215	25 x 10 ⁻³	5375 x 10 ⁻¹⁵	1.20
APC 840	1250	290	26.5 x 10 ⁻³	7685 x 10 ⁻¹⁵	1.198
APC 841	1350	300	25.5 x 10 ⁻³	7650 x 10 ⁻¹⁵	1.202
APC 850	1750	400	26 x 10 ⁻³	10400 x 10 ⁻¹⁵	1.203
APC 855	3400	620	21 x 10 ⁻³	12600 x 10 ⁻¹⁵	1.224
Ferroperm Piezoceramics					
Pz 24	400	190	54 x 10 ⁻³	10260 x 10 ⁻¹⁵	1.150
Pz 26	1300	300	28 x 10 ⁻³	8400 x 10 ⁻¹⁵	1.199
Pz 39	1780	480	30 x 10 ⁻³	14400 x 10 ⁻¹⁵	1.194

Tabla 2.2. Cerámicas policristalinas comerciales. Propiedades piezoeléctricas [30]. (continuación)

Pz 52	1900	420	25 x 10 ⁻³	10500 x 10 ⁻¹⁵	1.206
Pz 29	2900	575	23 x 10 ⁻³	13225 x 10 ⁻¹⁵	1.217
Edo Corporation					
EC-63	1300	295	24.1 x 10 ⁻³	7109.5 x 10 ⁻¹⁵	1.20
EC-65	1725	380	25 x 10 ⁻³	9500 x 10 ⁻¹⁵	1.205
EC-70	2750	490	20.9 x 10 ⁻³	10241 x 10 ⁻¹⁵	1.222
EC-76	3450	583	19.1 x 10 ⁻³	11135.3 x 10 ⁻¹⁵	1.228

A la hora de seleccionar una cerámica para una determinada aplicación, hay que tener en cuenta parámetros como el rango de temperatura en el que opera ($-20 < T < 80$ °C), el rango de frecuencia (10-200Hz), el rango de amplitud de la fuerza externa que se le puede aplicar (0.1-3N) y el tiempo de vida ($>10^6$ ciclos) [30].

Para aplicaciones médicas y domésticas, en los últimos tiempos se están empezando a utilizar cerámicas que no contienen plomo en su composición. Una alternativa son las cerámicas basadas en el compuesto (Na, K) NbO₃ (KNN) [26].

➤ Materiales Monocristalinos

Los materiales monocristalinos tienen excepcionales propiedades, como factor de acoplamiento electromecánico de 0.95, coeficiente de carga piezoeléctrico entre 1500 y 2000 pC/N. En la tabla 2.3 se pueden ver las propiedades de algunos materiales monocristalinos diseñados mediante diferentes técnicas [26].

Tabla 2.3. Materiales Monocristalinos comerciales orientados en la dirección 001. Propiedades [30].

Material	T _c (°C)	TR-T (°C)	d ₃₃ (pC/N)	ε ₃₃ /ε ₀	tan δ (%)	k ₃₃
PMN-PT-B (HC Material)	-	~75	2000-3500	5500-6500	0.8	0.90-0.94
TRS-X2C (TRS Tech.)	160	75	2200-2700	6500-8500	1	0.92
Type IB (Ibule Ph.)	-	88	1871	6502	<1	0.91

70PMN-30PT (Ceracomp)	130	90	1500	5000	<1	0.9
CPSC20-130 (Ceracomp)	195	130	1450	4200	<1	0.9

Tabla 2.3. Materiales Monocristalinos comerciales orientados en la dirección 001. Propiedades [30]. (continuación)

Los coeficientes piezoeléctricos de los materiales monocristalinos se pueden mejorar dependiendo de las dimensiones y la dirección de polarización (figura 2.9). Esto es muy útil para diseñar transductores de tipo bimorfo porque utilizan principalmente los coeficientes d_{31} y d_{32} [26].

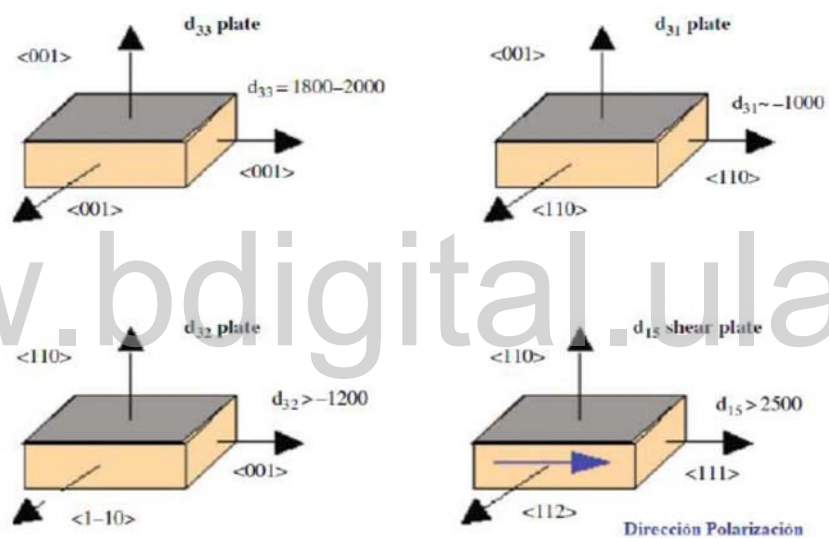


Figura 2.9. Variación de los coeficientes piezoeléctricos con la orientación y dirección de polarización [30].

La ventaja de estos dispositivos bimorfos es que son simples y baratos de fabricar. La desventaja es que son sistemas uniaxiales y tienen una densidad de potencia limitada [26].

➤ Polímeros Piezoeléctricos (PVDF)

El polifluoruro de vinilideno o fluoruro de polivinilideno (PVDF), es un polímero semicristalino. Es aproximadamente 50% amorfo y 50% cristalino. En estos materiales se obtiene un momento dipolar neto aplicando un fuerte campo eléctrico por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g) y luego se congela enfriando el material, con lo que se consigue el efecto piezoeléctrico en el material. Son útiles para aplicaciones a temperaturas altas ya que su temperatura de Curie es cercana a 110°C . Son útiles también como sensores, puesto que tienen altas constantes de voltaje piezoeléctricas [30].

Una de las ventajas del PVDF es que es mecánicamente muy fuerte y resiste cantidad de productos químicos como ácidos y puede fabricarse sobre una base de carrete continuo [26].

También presenta una fuerte respuesta piezoeléctrica incluso a frecuencias del orden de microondas. Otra de las ventajas, como se ha mencionado antes es su alta constante g con respecto a otros piezoeléctricos. En la tabla 2.4 se puede apreciar una comparación entre el PVDF y otros materiales piezoeléctricos comúnmente usados [26].

Tabla 2.4. Comparación entre los materiales más usados y el PVDF [31].

Material	ϵ_{33}/ϵ_0	d_{33} (pC/N)	g_{33} (10^{-3} Vm/N)
BaTiO ₃	1700	191	12.6
Quartz	4.5	2.3 (d ₁₁)	50.0 (g ₃₁)
PVDF	13	-33	-339.0
PZT-4	1300	289	25.1

➤ Películas delgadas

Las películas delgadas de materiales como PZT se emplean comúnmente para aplicaciones como sensores, interruptores y diafragmas de actuación. Las películas gruesas de PZT (policristalinas) se usan para aplicaciones MEMS (sistemas micro electromecánicos), puesto que su constante piezoeléctrica (d) es mayor que en otros materiales [30].

La constante de carga piezoeléctrica en una película delgada o gruesa, difiere de la del material del que está compuesta, debido a la restricción impuesta por el sustrato sobre el que está la película. La constante d_{33} es más pequeña para la película que para el volumen [26].

La deposición de solución química o el método sol-gel (método de producción de materiales sólidos a partir de moléculas pequeñas) son los métodos normalmente utilizados para sintetizar películas gruesas dado su rentabilidad, el conseguir una mejor textura y un buen control de la estequiometría. Las películas delgadas de PZT orientadas en la dirección (110) muestran una respuesta piezoeléctrica más alta. Las propiedades piezoeléctricas y dieléctricas, aumentan con el grosor de la película y se vuelven equivalentes a las del material cuando el grosor es mayor de $10\mu\text{m}$ [26].

Del mismo modo, en el siguiente apartado se centrará en las cerámicas piezoeléctricas, puesto que estas son los materiales piezoeléctricos más usados en la actualidad para todo tipo de aplicaciones. Por lo que se hará un estudio de sus propiedades, características y aplicaciones.

2.10 CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS

2.11 Definición

Una cerámica piezoeléctrica es un cuerpo macizo de cristales de perovskita. Cada cristal está compuesto de un ion metálico pequeño tetravalente, colocado dentro de una red formada por iones metálicos divalentes más grandes que el anterior y oxígeno como se muestra en la figura 2.10. Por encima de la temperatura de Curie (fig. 2.10 izquierda) posee simetría cúbica por lo que no se tiene momento dipolar. Por debajo de la temperatura de Curie, se observa un momento dipolar (fig. 2.10 derecha) en condiciones de simetría tetragonal o romboédrica [32].

Para provechar el efecto piezoeléctrico de estas cerámicas, se han de colocar dos electrodos en dos caras opuestas de la misma con el fin de que se produzca una diferencia de potencial entre ellos (polarización). Como se observa en la figura 2.10 visto la dirección de polarización se suele considerar la del eje z positivo, por lo tanto los electrodos estarían en las caras perpendiculares a dicha dirección [26].

Desde un punto de vista eléctrico, esta cerámica piezoeléctrica incluyendo los electrodos, se comporta como un condensador plano-paralelo con la cerámica actuando como dieléctrico, por ello es una buena opción para aplicaciones que requieran poco consumo de energía [26].

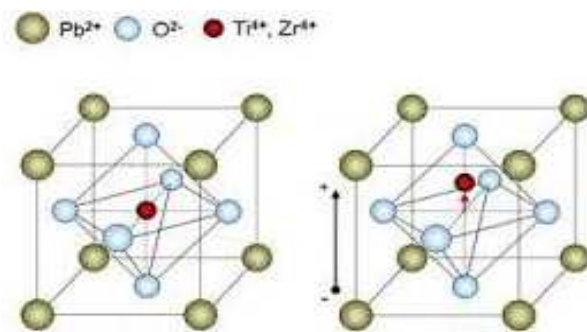


Figura 2.10. Estructura cristalina de una cerámica piezoeléctrica antes y después de ser polarizada (Pb: Plomo, O2: Oxígeno, Ti: Titanio, Zr: Circonio) [33].

2.12 Preparación Cerámicas Piezoeléctricas

Para preparar una cerámica piezoeléctrica, los metales que la componen, en forma de polvos finos, son mezclados en proporciones específicas. La mezcla, se calienta para formar un polvo uniforme. El polvo se mezcla a continuación con aglutinante orgánico, y se conforma según la forma que se quiera según la aplicación (discos, varillas, etc.) [26].

Posteriormente, esta mezcla de polvo, ya con la forma deseada, se calienta durante un tiempo y temperatura específicos (altas temperaturas). Este proceso hace que las partículas de polvo se sintericen y el material forma una estructura cristalina densa. Después de dejar la estructura cerámica enfriar, se procede a colocar los electrodos en las superficies deseadas [26].

Los dipolos presentes a temperaturas menores que la temperatura de Curie, cuando se encuentran adyacentes, forman regiones llamadas dominios que se encuentran alineadas localmente. Esta alineación proporciona un momento dipolar neto para el dominio, aunque este momento dipolar neto no mantiene la misma dirección para el resto de dominios, siendo aleatoria (figura 2.11a). Cuando se somete a la cerámica a un campo eléctrico de corriente continua entre sus dos electrodos (a una Temperatura cercana a la de Curie), los momentos dipolares de los dominios se alinean (figura 2.11b). Mediante el proceso de polarización los

dominios más alineados con el campo eléctrico se expanden en detrimento de los menos alineados. La cerámica a su vez se expande en la dirección del campo eléctrico. Cuando se retira el campo eléctrico (figura 2.11c) los dominios quedan alineados en la dirección del campo consiguiendo así una polarización permanente en la dirección de polarización [26].

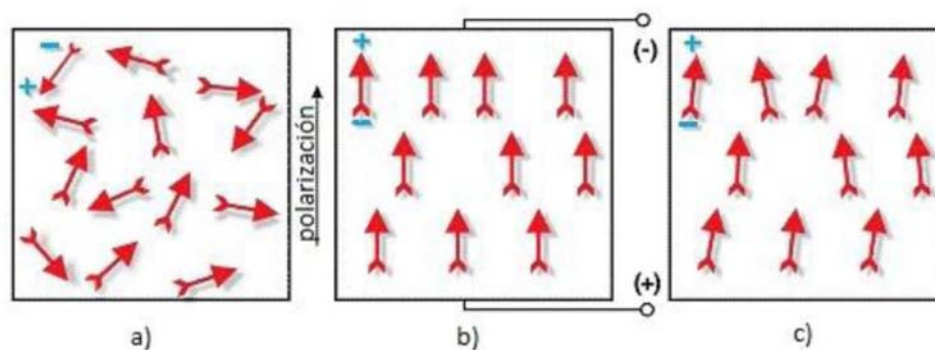


Figura 2.11. Polarización cerámica piezoeléctrica [26].

2.13 Tipos de cerámicas

Las cerámicas piezoeléctricas se pueden dividir en dos grandes grupos según el tipo de dopante [26]:

2.13.1 Cerámicas Blandas

Las cerámicas blandas se crean añadiendo pequeñas cantidades de dopantes donores a la cerámica, que crean cationes en la estructura cristalina. Estas cerámicas piezoeléctricas blandas, se caracterizan por grandes factores de acoplamiento electromecánico, grandes constantes piezoeléctricas, alta permitividad, grandes constantes dieléctricas, altas pérdidas dieléctricas, factores de calidad mecánica bajos y baja linealidad [26].

Poseen a su vez ancho de banda de señal más amplio que las cerámicas duras, pero presentan una mayor histéresis y son más propensas a la despolarización y al deterioro. Debido a su temperatura de Curie se usan a bajas temperaturas. Generalmente, sus características impiden utilizarlas para aplicaciones que requieren alta frecuencia o grandes campos eléctricos. Se usan principalmente en aplicaciones de detección (sensores) [26].

2.13.2 Cerámicas Duras

Las cerámicas duras se crean añadiendo pequeñas cantidades de dopantes aceptores a la cerámica, que crean aniones en la estructura cristalina. Las cerámicas piezoeléctricas duras tienen características opuestas a las cerámicas blandas, como pueden ser: temperatura de Curie por encima de los 300°C, constantes de carga piezoeléctrica pequeñas, grandes factores de acoplamiento electromecánico y grandes factores de calidad mecánica [26].

Las cerámicas duras son más difíciles de polarizar o despolarizar. Son más estables que las cerámicas blandas, pero producen menos desplazamiento. Soportan, al contrario que las cerámicas blandas, elevadas cargas mecánicas y grandes voltajes [26].

2.14 PZT. Propiedades y procesos de fabricación

Las cerámicas PZT (titanato zirconato de plomo) son uno de los materiales cerámicos piezoeléctricos más usados en el mundo, y será el elegido para la realización de nuestro sistema. En el caso del PZT el ion de metal tetravalente suele ser titanio o circonio y el ion de metal divalente plomo [26].

El PZT es un material piezoeléctrico basado en óxido metálico, que fue por primera vez desarrollado en 1952 en el Instituto de Tecnología de Tokio. Presentaba un avance respecto al titanato de bario (BaTiO_3) descubierto anteriormente, debido a su mayor sensibilidad y mayor temperatura de funcionamiento [26].

Otras de sus ventajas respecto a las otras cerámicas piezoeléctricas es que se puede fabricar a un precio bajo, es físicamente fuerte y químicamente inerte. Además, permite adaptarse para cumplir los requisitos que se desea [26].

El proceso de fabricación del PZT consiste en seis operaciones distintas. Primero se obtienen, evalúan y se seleccionan las materias primas. Además de tener en cuenta la pureza para su

selección, también se tiene en cuenta la cantidad de impurezas nocivas que contienen y la aplicación que se la dará al material [26].

Una vez seleccionado y aprobado el uso que se le va a dar a cada material, se pesa de forma precisa para la composición a realizar y se introduce en molinos húmedos. Los materiales (ingredientes) se muelen en húmedo en las proporciones adecuadas para tener una distribución uniforme del tamaño de la partícula. Es necesario un control preciso de la distribución del tamaño para garantizar la correcta actividad del material durante la calcinación [26].

Después del proceso de molido, el producto resultante, se seca y se prepara para la calcinación. La calcinación se lleva a cabo con aire a aproximadamente 1000 °C en crisoles de alta pureza. El óxido de plomo es uno de los ingredientes principales del PZT y peligroso con la presión a altas temperaturas (calcinación), por lo que se toman medidas para que no se vea alterada la composición del material por la evaporación del mismo [26].

El siguiente paso consiste en introducir de nuevo el polvo PZT ya calcinado en el molino para asegurar la homogeneidad y preparar el material para la adición del agente aglutinante orgánico. La mezcla con el aglutinante se pasa por un secador por pulverización donde se evapora el agua. Por último, se somete al polvo PZT a un proceso de compactación en moldes con la forma final deseada (discos, láminas, varillas, etc.) [26].

Para utilizar esta cerámica como material piezoeléctrico, faltaría añadir los dos electrodos en caras opuestas. La técnica más utilizada comercialmente es la deposición por tinta de plata en la superficie. Las cerámicas PZT se utilizan en multitud de aplicaciones, para las cuales se selecciona un tipo u otro de cerámica PZT (blanda o dura) como se aprecia a continuación.

2.15 Tipos de cerámicas PZT

Dentro de las cerámicas PZT y dependiendo del tipo de cerámica (blanda o dura) la clasificación Navy ha servido de estándar para la clasificación de los diferentes tipos de compuestos PZT. A su vez, dependiendo del fabricante que produzca el material, este puede variar con respecto a

otro de otro fabricante con la misma clasificación [34] [35]. Esta clasificación define 6 tipos de materiales PZT [26]:

- Navy type I: Este material, también conocido como PZT-4, permite altas amplitudes de vibración, con bajas pérdidas mecánicas y dieléctricas. Sus características hacen que sea adecuado para aplicaciones de uso continuo y repetitivo. Se usa para aplicaciones como pueden ser nano posicionamiento, aplicaciones médicas, sonar o aplicaciones que requieran alta potencia [26].
- Navy type II: También conocido como PZT-5A, posee una alta sensibilidad, permitividad y estabilidad en el tiempo en aplicaciones como receptor o generador en acelerómetros, en aplicaciones de captación de vibraciones e hidrófonos. Este material no es adecuado para aplicaciones con altas corrientes eléctricas (alta potencia) debido al calentamiento dieléctrico. Por lo tanto será adecuado para aplicaciones de baja potencia [26].
- Navy type III: También conocido como PZT-8. Este material es muy similar al tipo I pero mejorado para su uso más altas potencias con menores pérdidas. Su calidad mecánica es muy alta y es el material PZT que mayores potencias soporta. Entre sus posibles aplicaciones destaca los ultrasonidos de alta potencia [26].
- Navy type V: Se trata de una composición intermedia entre los tipos II y VI. No es muy usado puesto que la mayoría de aplicaciones desarrollan con los tipos II o VI que se ajustan más específicamente a los requerimientos. Conocido como PZT-5J [26].
- Navy type VI: También conocido como PZT-5H. Este material tiene una muy alta permitividad, acoplamiento y constante piezoeléctrica pero menor estabilidad en el tiempo. Es similar al tipo II pero con mayor sensibilidad y constante dieléctrica a expensas de una temperatura de Curie menor. Se usa para aplicaciones que requieren un control de movimiento preciso o para receptores sensibles [26].

Para trabajar con un modelo eléctrico, es básico tener un circuito equivalente del material piezoeléctrico que sea fiable y que se asemeje con la realidad del comportamiento del mismo. Se puede observar de manera detallada en el siguiente apartado.

2.16 MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE

Existen varios modelos para conseguir asemejar el comportamiento del piezoeléctrico a un circuito equivalente, aunque estos son muy parecidos, a continuación, se muestra uno de los más completos [36].

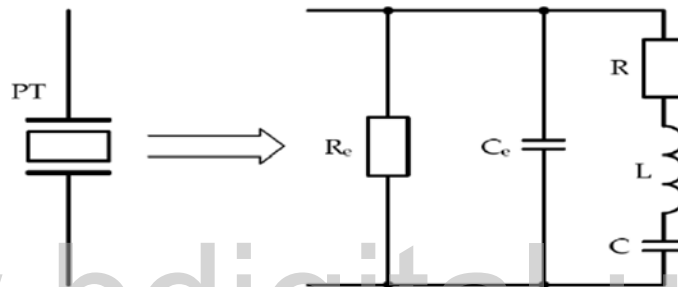


Figura 2.12. Circuito equivalente de un piezoeléctrico [37].

Donde:

R_e : es la resistencia del disco piezoeléctrico, (Ω).

C_e : es la capacidad estática del transductor, (F).

C: la capacidad mecánica equivalente, (F).

L: la inductancia mecánica equivalente (H).

R: la resistencia equivalente, (Ω).

Lo cierto es que estos valores, dependen no solo del tipo de material del que esté compuesto el piezoeléctrico, sino también de la frecuencia, y se pueden modelar como se muestra a continuación [36]:

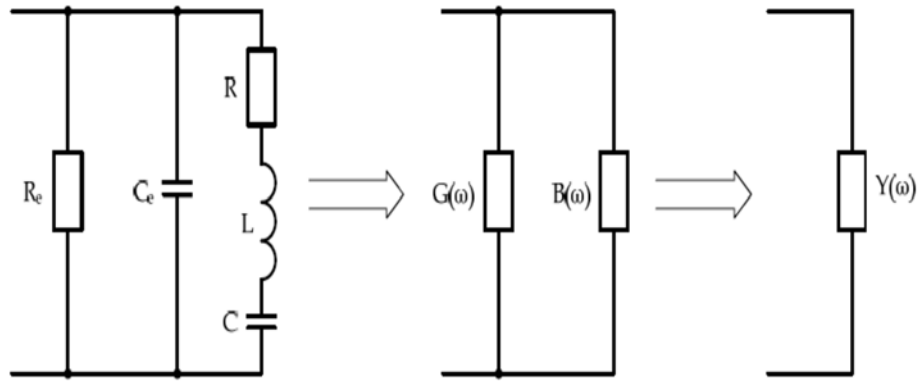


Figura 2.13 Simplificación de los valores del circuito equivalente [37].

Donde los valores de G, B e Y, se definen con las siguientes fórmulas [37]:

$$B(\omega) = \text{Im } Y(\omega) = \omega C_e + \frac{\omega C(1 - \omega^2 LC)}{\omega^2 C^2 R^2 + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (2.25)$$

$$G(\omega) = \text{Re } Y(\omega) = G_e + \frac{\omega^2 C^2 R}{\omega^2 C^2 R^2 + (1 - \omega^2 LC)^2} \quad (2.26)$$

$$Y(\omega) = \sqrt{B^2 G^2} \quad (2.27)$$

Donde:

$$G_e = 1 / R_e$$

$$\omega = 2\pi f$$

Otro modelo para los piezoeléctricos, en este caso un modelo específico para los PZTs de tipo cantiléver, que son los más comunes para diseños de captación de vibraciones es el propuesto en la siguiente figura [36]:

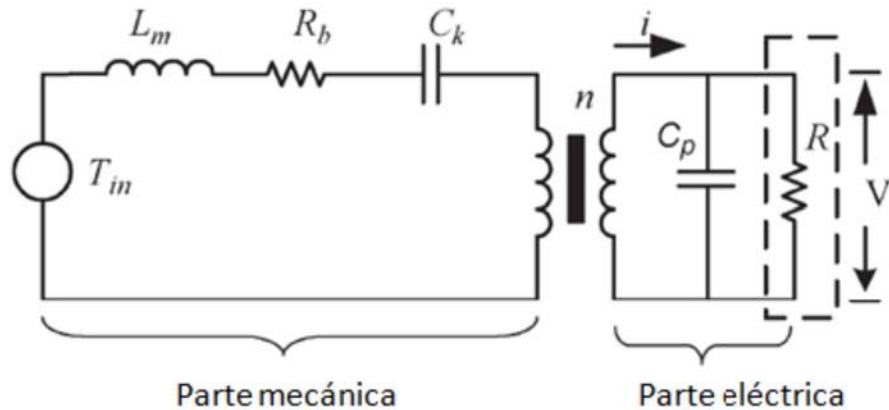


Figura 2.14. Modelo de circuito equivalente de piezoeléctrico cantiléver [38].

Como se puede observar en la figura, este modelo trata de separar la parte mecánica, más relacionada con las propiedades físicas del material. La parte mecánica (L_m , R_b y C_k) modela por tanto las pérdidas producidas por el efecto mecánico, principalmente el calor disipado. Por otro lado, la parte eléctrica modela principalmente las pérdidas dieléctricas [39].

Otro modelo más sencillo que se encuentra entre la bibliografía, propone dos tipos de funcionamiento [36].

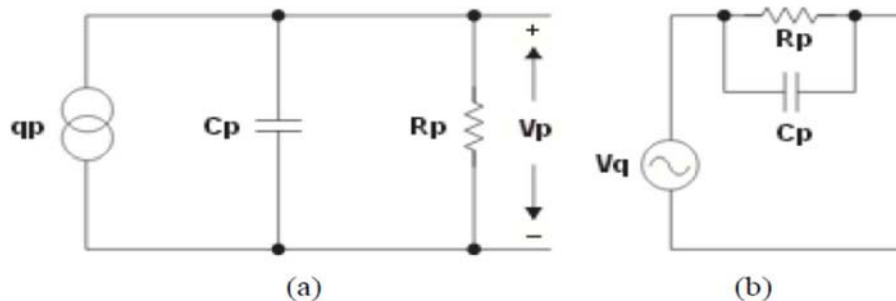


Figura 2.15. Modelo de circuito equivalente piezoeléctrico, Actuando como carta, (b) Actuando como generador [40].

Este modelo propuesto, solamente se plantea para bajas frecuencias, y es bastante más sencillo que el anterior, tanto actuando como efecto directo como inverso. Los valores de C_p y R_p vienen determinadas en este caso por el material piezoeléctrico, normalmente en las hojas de especificación entregadas por los fabricantes, y tienen un valor constante [36].

Por otro lado, el valor de V_q depende tanto de las características físicas del piezoeléctrico como de la excitación aplicada sobre el mismo [36].

La capacidad de este circuito equivalente depende de las dimensiones del material piezoeléctrico, con lo que habrá que tener en cuenta el tipo de configuración para el correcto modelado del material. Dependiendo del tipo de aplicación este circuito equivalente también sufre variaciones, como puede ser añadir en el modelo una resistencia de pérdidas [26].

Dada por la expresión [26]:

$$R_{\text{pérdidas}} = \frac{\tan \delta}{\omega C_0} \quad (2.28)$$

Finalmente, el último circuito equivalente es muy similar al anterior, con la diferencia de que la resistencia y la capacitancia equivalente, se conectan en serie en lugar de paralelo [36].



Figura 2.16. Circuito equivalente simple de generador piezoeléctrico con impedancias en serie [36].

A la hora de diseñar un sistema de cosecha de energía basado en la recolección de energía en forma de vibraciones, es imperativo diseñar la forma y configuración de nuestro piezoeléctrico de manera aprovechar al máximo las características del entorno para la máxima recolección de energía. Como se observa en el siguiente apartado.

2.17 Tipos de configuración

Algunos de los tipos de configuración encontrados en la bibliografía para la recolección de energía en forma de vibraciones se comentan en este apartado [26].

2.17.1 Viga en voladizo (*Cantilever*)

La configuración del tipo viga en voladizo es una de las estructuras más simples para recolección de energía mediante vibraciones, que además, puede producir una gran deformación bajo estas vibraciones (figura 2.17). Esta estructura consiste en una o dos láminas de material piezoeléctrico con los electrodos en la capa superior e inferior, fijas en un extremo. En el extremo contrario esta libre, y en él se coloca una masa que hace que aumente la deformación de las láminas piezoeléctricas, para ajustar esta masa se deberá tener en cuenta la frecuencia de trabajo que requiere la aplicación. Se han realizado multitud de estudios basados en esta configuración, demostrando su gran campo de aplicación [26].

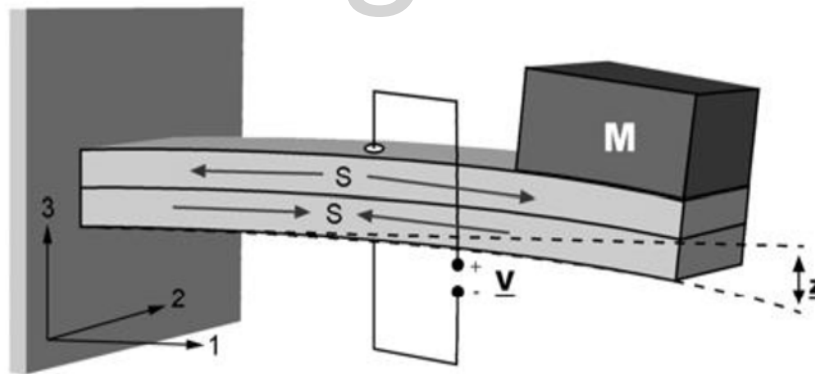


Figura 2.17. Estructura tipo Cantilever [26].

2.17.2 Tipo Címbalo (*Cymbal*)

Las configuraciones con estructura en forma de címbalo, pueden producir una gran deformación bajo una fuerza externa transversal, lo cual hace esta configuración adecuada para micro cosecha de energía. Como se muestra en la figura 2.18 consiste en dos patillos de metal o

cualquier otro material elástico, y una lámina de material piezoeléctrico que recibe la fuerza aplicada sobre los platillos metálicos [26].

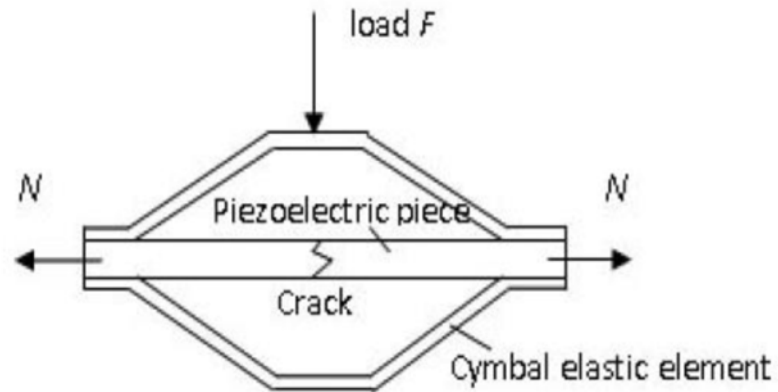


Figura 2.18. Estructura tipo Címbalo [26].

2.17.3 Tipo Pila (*Stack*)

La configuración tipo pila consiste en una pila de capas (laminas) de material piezoeléctrico (figura 2.19) [26].

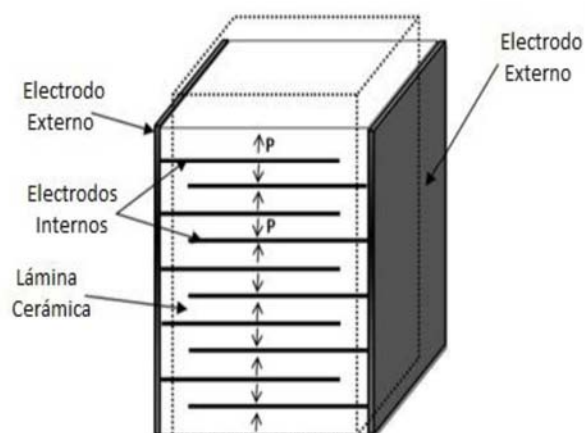


Figura 2.19. Estructura tipo pila [26].

Estas capas se colocan con polarización opuesta entre las capas adyacentes. Las capas son conectadas mecánicamente en serie y eléctricamente en paralelo. Cuanto mayor número de capas tenga la pila, aumenta su volumen y por tanto incrementa la energía que produce. Utiliza el modo 33 y tiene una gran capacidad debido al número de capas de material piezoeléctrico. Este tipo de configuración tipo pila tiene como desventaja que puede ser débil bajo golpes mecánicos [26].

2.17.4 Tipo Concha (*Shell*)

La configuración tipo concha, consiste en una lámina de piezoeléctrica curva (figura 2.20). Esta estructura en forma curvada, puede generar mayor tensión que una lámina plana, por lo que puede mejorar la eficiencia en el cosechamiento de energía por el efecto piezoeléctrico [26].

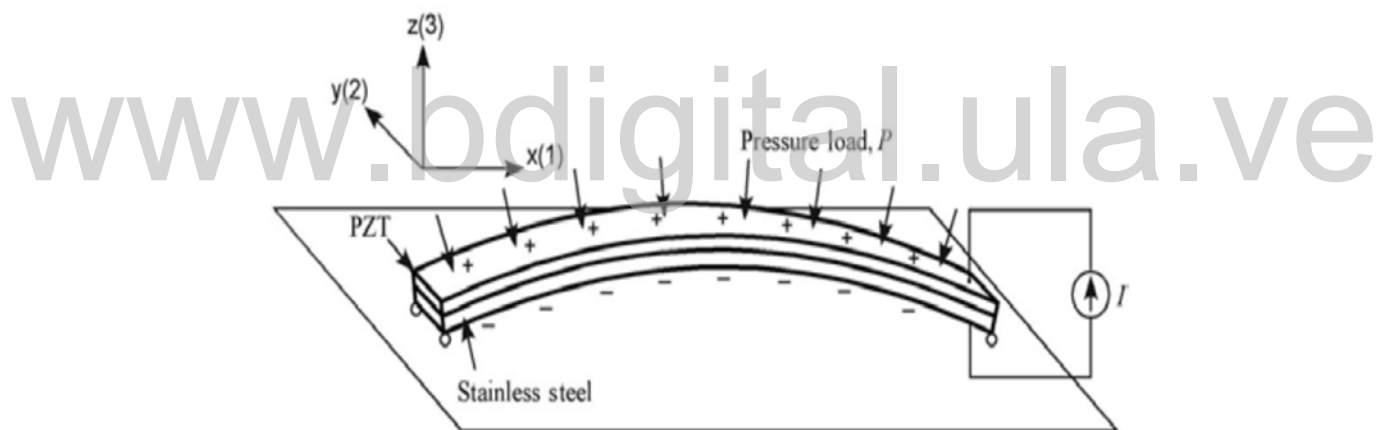


Figura 2.20. Estructura tipo concha [26].

Las cerámicas piezoeléctricas tienen multitud de aplicaciones en la actualidad, en todos los ámbitos de la tecnología. Se comentan en este apartado

2.18 Aplicaciones

Las grandes ramas (sensores, actuadores, transductores, acelerómetros, generadores) en que se puede dividir las aplicaciones de las cerámicas [26].

2.18.1 Sensores

Los sensores piezoeléctricos convierten una entrada física (aceleración, presión, etc.) en una señal eléctrica que sirve como entrada para un sistema de procesamiento de datos. Para estas aplicaciones de detección se utilizan las cerámicas blandas, con factores de acoplamiento electromecánico más grandes, constantes piezoeléctricas más grandes como se observó en el apartado 2.13 [26].

Los sensores piezoeléctricos típicos, generan una señal solo cuando experimentan un cambio en la presión aplicada. Bajo una entrada estática, sin cambios ni variaciones, las cargas libres se dirigen hacia los dipolos, descargando eléctricamente el piezoeléctrico. Si se aplica una nueva presión, la carga se restablecerá, pero si se mantiene dicha presión, se acabara descargando de nuevo [26].

Para medir señales de entrada de baja frecuencia (muy por debajo de la frecuencia de resonancia) se utilizan sistemas que se describen mediante la constante de tiempo (producto de la capacidad de la cerámica y la resistencia de entrada del circuito electrónico). Esta constante de tiempo debe ser 10 veces menor que el periodo de la señal de entrada [26].

Para medir estas señales y mantener la resistencia de entrada baja se puede: construir el sensor con múltiples capas en paralelo; incluir un amplificador de carga o condensador en el sistema, en paralelo con el sensor [26].

Los sensores a su vez, dependiendo de la aplicación se pueden dividir en activos y pasivos [9].

- **Activos:** Las cerámicas usadas en aplicaciones de detección activa, miden el tiempo de una respuesta (eco) de un pulso enviado contra una superficie o el tiempo entre un transmisor y receptor. Los transmisores trabajan en resonancia y los receptores en anti resonancia [26].

- Pasivos: Las cerámicas usadas en aplicaciones de detección pasiva, funcionan por debajo de su frecuencia de resonancia, lo que hace que reciba una señal en un amplio rango de frecuencias [26].

2.18.2 Actuadores

Un actuador piezoeléctrico, convierte una señal eléctrica en un desplazamiento físico preciso. Si ante esta señal eléctrica de entrada, se impide el desplazamiento, se obtendrá una fuerza de bloqueo utilizable según la aplicación [26].

Dado su diseño simple, se usa en infinidad de aplicaciones industriales, aplicaciones médicas, de aviación, aeroespaciales, etc. Dado que son silenciosos se usan también en lentes y autoenfoco de cámaras de video y teléfonos móviles [26].

Si se usa un actuador de tipo pila, se obtiene una resolución muy alta. Los actuadores piezoeléctricos pueden trabajar millones de veces sin desgaste ni deterioro. Tienen una gran velocidad de respuesta, solo limitada por la inercia del objeto a mover y la capacidad del controlador electrónico. Además no consumen casi energía y generan muy poco calor [26].

2.18.3 Transductores

Un transductor es cualquier dispositivo que sirve para convertir un tipo de energía en otro. Los transductores piezoeléctricos son un tipo de transductores electroacústicos que convierten la electricidad producida en la cerámica piezoeléctrica en otro tipo de energía [26].

Un tipo de transductor piezoeléctrico de gran utilidad es el transductor piezoeléctrico ultrasónico, el cual genera ondas sonoras por encima de las frecuencias audibles por el ser humano. Se usa en aplicaciones de limpieza y ofrece una alta eficiencia electroacústica [26].

Los transductores se usan en numerosas aplicaciones como: automóviles, hogar, industria, dispositivos electrónicos, guitarras, etc [26].

2.18.4 Acelerómetros

Un acelerómetro es un tipo de sensor que mide la fuerza debida a la aceleración del sensor. El funcionamiento básico de un acelerómetro es una masa suspendida y restringida por un transductor calibrado para detectar fuerza. El transductor mide la fuerza ejercida sobre la masa debida a la aceleración [26].

Si se desea medir la aceleración en diferentes direcciones, hay que integrar múltiples masas y transductores en una única unidad compacta para tener un acelerómetro de varios ejes [9].

Los acelerómetros a su vez pueden incorporar un circuito de acondicionamiento de señal integrado. Este circuito convierte y acondiciona la señal de voltaje del sensor para ser procesada más fácilmente por la instrumentación [26].

Se usan en diferentes aplicaciones como pueden ser: automoción, seguridad, drones, control de estabilidad en vehículos, sensores sísmicos, aviación, etc [26].

2.18.5 Generadores

Un generador piezoeléctrico es una cerámica piezoeléctrica que convierte energía mecánica en eléctrica. A diferencia de un sensor u otro tipo de dispositivo piezoeléctrico capaz de convertir energía mecánica en eléctrica, los generadores buscan convertir la máxima cantidad de energía [26].

Para tener una conversión eficiente, es necesario un diseño adecuado. La configuración elegida para el generador tiene una gran importancia, así como el tipo de material piezoeléctrico. La fuerza a la que se va a ver sometida la cerámica, así como la impedancia de carga también debe tenerse en cuenta [26].

Los generadores piezoeléctricos pueden ser de una sola capa o multicapa. La principal diferencia entre ellos es el voltaje generado. Los generadores multicapa generan menos voltaje y una corriente significativamente mayor que los generadores de una sola capa [26].

Los transductores piezoeléctricos, clásicamente se han utilizado como pequeños sensores o como actuadores, pero cuando el uso de los mismos pasa a ser como generador, el uso de un solo piezoeléctrico no será suficiente para alimentar una carga de suficiente intensidad. Es por ello que en siguiente apartado se explica con mayor detalle los tipos de conexión.

2.19 TIPOS DE CONEXIÓN (SERIE – PARALELO)

Prácticamente en todas las aplicaciones de cosecha de energía que existen en la actualidad es necesario el uso de varios transductores [36].

Por ello se hace de vital importancia la forma de conexión que se utilice entre los mismos, ya que esto determinará la forma que tendrá la energía eléctrica generada en estos transductores. Además, no solo es importante la conexión desde el punto de vista eléctrico, sino que es importante la disposición de los piezoeléctricos para maximizar la energía captada [36].

Una de las formas de aumentar la densidad de transductores para optimizar la energía obtenida por metro cuadrado, consiste en apilar varios transductores en lo que se denomina un stack, que es una pila de transductores colocados uno sobre otro ya sean estos en serie o en paralelo, llegando estos stacks de ser hasta 145 capas[41].

Al igual que en el caso de colocar varios transductores al mismo nivel conectados ya sea en serie o en paralelo lo mismo se puede hacer para el caso de los stacks. Básicamente en función de las propiedades que se desean del transductor final, se configuran de una u otra forma. En la siguiente figura se muestra gráficamente como se colocan en serie o en paralelo en función de su polaridad [36].

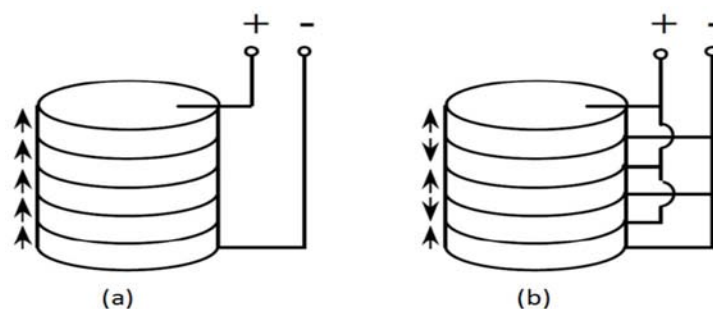


Figura 2.21. Stack de piezoeléctricos, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo [42].

Como se observa en el caso de los piezoeléctricos conectados en serie, se apilan con la misma polaridad uno sobre otro, y en caso de conectarse en paralelo, se contraponen las polaridades, generando por tanto nodos positivos y negativos [36].

Lo cierto es que el tipo de conexión, no afecta a la potencia máxima entregada, pero si a las condiciones en las que se entrega esa potencia. Lo cierto es que su comportamiento es exactamente igual que el de cualquier otra fuente, como podría ser una pila. Eso quiere decir que, si se conectan dos transductores en serie, la resultante será obtener el doble de caída de tensión que con uno solo [36].

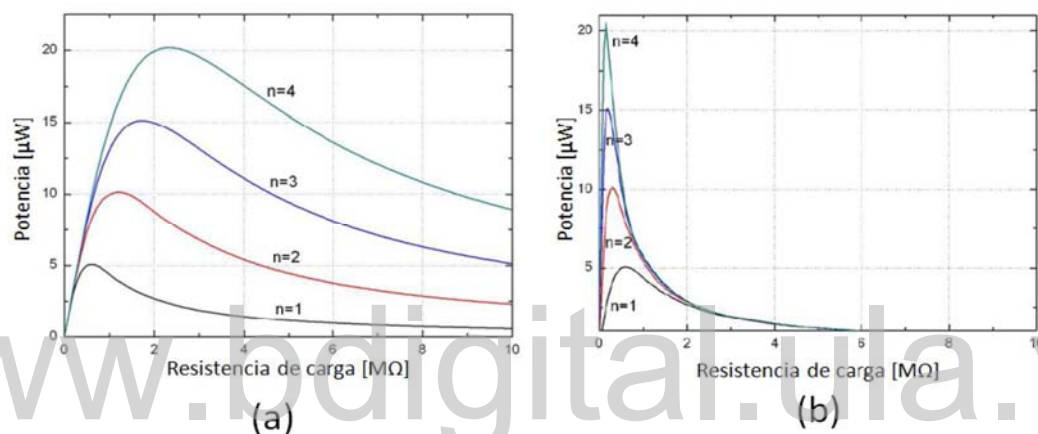


Figura 2.22. Potencia entregada por stack de PZTs, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo [42].

Como se puede observar en la figura, la potencia entregada máxima depende únicamente del número de transductores. No obstante, la resistencia equivalente para la máxima potencia si varía considerablemente. Esto se debe a que la potencia entregada es igual a la tensión multiplicada por la corriente, y según la conexión, igual que en cualquier otro circuito eléctrico lo que se suman son las tensiones en caso de conexiones en serie o las intensidades pares las que se hacen en paralelo.

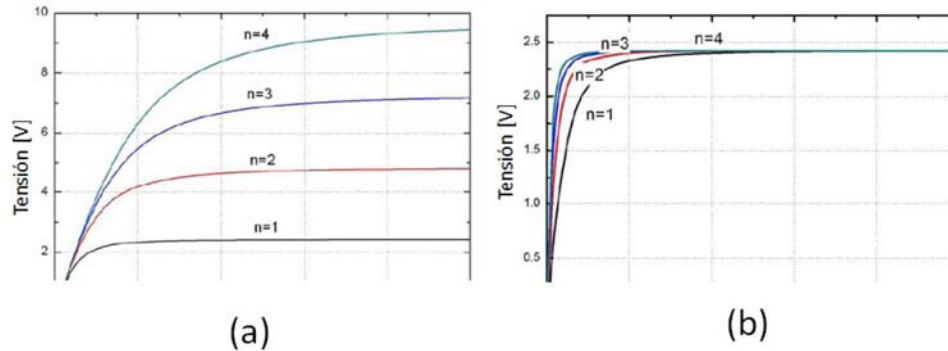


Figura 2.23. Medidas de tensión en circuito abierto, (a) conexión en serie, (b) conexión en paralelo [42].

Como se puede observar en la figura, la tensión de salida medida en los piezoeléctricos dependerá del tipo de conexión. En el ejemplo de la figura, para la excitación aplicada un único piezoeléctrica entrega una tensión algo inferior a 2,5 V, lo que en serie se traduce a la suma de esas tensiones, y en paralelo se traduce al aumento de la intensidad entregada [36].

2.20 Piezoeléctricos generadores de electricidad

Un generador piezoeléctrico es un tipo de transductor piezoeléctrico que genera energía eléctrica a partir de energía mecánica, la cual en nuestro caso procede de las vibraciones a las que se ve sometido el elemento piezoeléctrico [26].

Para aprovechar esta energía en forma de vibraciones, primero hay que captar la energía en forma de vibraciones mediante el elemento piezoeléctrico, en segundo lugar transformar esta energía en forma de corriente alterna en corriente continua, y finalmente adaptar esta corriente continua para su almacenamiento en una batería [26].

A la hora de diseñar el sistema de cosecha de energía hay que tener en cuenta el tipo de entrada mecánica que se va a tratar, se explicara de manera detallada en el siguiente apartado

2.21 DISEÑO DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

Se tienen dos tipos diferentes de fuerzas mecánicas [12]:

- Fuerza cuasi-estática: La fuerza cuasi-estática, produce una tensión de salida cuando se aplica una presión a la cerámica PZT y otro pico de tensión opuesto cuando se deja de aplicar presión. Esta fuerza no es periódica, o tiene un periodo menor que la constante de carga del condensador que simula el comportamiento de la cerámica piezoeléctrica.
- Fuerza dinámica: El tiempo de duración de la presión aplicada en este tipo de fuerza es menor que la constante de tiempo de carga del condensador, con lo cual el condensador no se carga con cada pulso. A su vez, al dejar de ejercer presión, no se produce un pico de tensión opuesto, puesto que no se descarga el condensador. Este tipo de fuerza genera más voltaje que la fuerza cuasi-estática.

Una vez elegida la ubicación de nuestro sistema, habrá que calcular la masa a colocar en el extremo de nuestro piezoeléctrico en configuración cantiléver para aumentar la fuerza, y por tanto la presión ejercida sobre la cerámica. Para ello hay que ver a qué frecuencia va a trabajar nuestro piezoeléctrico (f_0), e intentar que nuestra cerámica tenga la misma frecuencia de resonancia (f_r). Esta masa se calcula con la expresión (2.29) que corresponde con la expresión de la pulsación natural de un sistema masa-resorte [26].

$$w_0 = \sqrt{\frac{K_S}{m}} \quad (2.29)$$

Donde:

$$K_S = \frac{Y \cdot A}{h} \quad (2.30)$$

En segundo lugar, se debe calcular la tensión al que se ve sometido el material piezoeléctrico, para así transformar la energía mecánica en energía eléctrica para lo cual utiliza la siguiente expresión [26]:

$$\sigma = FA \quad (2.31)$$

Donde:

$$F = m \cdot a \quad (2.32)$$

Al ser un diseño en forma de viga en voladizo, la fuerza ejercida sobre el material piezoeléctrico aumentara o disminuirá según las vibraciones a la que se vea sometido el sistema [26].

A partir de la tensión ejercida sobre el material piezoeléctrico, se puede calcular el campo eléctrico generado por el efecto piezoeléctrico directo y el voltaje de salida [26]:

$$E = g_{33} \cdot \sigma \quad (2.33)$$

$$V_{piezo} = E \cdot h \quad (2.34)$$

Esta tensión V_{piezo} obtenida a partir de la ecuación (2.29) será la tensión de salida de la cerámica piezoeléctrica. Esta tensión, para convertirla a tensión en continua, pasara por un rectificador de onda completa y nos dará la tensión final que se utilizara para cargar nuestra batería [26].

También se puede calcular la energía generada tanto mecánica como eléctrica en el material piezoeléctrico a partir de las ecuaciones (2.35) y (2.36) [26].

$$E_{mec} = \frac{1}{2} S_{33}^D \frac{F^2 \cdot h \cdot n}{A} \quad (35)$$

Donde n es el número de capas de cerámica piezoeléctrica y S_{33}^D es el inverso del módulo de Young (Y) [26].

$$E_{elec} = k_{33}E_{mec} \quad (2.36)$$

Donde:

k_{33} :es el coeficiente de acoplamiento adimensional.

La energía de deformación del material, vendrá dada por la ecuación (2.37). La energía total del generador piezoeléctrico será la suma de la energía de deformación y la energía eléctrica del piezoeléctrico (2.38) [26].

$$E_{def} = \frac{1}{2} k_{33}^4 S_{33}^E \frac{F^2 \cdot h \cdot n}{A} \quad (2.37)$$

$$E_{total} = E_{elec} + E_{def} \quad (2.38)$$

La carga generada se puede calcular a partir de la energía total del sistema y de la capacidad interna del generador piezoeléctrico y vendrá dada por la ecuación (2.39) [26].

$$Q = \sqrt{2E_{total}C_0} \quad (2.39)$$

Donde la capacidad de la cerámica piezoeléctrica se calculara con la siguiente expresión [26]:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{h} \quad (2.40)$$

El voltaje que entrega la fuente, es directamente proporcional a la tensión aplicada sobre el piezoeléctrico y depende tanto del tipo de material como de la geometría y fuerza

aplicada. En el caso de un piezoeléctrico de disco, con un diámetro al menos 5 veces mayor que su espesor, compuesto por PZT, y en régimen de baja frecuencia su valor viene determinado por la siguiente ecuación [36]:

$$V = \frac{4 t g_{33} F}{\pi d^2} \quad (2.41)$$

Donde:

V: es la diferencia de potencial.

t :es el espesor de la cerámica piezoeléctrica.

d :su diámetro.

g_{33} : la constante piezoeléctrica.

F: la fuerza aplicada sobre el transductor.

Por otro lado la capacitancia del mismo viene determinada por la ecuación 2.42 [36]:

$$C = \frac{4 k_3^T \epsilon_0 d^2}{\pi t} \quad (2.42)$$

Donde:

ϵ_0 es la permitividad del vacío y k_3^T la constante dieléctrica relativa.

Una vez descritos los diversos tipos de entradas mecánicas, nos ayudara a entender de manera más clara las etapas que un de un sistema de cosecha de energía.

2.22 CIRCUITO ACONDICIONADOR DE UN GENERADOR PIEZOELÉCTRICO

El circuito acondicionador de un sistema de cosecha de energía consta de 4 partes (figura 2.24). En primer lugar, la fuente de energía, en nuestro caso la cerámica piezoeléctrica. En segundo lugar, un rectificador de onda completa compuesto por diodos, para convertir la señal alterna en continua y un condensador de filtrado. En tercer lugar, un convertidor de DC/DC que acondicione la señal de continua obtenida del rectificador a la requerida por la carga. En último lugar la batería que o el elemento que se pretende cargar [26]:



Figura 2.24. Etapas sistema cosecha de energía [9].

2.22.1 Rectificador de Onda completa

El rectificador servirá para convertir nuestra señal alterna de voltaje procedente del material piezoeléctrico a corriente continua para cargar nuestra batería. En nuestro caso este rectificador será de onda completa, no controlado. Se usará un puente de diodos [26].

El rectificador de onda completa, consiste en dos grupos de diodos, en los cuales, la corriente circulará por el diodo que tenga mayor tensión ánodo cátodo en cada grupo. Como se puede apreciar en la figura 2.25 cuando la tensión de entrada es positiva, conducen los diodos D1 y D2, obteniendo una tensión de salida igual a la de entrada siempre que los diodos sean ideales. Cuando la tensión de entrada es negativa conducen los diodos D3 y D4, con lo que se obtiene a la salida la misma tensión de entrada, pero invertida [26].

En la figura 2.26 se observa gráficamente el resultado de rectificar una señal de onda sinusoidal. Se aprecia que la parte negativa de la señal sinusoidal pasa a ser positiva, obteniendo así un valor medio de señal mayor que en el caso de un rectificador de media onda, en el que la parte negativa pasa a ser 0 [26].

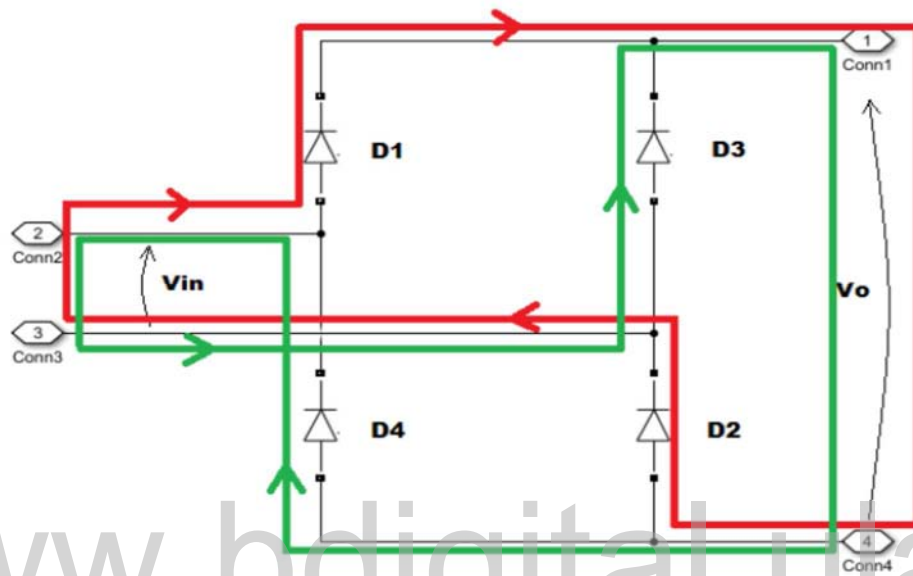


Figura 2.25. Rectificador. Rojo V_{in} positiva. Verde V_{in} negativa [9].

Uno de los grandes inconvenientes de los rectificadores es su alto contenido armónico. En la práctica los rectificadores se suelen conectar a las cargas mediante condensadores, con dos objetivos. El primero es filtrar la forma de onda de la señal de salida del rectificador para que esta sea continua. En segundo lugar, aislamiento entre la fuente y la carga [26].

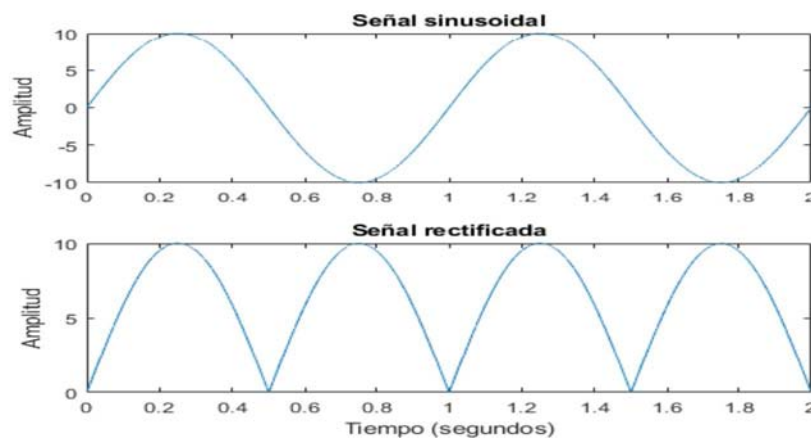


Figura 2.26. Señal rectificada onda completa [26].

2.22.2 Convertidor DC/DC

Los convertidores DC/DC se utilizan comúnmente en fuentes de alimentación como última etapa antes de la carga. El rectificador junto con el condensador de filtrado proporciona una tensión de salida que, aun estando rectificadas, es necesario adaptar para cumplir los criterios de calidad de la carga. Estos criterios de calidad son el nivel de rizado y la regulación (tensión, impedancia salida). El bloque DC/DC a su vez puede incluir, si es necesario un lazo de realimentación para su control [26].

Los convertidores DC/DC conmutados, se pueden clasificar en 4 categorías [26]:

- Convertidor reductor
- Convertidor elevador
- Convertidor reductor-elevador
- Convertidor en puente completo

Las especificaciones que habrá que tener en cuenta a la hora de elegir un diseño para una fuente de alimentación serán [26]:

- Rango de tensión de entrada.
- Tensión de salida (margen de regulación).
- Potencias de salida.
- Rizado en la tensión de salida.

Puesto que el convertidor a utilizar dependerá de que la tensión a su salida sea mayor o menor que a la entrada (tensión de salida del rectificador), los dos posibles convertidores a utilizar serán [26]:

➤ Convertidor reductor

El convertidor reductor produce a su salida una tensión inferior o igual a la de entrada. En la figura 2.27 se logra apreciar su topología [26].

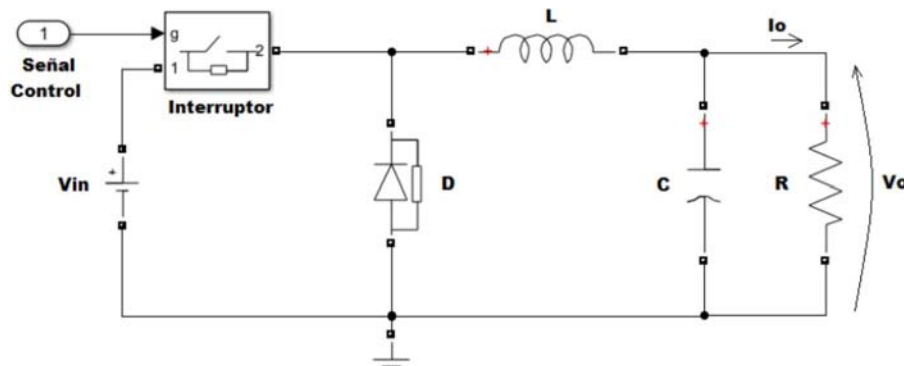


Figura 2.27. Convertidor Reductor [26].

La tensión de salida viene dada por la siguiente expresión [26]:

$$V_0 = D V_{in} \quad (2.43)$$

➤ Convertidor elevador

El convertidor elevador produce a su salida una tensión mayor o igual a la de entrada. En la figura 2.28 se puede ver su topología [26].

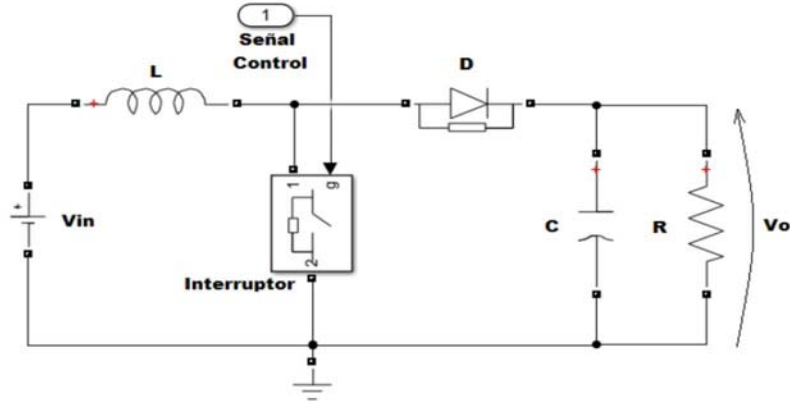


Figura 2.28. Convertidor Elevador [9].

La tensión de salida viene dada por la siguiente expresión [9]:

$$V_0 = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (2.44)$$

La señal de control de los convertidores, será una señal PWM cuyo ciclo de trabajo se calculará dependiendo del nivel de tensión deseado a la salida. En ambos convertidores, la señal de salida depende del valor del ciclo de trabajo de la señal de control (D). Esta señal de control se utiliza para abrir o cerrar el interruptor (transistor). Ante entradas de tensión variables en el tiempo, el ciclo de trabajo se puede ajustar mediante realimentación de la salida [26].

El filtro paso bajo utilizado en ambas configuraciones sirve para eliminar los armónicos no deseados de la tensión de salida. Los valores para L y C se darán según la frecuencia de resonancia del filtro [26]:

$$f_{pb} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} V_{in} \quad (2.45)$$

2.23 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA COSECHADA

La mejora de la eficiencia del sistema eléctrico a través del aplanamiento de la curva de demanda y la integración de las energías renovables son dos aplicaciones esenciales del almacenamiento de energía [43].

Por ello, fomentar el aumento de la capacidad de almacenamiento energético, como herramienta al servicio de la operación del sistema, principalmente el bombeo, aunque sin olvidar otras futuras tecnologías, posibilitará una mayor integración de energías renovables, evitando vertidos indeseados de energía limpia, y al mismo tiempo aportará más seguridad al sistema eléctrico [43].

2.23.1 Tecnologías de almacenamiento de energía

La energía eléctrica puede ser generada, transportada y transformada con facilidad, sin embargo resulta complicado almacenarla en grandes cantidades. Pero, aun siendo complicado, existen diversos métodos de almacenamiento de energía a lo largo de la cadena de suministro [43]:

- **A gran escala (GW):** hidroeléctrica reversible (bombeo), almacenamiento térmico.
- **Almacenamiento en redes (MW):** pilas y baterías; condensadores y superconductores; volantes de inercia.
- **A nivel de usuario final (kW):** baterías, superconductores, volantes de inercia.

2.24 INSTITUTO AUTÓNOMO HOSPITAL UNIVERSITARIO DE LOS ANDES (IAHULA), MÉRIDA

El Hospital Universitario de los Andes, ahora llamado IAHULA, fue culminado y abierto al público a comienzos del año 1973, habiendo cumplido una serie de requisitos tanto sanitarios, administrativos y eléctricos; constituyendo para el país una de las instituciones más modernas y complejas con las que contaba el Ministerio Público para dicha fecha. Se ubica en la parte sur oeste de la ciudad de Mérida, específicamente en la Av. 16 de Septiembre, y considerado ente vital para las regiones Mérida Táchira, Trujillo y Barinas ya que fue creado como Hospital

Regional y Distrital para el Distrito Sanitario Mérida, Hospital Sub Regional para todo el estado Mérida y centro de referencia de los centros de salud de Tovar, el Vigía y Medicaturas Rurales; así como Hospital Regional para los estados Mérida, Táchira, Trujillo y Distrito Páez del Estado Apure [44].

Debido a la complejidad de su estructura arquitectónica, se ha dividido en tres sectores, una torre central en forma cilíndrica con 13 pisos denominada Sector B y otros dos Sectores denominados A y C con 5 y 4 pisos respectivamente, tal y como se muestra en la Figura 30 [44].

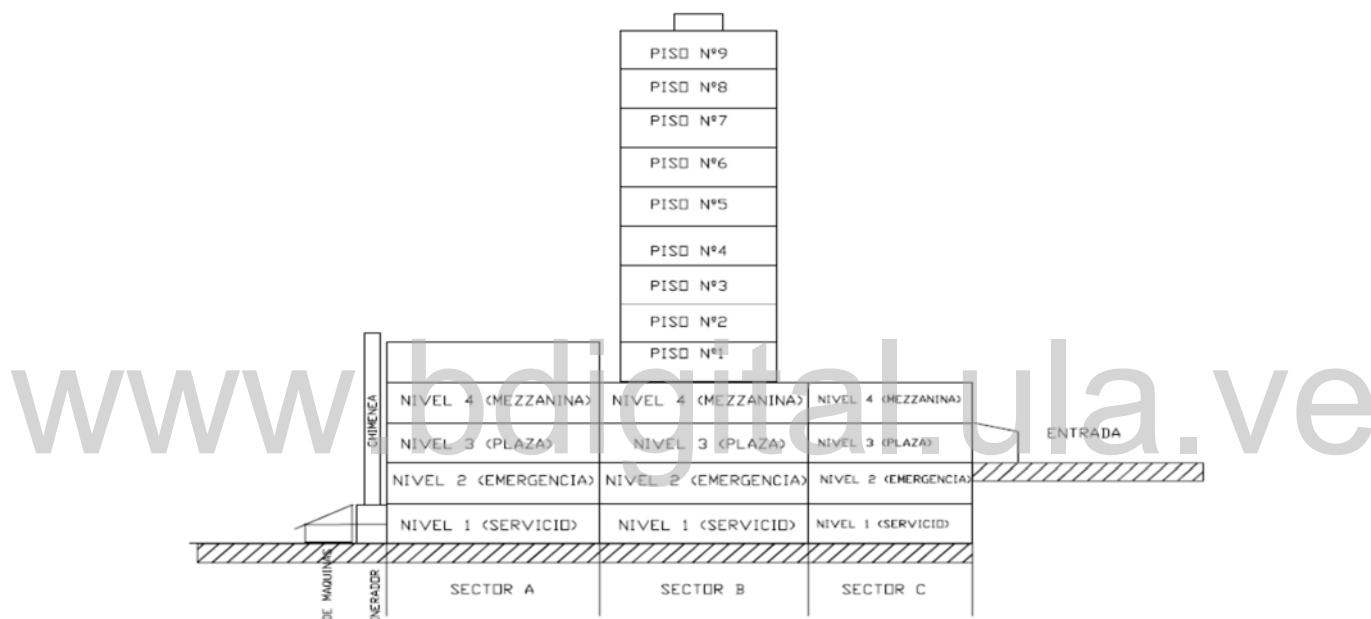


Figura 2.29. Corte Vertical del plano del IAHULA [44].

Las zonas de interés eléctrico de esta estructura se encuentran, según el sector, de la siguiente manera: en el sector A, se encuentran la oficina de mantenimiento, ubicada en el nivel Servicios, la cual tiene como responsabilidad mantener en perfecto estado la capacidad operativa del hospital. En el sector B, se encuentra la subestación, ubicada en el nivel servicios, en donde siempre debe existir como mínimo un técnico electricista encargado de supervisar y actuar en caso de una falla [44].

Comprender las necesidades energéticas de las instalaciones y las maneras en que se usa esa energía es el primer paso para elaborar un plan de administración de energía. El manejo eficaz

permitirá que la energía disponible en el centro tenga una duración mayor y, de esa manera, se ahorrará energía y costos.

2.24.1 Demanda Eléctrica

Se entiende por demanda eléctrica la cantidad de electricidad que una serie de consumidores necesitan para abastecer sus necesidades. Por tanto, la demanda eléctrica nacional es el resultado de la suma de toda la electricidad necesaria para dar suministro a todos los consumidores del territorio nacional: industrias, empresas, oficinas, comercios, hogares, centros públicos, alumbrado [45].

➤ Métodos de estimación de la carga de cálculo

Todos los métodos de estimación de la carga tienen por objetivo hallar la potencia de cálculo para el sistema tratado y esta sería la potencia óptima de trabajo para la instalación, en la cual los parámetros técnico-económicos son más favorables al sistema y permite que sus receptores trabajen de la forma más eficiente. Seguidamente se muestra algunos métodos, para la determinación de la potencia de cálculo, empleados en la proyección de sistemas eléctricos de baja tensión [45].

➤ Estimación de la potencia de cálculo usando la potencia nominal

En este método se asume la potencia de cálculo igual a la potencia nominal del receptor [45]:

$$\begin{aligned} P_C &= P_n \\ Q_C &= Q_n \end{aligned} \tag{2.46}$$

Debe tenerse en consideración que en el caso de los motores eléctricos la potencia demandada de la red se puede determinar a partir de la potencia de pasaporte, conociendo la eficiencia del motor. Sin hacer un análisis profundo, es evidente que la mayor ventaja de este método de cálculo es la sencillez y rapidez en la obtención de los resultados. A su vez, resulta claro que un sistema calculado de esta forma será sobredimensionado, ya que todos los receptores no trabajarán con su carga nominal, ni al mismo tiempo, por lo que se obtendrá un sistema poco eficiente y mucho más costoso [45].

➤ **Estimación de la potencia de cálculo usando la potencia nominal y el coeficiente de carga**

Este método consiste en multiplicar las potencias nominales que forman el sistema por un factor de carga que varía según el tipo de receptor [45].

Para motores:

www.bdigital.ula.ve

$$P_{CM} = K_C P_{Mayor} + \Sigma P_n \quad (2.47)$$

$$K_C = 1,25$$

Donde:

P_{Mayor} : Potencia nominal del motor mayor (kW).

ΣP_n : Suma de todas las potencias nominales del resto de los motores (kW).

P_{CM} : Potencia de cálculo para motores (kW).

Para alumbrado de descarga se tiene:

$$P_{CA} = K_C P_D + P_I \quad (2.48)$$

$$K_C = 1,8$$

Donde:

P_D : Potencia nominal de alumbrado de descarga.

P_I : Potencia nominal de alumbrado incandescente.

P_{CA} : Potencia de cálculo para alumbrado.

La potencia de cálculo de la instalación será [45].

$$PC = P_{CM} + P_{CA} \quad (2.49)$$

La aplicación de este método es rápida y sencilla, pero la sobreestimación de la potencia de cálculo, tanto para motores como para alumbrado de descarga es su mayor desventaja. Este método ha sido tradicionalmente utilizado con fines comerciales ya que los resultados que aporta inciden en un mayor costo de los elementos del sistema, a la vez que incrementan la seguridad de operación [45].

Este método ha sido tradicionalmente utilizado con fines comerciales ya que los resultados que aporta inciden en un mayor costo de los elementos del sistema, a la vez que incrementan la seguridad de operación [45].

➤ **Estimación de la potencia de cálculo usando la potencia nominal y el coeficiente de demanda**

El factor de demanda es la relación entre la potencia de cálculo y la potencia nominal conectada al sistema o parte del sistema considerado, y depende del régimen de trabajo de los receptores y del número de estos [45].

$$P_C = K_d a P_N \quad (2.50)$$

Donde:

K_{da} : Coeficiente de demanda de potencia activa.

Normalmente los coeficientes de demanda se determinan a partir de la experiencia en la explotación de receptores y grupo de receptores de un determinado sistema y se encuentran tabulados en los manuales especializados. Este coeficiente depende del tipo de industria o centro de servicio, tecnología de producción, grado de automatización, modo de explotación, etcétera [45].

Es evidente la sencillez del método, lo que hace que su aplicación resulte rápida. Las ecuaciones son simples operaciones de suma y multiplicación, lo que representa un gran ahorro de tiempo en cálculos y una mayor productividad de los proyectistas. La mayor desventaja es la estimación por parte del especialista de valores de este factor cuando no aparece tabulado, que en el caso más común se traduce en sobredimensionamiento excesivo de capacidad en transformadores, canalizaciones, alimentadores y protecciones. Este método es el más usado actualmente para la estimación de la demanda en receptores individuales, por parte de las empresas de proyecto [45].

➤ **Estimación de la potencia de cálculo usando la potencia nominal, el coeficiente de demanda y el de diversidad**

Este método consiste en aplicar a un sistema, además del coeficiente de demanda (K_{da}), un factor llamado de diversidad (K_{div}), que toma en cuenta la posibilidad de ocurrencia, al mismo tiempo, de las cargas de cálculo en los diferentes nodos que forman el sistema de suministro [45].

Donde:

K_{div} : Factor de diversidad. Aplicando el factor de demanda y de diversidad se obtiene la potencia de cálculo para un nodo:

$$PC = \frac{Kda Pn}{Kdiv} \quad (2.51)$$

Este método utiliza coeficientes determinados como resultado del trabajo de experimentación de gráficos de carga del sistema de suministro en explotación. Resulta sencillo y rápido, posee la gran ventaja que hace un análisis del desplazamiento de la carga de cálculo en el tiempo, pero su exactitud depende de la validez de los factores que se apliquen [45].

➤ **Estimación de la potencia de cálculo usando la potencia media y el coeficiente de forma Kf**

El coeficiente de forma del gráfico individual o de grupo de cargas, es la relación de corriente medio cuadrática (o potencia) del receptor o grupo de estos durante determinado período, a su valor medio durante igual período de tiempo [45].

La potencia de cálculo para un grupo de receptores es [45]:

$$P_C = Kfa PmM \quad (2.52)$$

Donde:

Kfa: Coeficiente de forma de potencia activa para el grupo.

PmM: Potencia activa media del grupo más cargado.

Este método se recomienda para determinar la carga de cálculo en las barras de baja tensión de las subestaciones transformadoras, en la que los gráficos de carga son uniformes, estando Kfa entre 1,0-1,2. Normalmente el coeficiente de forma es estable si la productividad de la empresa es bastante constante. Para las empresas que trabajan arrítmicamente el coeficiente de forma se debe determinar durante los días típicos [45].

- **Estimación de la potencia de cálculo usando la potencia media, el coeficiente de máximo K_m y el de no coincidencia de máximo K_{nc}**

La carga de cálculo estará definida para circuitos balanceados y desbalanceados por la ecuación [45]:

$$P_c = K_{ma} P_{3\phi_{mc}} K_{nca} \quad (2.53)$$

Donde:

K_{ma} : Coeficiente de máximo de activa.

$P_{3\phi_{mc}}$: Potencia trifásica media convencional.

K_{nca} : Coeficiente de no coincidencia de máximos de activa.

Este método tiene como principal desventaja lo dificultoso de su aplicación, pero sin duda es un procedimiento muy bien elaborado, que toma en cuenta el tipo de sistema, el régimen de trabajo de sus receptores, los desplazamientos de las cargas en el tiempo y la cantidad de receptores que lo forman. Ha sido empleado con buenos resultados en la estimación de la demanda en nodos tanto de entidades productivas como de servicios, por parte de empresas de proyecto [45].

- **Estimación de la potencia de cálculo usando el coeficiente de llenado K_{ll}**

El coeficiente de llenado del gráfico de cargas de potencia activa (K_{lla}) es la relación de la potencia activa media a la potencia máxima, durante un período de tiempo [45]:

$$Klla = \frac{PM}{Pm} \quad (2.54)$$

El período de tiempo se considera igual a la duración del turno más cargado. Asumiendo que la potencia máxima PM es igual a la potencia de cálculo PC , el coeficiente de llenado del gráfico (Kll) es la magnitud inversa del coeficiente de máximo [45].

$$Klla = \frac{Pm}{Pc} = \frac{1}{Kma} \quad (2.55)$$

Donde:

Klla: Coeficiente de llenado de potencia activa.

Kma : Coeficiente de máximo de potencia activa.

Pm : Potencia media activa.

El coeficiente de llenado generalmente se refiere a los gráficos de cargas de grupo, igual que el coeficiente de máximo. Expresiones similares pueden ser determinadas para los coeficientes de llenado de los gráficos de cargas de potencia reactiva y de corriente [45].

➤ Estimación de la potencia de cálculo por el método estadístico

Por este método, la carga de cálculo de un grupo de receptores se determina por dos índices principales: La potencia media (PT) y la desviación medio cuadrática (σT),1 usando la ecuación:

$$PCT = PT \pm \beta \quad (2.56)$$

Donde:

β : Multiplicidad de la medida de dispersión.

Las características fundamentales del método estadístico de determinación de las cargas de cálculo muestran que la metodología estadístico-probabilística es capaz de resolver, aceptablemente, el conjunto de problemas del cálculo de las cargas eléctricas, pero su profundo peso matemático lo hace ser poco usado por los especialistas. Este método fue utilizado con éxito en la antigua URSS [45].

➤ **Estimación de la potencia de cálculo por el método de los dos miembros.**

En un inicio este método fue aplicado para encontrar la potencia de cálculo en naves de producción y talleres dedicados a la elaboración de metales, pero más tarde se empezó su aplicación para otros tipos de grupos de receptores eléctricos que tienen igual régimen de trabajo. La ecuación fundamental a la que están sujetos un grupo de receptores eléctricos de igual régimen de trabajo es [45]:

$$PC = c P_m + b P_n \quad (2.57)$$

Donde:

P_m : Carga instalada de varios receptores m de un grupo característico. El subíndice m indica el número de receptores mayores que deben tenerse en cuenta en los cálculos.

P_n : Carga instalada de todos los receptores n de un grupo característico.

c y b : Coeficientes que dependen del régimen de trabajo. La dificultad del método precisamente radica en la necesidad del conocimiento de los factores del régimen de trabajo

La evaluación de las necesidades energéticas requiere de estos aspectos [46]:

- Determinar su carga energética actual o el consumo de los artefactos o dispositivos, y también del centro en general.
- Priorizar las cargas de energía, que incluye la identificación de aquellas que sean “fundamentales” para el funcionamiento del centro de salud.

CAPÍTULO III

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico de esta investigación, se ejecutará en cuatro etapas interrelacionadas entre sí, las cuales serán descritas de manera independiente con la intención de comprender como se llevó a cabo el desarrollo de este documento.

3.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación que se implementara para la elaboración de esta investigación, como ya se ha mencionado consiste en cuatro etapas, las cuales se describen a continuación:

Recopilación de información

Es muy importante definir el enfoque metodológico empírico analítico, donde partiendo de las experiencias halladas a nivel mundial se realizó la formulación y planteamiento del problema, buscando determinar un resultado preliminar sobre la viabilidad de la instalación del sistema de baldosas piezoeléctricas. Como también, la investigación de la bibliográfica basada en fuentes de información secundarias, debido a que las fuentes documentales que se usaron como información base corresponden en su mayoría a artículos científicos realizados a partir de otras investigaciones con mayor profundización y amplitud en su aplicación.

Etapa 1: Evaluación de las áreas prioritarias del hospital

En primer lugar, se lleva a cabo una investigación documental para conocer las condiciones en las que se encuentran las áreas de los diversos servicios del hospital, de igual forma, se hará una inspección y sondeo de la institución, con el objetivo de seleccionar el servicio de mayor prioridad para nuestra investigación.

Etapa 2: Determinación de potencia eléctrica

- **Cálculo de potencia:** se realiza el cálculo de potencia eléctrica de cada uno de los equipos o artefactos en las áreas de mayor prioridad.

Etapa 3: Evaluación de fabricantes de baldosas

- **Evaluación de alternativas:** se evalúa los diferentes proveedores de baldosas piezoeléctricas, teniendo como base la potencia a generar, calculada en la etapa anterior.

Tales como: Eco-baldosas PAVEGEN, Baldosa V3, Baldosa Piezo Power y Baldosa PowerLeap

Etapa 4: Diseño del conjunto formado por las baldosas piezoeléctricas y Determinación del banco de baterías

- **Generación de los planos de detalle:** una vez esté concluido el diseño conceptual, se debe realizar el diseño en detalle del sistema, con el fin de optimizar la solución para que sea lo más eficiente posible. Dentro de esta actividad es importante elaborar modelo en **AutoCAD®**.
- **Cálculo del banco de baterías:** en esta etapa se calcula la capacidad necesaria del banco de baterías, así como también el tipo y modelo necesario para esta aplicación.

3.3 ETAPA 1: EVALUACIÓN DE LAS ÁREAS PRIORITARIAS DEL HOSPITAL

El IAHULA, es el principal centro de salud tipo IV del estado, el cual recibe pacientes de todos los municipios y en el que también se atienden casos procedentes de estados cercanos a Mérida. En 2018 la crisis en la prestación de los servicios de salud se profundiza. A la falta de medicamentos, material médico quirúrgico y alimentos, denunciada desde hace más de dos años, se suma la renuncia y migración del personal [47].

Otro factor que empeora la situación es el cierre técnico de varias áreas de los hospitales de El Vigía, San Cristóbal y Valera, que ha originado una sobredemanda de recursos en el IAHULA para atender a pacientes que vienen de Colón, Coloncito, La Fría y poblados de la zona Sur del Lago de Maracaibo. Uno de los servicios cuya demanda se ha incrementado notablemente es el de maternidad, en el que las incidencias de morbilidad y mortalidad neonatal y materna son crecientes [47].

Luego de que las actuales autoridades asumieran la gestión, hicieron un análisis minucioso para determinar las necesidades reales de recursos del IAHULA, no sólo considerando medicamentos, descartables y material quirúrgico, sino también las necesidades de mantenimiento de infraestructura y de equipos, que se descuidaron en los últimos años [47].

En este contexto, diversos servicios han dejado de prestarse: tomografía (cerrado desde hace nueve años), resonancia (cerrado desde hace seis años), radioterapia (cerrado hace tres años), quimioterapia (sin medicamentos e insumos desde hace dos años), hemodinamia (sin médicos y enfermeras). Los quirófanos electivos tampoco están operativos por falta de insumos y por medida de presión de los médicos residentes que exigen mejores condiciones salariales [47].

El deterioro del equipamiento médico ha paralizado, total o parcialmente, las actividades de dieciocho (18) programas asistenciales del IAHULA: 1. tomografía computarizada; 2. resonancia magnética; 3. hemodinamia; 4. electrofisiología cardíaca; 5. radioterapia; 6. braquiterapia; 7. medicina nuclear; 8. endoscopia gastro-intestinal; 9. cirugía ambulatoria; 10. radiodiagnóstico; 11. laboratorio de hormonas; 12. laboratorio de nefrología; 13. laboratorio

general; 14. laboratorio de microbiología; 15. anatomía patológica; 16. servicio de nutrición de la Unidad de larga estancia; 17. servicio de radiodiagnóstico de agudos y de la Unidad de larga estancia, y 18. programa de trasplante renal [48].

Desde el año 2009 el IAHULA no cuenta con equipo de resonancia magnética y ningún otro centro asistencial público del Estado Mérida dispone de dicho equipo [48].

Desde el año 2014 no funciona el equipo de tomografía. Sólo hay un tomógrafo, parcialmente operativo, en un centro asistencial público en el estado Mérida y no realizan estudios en niños ni estudios contrastados [48].

La falla de equipos y reactivos ha ocasionado el cierre casi total de los laboratorios del IAHULA. Los pacientes se ven obligados a realizarse exámenes en laboratorios privados lo cual supone gastos excesivos [48].

Falla de equipos básicos en el servicio de radiología genera a los pacientes tiempos de espera indebidamente prolongados. Sólo dos equipos están operativos y son insuficientes para la alta demanda [48].

Las cirugías cardiovasculares están paralizadas desde el año 2016 debido a que no se dispone de los equipos necesarios para ello [48].

El servicio de gastroenterología del IAHULA no realiza endoscopias de las vías digestivas superiores ya que no dispone de endoscopios [48].

Pacientes que requieren operaciones cerebrales se ven obligados a alquilar los equipos necesarios para operarse (neuroendoscopios, aspirador ultrasónico, craneostomo) ya que el hospital no dispone de los mismos. Si los costos del alquiler de los equipos no los puede cubrir el paciente, la operación no puede realizarse [48].

Desde el año 2013 el servicio de medicina nuclear está paralizado con lo cual el hospital perdió este importante recurso diagnóstico [48].

Desde el año 2015 el servicio de oncología no dispone de equipo de radioterapia debido a fallas de circulación de agua. Tampoco se ofrece quimioterapia [48].

Unidades de cuidados críticos carecen de ventiladores. Pacientes tienen que ser ventilados por sus propios familiares, durante horas, con bolsas de resucitación debido a la escasez de equipos y de personal asistencial [48].

Hay dos quirófanos inutilizados por falta de monitores lo que restringe la actividad quirúrgica e incrementa la deuda quirúrgica [48].

El servicio de oftalmología carece del equipo esencial para la esterilización del instrumental empleado en la cirugía oftalmológica [48].

La unidad de diálisis y trasplante carece del equipo requerido para la hemodiálisis, lo que ocasionará la suspensión de 400 sesiones mensuales de hemodiálisis con riesgo vital para esos pacientes [48].

El servicio de fórmulas lácteas para niños menores de 1 año está paralizado por falta de fórmulas [48].

La Unidad de cuidados intensivos funciona al 60% de su capacidad. El 70% de los quirófanos no están funcionando por problemas de infraestructura, equipos o personal [48].

Desde el año 2013 al 2018 el número de pacientes atendidos en el IAHULA ha disminuido en un 53%; las cirugías ambulatorias se redujeron a cero y las pruebas de laboratorio se redujeron en más de un 91% [48].

3.4 ETAPA 2: DETERMINACIÓN DE POTENCIA ELÉCTRICA

3.4.1 Determinación de la carga de energía

Para administrar el uso de energía, será necesario establecer la cantidad de energía consumida por los artefactos y dispositivos de sus instalaciones; a menudo, eso se denomina carga de energía. El diseñador del sistema de energía original deberá proporcionarle esta información. Si no fuera posible, debe implementar las siguientes actividades para calcular la carga de energía [46].

- Se confecciona una lista de todos los artefactos y dispositivos que usan energía en su centro de salud. Incluyendo los artefactos eléctricos y la iluminación de las salas médicas, consultorios, dependencias del personal, áreas que rodean el perímetro de las instalaciones, etc. [46].

Además, debería incluirse cualquier artefacto o dispositivo que use el personal del centro de salud con fines que no sean médicos, como radios, planchas, cargadores de teléfonos celulares, etc. Debe tenerse en cuenta todo aquello que use electricidad [46].

- Se identifica la cantidad de energía que consume cada artefacto. Colocando una etiqueta en el artefacto o dispositivo que indique la cantidad de energía que usa, normalmente expresada en vatios. La etiqueta debe estar impresa directamente en el dispositivo o puede ubicarse en el adaptador de corriente que conecta el dispositivo al tomacorriente en la pared o a un protector contra descargas. Si estos datos no estuvieran disponibles de inmediato, consulte el manual de funcionamiento que se proporciona con el dispositivo [46].
- Se calcula las horas que usa cada equipo por día. Proporcionando el valor más aproximado de la cantidad de horas diarias que se usan los equipos que consumen energía [46].

- Se calcula la carga de energía total diaria de las instalaciones. Con el fin de medir el consumo de energía total, multiplicando la cantidad de vatios de cada artefacto o dispositivo por la cantidad de horas que se usa diariamente. Este cálculo le dará una cifra en vatios hora diarios. La tabla 8 muestra los niveles de consumo diario de energía en vatios por día (columna E) de ocho lámparas fluorescentes compactas (multiplicar columnas B, C y D) [46].

Tabla 3.1: cálculo de la carga de energía de lámparas fluorescentes compactas (Compact Fluorescent Lights, CFL) [46].

A	B	C	D	E
				(multiplicar las columnas B x C x D)
Dispositivo que consume energía	Cantidad de dispositivos	Consumo de energía (en vatios)	Horas de uso diario	Energía consumida por día (vatios hora)
CFL, clínica (interior)	8	18	8	1.152 vatios hora (= 8 x 18 x 8) o 1,2 kilovatios hora

- **Carga fundamental:** es aquella que pertenece a los artefactos o servicios del centro de salud que consumen energía y que deben estar en funcionamiento en todo momento. La interrupción o la falta de energía para las cargas fundamentales pueden generar peligro en la vida de los pacientes. Para la mayoría de los centros de salud que no están conectados a la red, la carga energética más importante será la del refrigerador de vacunas. El apéndice B tiene información sobre las ventajas y desventajas de los refrigeradores a fin de satisfacer las necesidades de vacunas y otro tipo requerimientos de atención de salud [46].

Lo ideal sería que las cargas importantes estén protegidas por un suministro de energía especial. Esto se refiere a una fuente de energía única, como un generador diésel o un banco de baterías, que se usa exclusivamente para una carga fundamental (p. ej., todo el equipamiento del quirófano) o un equipo importante (p. ej., el refrigerador de vacunas). En estos casos, el quirófano o el refrigerador de vacunas estaría conectado directamente al generador o al sistema de energía solar; esto garantiza que los equipos importantes reciban una fuente de energía confiable en todo momento [46].

- **Carga esencial:** se refiere a los artefactos y dispositivos que son importante mientras la energía está disponible. Por ejemplo, cuando un paciente llega a la clínica durante la noche para una cirugía de emergencia, la iluminación es vital para realizar la tarea. Es extremadamente difícil, aunque no imposible, realizar una cirugía con la luz de una vela o linterna; no obstante, es preferible usar la iluminación eléctrica. Otras cargas importantes incluyen las computadoras, impresoras y radios [46].
- **Carga no fundamental:** se refiere a artefactos y dispositivos que son útiles, pero no esenciales. Esto puede incluir un ventilador para que el paciente esté más cómodo en una noche de calor o una plancha para los uniformes del personal o la ropa de cama. El uso personal de equipamiento por parte de los empleados, como computadoras, también se considera una carga no fundamental. Este tipo de equipos solamente deben usarse si existe energía adicional después de que se hayan tenido en cuenta los artefactos importantes y fundamentales en la combinación energética [46].

El personal y la administración del centro de salud deberán determinar cuáles son las cargas energéticas fundamentales para satisfacer sus necesidades y garantizar que reciban la energía necesaria. También será importante determinar la prioridad de otras cargas entre fundamentales y no fundamentales para que el personal entienda explícitamente cómo asignar los insumos de energía en caso de una falta de energía eléctrica [46].

- **Conversión de amperios a vatios:** si la etiqueta solamente indica la cantidad de amperios y no la cantidad de vatios, multiplique la cantidad de amperios por la cantidad de voltios para obtener la cantidad de vatios. La mayoría de los países usan 240 voltios (excepto en los Estados Unidos que usa 120 voltios). Si un dispositivo es alimentado por un transformador (normalmente se encuentra dentro de una caja plástica negra que se conecta al tomacorriente), significa que el transformador convirtió la electricidad de CA a CC y debe multiplicar por la tensión de CC y no la de CA. Por ejemplo, si un dispositivo indica “INPUT 9 V, 0.5 A” (ENTRADA 9 V; 0,5 A), el cálculo será: 9 voltios x 0,5 amperios = 4,5 vatios [46].

En realidad, el dispositivo debe indicar un rango de tensión mucho mayor, de 100 V a 240 V. Ese dato significa que funcionará con la tensión de cualquier país. Para sus cálculos, use la tensión de su país, que es donde conectará el dispositivo [46].

3.5 ETAPA 3: EVALUACIÓN DE FABRICANTES DE BALDOSAS

3.5.1 Evaluación de alternativas

Existen diversas empresas a lo largo del mundo que trabajan con energía piezoeléctrica, dándole diversos usos para aprovechar al máximo sus capacidades. Sin embargo, en cuanto a la comercialización de baldosas piezoeléctricas la empresa británica *Pavegen* a la fecha es una de las más requeridas en el mercado [49].

3.5.2. Baldosas piezoeléctricas comerciales

A continuación, se muestran diversos tipos de baldosa piezoeléctricas junto con sus principales características [49].

3.5.2.1. Eco-baldosas PAVEGEN

Este modelo cuenta con una baldosa de forma rectangular de medidas 60x45cm, una de sus características por la cual es destacada es el hecho de que en su centro posee una iluminaria Led

que al momento de ser pisada prende, ante lo cual se deduce que este modelo es más empleado en lugares en donde se quiera dar a conocer esta tecnología [49].



Figura 3.1. Eco-baldosas PAVEGEN [49].

Especificaciones técnicas de la Eco-baldosa

Esta baldosa posee las siguientes especificaciones técnicas:

- Dimensiones: 60x45cm
- Capacidad de generar 7 W por pisada.
- Tiempo de uso de 5 años.
- Desplazamiento máximo de la baldosa de 5 mm.
- Puede utilizarse tanto en interiores como exteriores.
- Es resistente al agua.
- Fabricado con caucho reciclado y otros materiales reciclados.

3.5.2.2. Baldosa V3

La baldosa V3 está conformado por cuatro componentes principales, tres generadores electromagnéticos y un mosaico o azulejo triangular. Cuando una persona pise las baldosas los generadores se desplazarán de manera vertical generando electricidad, la cual puede ser empleada para su uso [49].



Figura 3.2. Baldosa piezoeléctrica modelo V3 [49].

Especificaciones técnicas de la baldosa V3

Algunas de las especificaciones técnicas que esta baldosa posee son:

- Desplazamiento máximo del azulejo de 10 mm.
- Carga máxima de 7 kN.
- Posee tres generadores por azulejo.
- Puede utilizarse tanto en interiores como exteriores.
- Es resistente al agua y a residuos químicos.
- Resistente al polvo.
- Capacidad de generar entre 3 a 5 J por pisada.

2.5.2.3. Baldosa Piezo Power

Estas baldosas del subsuelo se interconectarán a través de una red de conectores macho y hembra, las cuales se distribuyen en tres diferentes filas [49].

1. Una fila de inicio que solo tiene un conector hembra.
2. Los azulejos de fila de al medio tienen ambos, un conector macho y hembra.

3. Una fila final que tiene un hembra y dos conectores macho que hacen la transición de la energía de la fila a la columna.

En cualquier lugar a lo largo de la red la energía buscará el camino hacia la batería. Esto se debe a que la carga de la batería es opuesta a los azulejos, por lo que la energía es atraída hacia la batería (véase Fig. 3.3). Se menciona en la ficha técnica de esta baldosa que es capaz de generar hasta 14W por pisada (véase Fig. 3.4) [49].

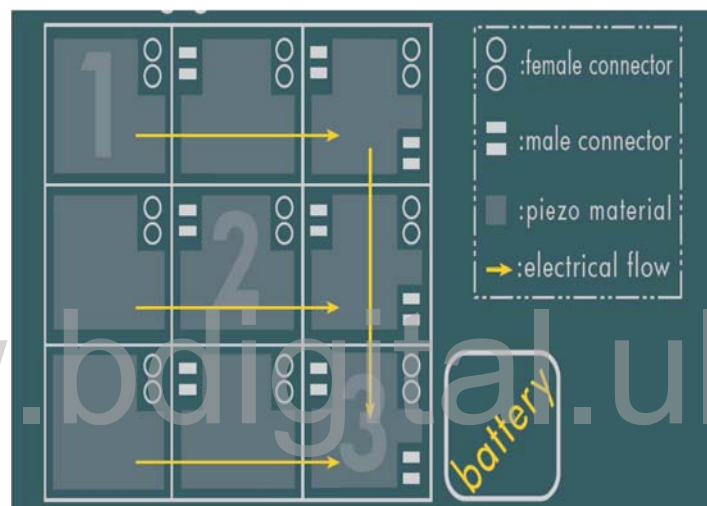


Figura 3.3. Diagrama de interconexión baldosa piezo power [49].

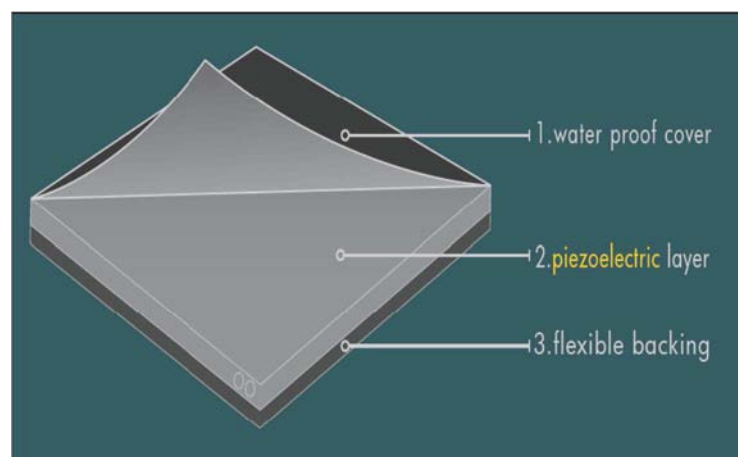


Figura 3.4. Partes de baldosa piezo power [49].

2.5.2.4. Baldosa PowerLeap

PowerLeap es una baldosa que posee luces en su superficie las cuales son encendidas a medida que una persona pisa sobre ellos generando el efecto piezoeléctrico, es utilizada generalmente por decoradores y arquitectos (véase Fig. 3.5). Algunas de sus especificaciones técnicas se presentan a continuación [49].

Especificaciones técnicas de la baldosa PowerLeap

- Dimensiones 61x61x3,8cm
- Capacidad de general 1 Watt por pisada
- Uso interior y exterior
- Fabricado con terrazo



Figura 3.5. Baldosa PowerLeap [49].

3.6 ETAPA 4: DISEÑO DEL CONJUNTO FORMADO POR LAS BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS Y TIPOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

3.6.1 Programa a utilizar (AutoCAD®)

AutoCAD® es un software de diseño asistido por computadora utilizado para dibujo 2D y modelado 3D. Actualmente es desarrollado y comercializado por la empresa Autodesk. El nombre AutoCAD® surge como creación de la compañía Autodesk, donde Auto hace referencia a la empresa y CAD a diseño asistido por computadora (por sus siglas en inglés *Computer Assisted Design*), teniendo su primera aparición en 1982. AutoCAD® es un software reconocido a nivel internacional por sus amplias capacidades de edición, que hacen posible el dibujo digital de planos de edificios o la recreación de imágenes en 3D; es uno de los programas más usados por arquitectos, ingenieros, diseñadores industriales y otro [50].

3.6.2 Tipos de almacenamiento de energía

Las nuevas tecnologías de almacenamiento de energía se convertirán en elementos fundamentales de los sistemas eléctricos del futuro, de tal forma que el almacenamiento eléctrico puede aportar valor en todos y cada uno de los eslabones de la cadena de suministro de electricidad. Red Eléctrica, consciente de ello, apuesta por la incorporación de estos sistemas de almacenamiento de energía, con el objetivo final de maximizar la integración de renovables y dotar de una mayor eficiencia y seguridad al conjunto del sistema eléctrico [43].

➤ Las Baterías Plomo Ácido Abierto

Las baterías de Plomo Abierto conocidas también como baterías de plomo ácido son aquellas que están compuestas por seis compartimentos individualmente separados y conectados entre sí, en serie, dentro de una caja o envase de polipropileno al modo de material aislante y resistente al ácido cada célula contiene un bloque de placas positivas y negativas [51].

➤ **Las baterías de GEL**

Son más aptas para aplicaciones de energía que de potencia, se utilizan en aplicaciones donde se requiere una resistencia elevada a los ciclos de descarga y carga. Ideales para instalaciones solares donde normalmente los picos de consumo no son muy elevados, pero se necesitan profundidades de descarga de batería moderados o elevados. La vida de las baterías GEL es muy parecida a las baterías AGM. Son también VRLA (*Valve Regulated Lead-Acid Batteries*; baterías de plomo-ácido reguladas mediante válvulas) por lo tanto sin mantenimiento ni fuga de gases [52].

Las baterías de gel son muy útiles para instalaciones solares aisladas o fuera de un punto de conexión a red. Las baterías de GEL destacan por su gran durabilidad, por no necesitar mantenimiento ni emitir gases nocivos. Las características de la batería de gel permiten su buen funcionamiento en instalaciones que se encuentren en movimiento como caravanas o barcos. Batería de gel, la mejor opción por prestaciones y durabilidad [51].

➤ **Las baterías AGM**

(*Absorbent Glass Mat*) significan malla de fibra de vidrio absorbente. El electrolito queda absorbido en una malla de fibra de vidrio entre las placas por acción capilar. Las características principales de estas baterías son [52]:

- Baja autodescarga, pueden almacenarse durante largos periodos de tiempo sin necesidad de recarga.
- Baja resistencia interna, aceptan corrientes de carga y descarga muy elevadas. Gran número de ciclos: Más de 500 ciclos al 50% de descarga.
- VRLA (*Valve Regulated Lead-Acid Batteries*; baterías de plomo-ácido reguladas mediante válvulas) por lo tanto sin mantenimiento ni fuga de gases.

Lo que las hace ideales en aplicaciones de elevada exigencia de corriente, como arranque de motores y vehículos de tracción que necesitan picos de corriente elevados: caravanas, motos de agua, transpaletas, carritos de golf, etc [52].

Las baterías AGM o baterías VRLA son muy útiles para las instalaciones solares que conllevan una elevada intensidad de descarga de las baterías. Las características de la baterías AGM la definen como una batería recargable, sellada y de plomo ácido, que no requiere de mantenimiento ni ventilación, por lo que las baterías VRLA se convierte en una excelente opción para el sector fotovoltaico, el sector industrial y para el uso doméstico [51].

➤ **Las baterías estacionarias**

Están especialmente ideadas para aplicaciones de uso estacionario y continuo con consumos medios-altos con profundidades de descarga y picos de corriente moderados. Es decir, son el tipo de batería ideal para instalaciones solares de uso permanente [52].

➤ **Baterías Estacionarias Plomo-ácido abiertas**

Más económicas, esperanza de vida útil más de 15 años, elevado número de ciclos, buena respuesta a descargas profundas, pequeña evaporación de gases y mantenimiento mínimo [52].

➤ **Baterías Estacionarias GEL**

Más caras pero con mayor número de ciclos de carga y descarga por lo tanto mayor vida útil, mejor respuesta a corrientes elevadas y descargas profundas, mayor estabilidad de la tensión frente a la descarga, sin evaporación de gases y sin mantenimiento [52].

Las Baterías Estacionarias o acumuladores estacionarios son un tipo de batería que se caracteriza por estar distribuida en varios vasos independientes. Las baterías estacionarias ofrecen la mejor

calidad y durabilidad entre todas las tecnologías de baterías de plomo. Se dispondrá de un banco energético preparado para energía solar en instalaciones que se utilizan de manera habitual [51].

➤ **Las baterías de litio**

Ofrecen unas características técnicas excelentes en comparación con otro tipo de baterías del mercado. Cuentan con una excelente vida útil y una capacidad de carga muy eficiente, además, no requieren de mantenimiento ni emite gases, por lo que puede ser instalada en interiores. Además, gran parte de ellas cuentan con un diseño vanguardista y tecnología interna pionera en el mercado [51].

Las baterías de Ión-Litio tienen las mejores prestaciones actualmente del mercado. Su campo de aplicación es el de las instalaciones de autoconsumo con baterías. Duran más tiempo que las convencionales, se pueden descargar totalmente sin sufrir daños, tienen mayor densidad energética (hasta 3 veces más que las convencionales) y son más rápidas en cargarse y entregando la energía [52].

www.bdigital.ula.ve

CAPÍTULO IV

DEMANDA ELÉCTRICA Y SELECCIÓN DE BALDOSAS PIEZOELÉCTRICAS

En el presente capítulo se estimará de manera detallada el cálculo de la demanda eléctrica del área con mayor prioridad, se identifican las áreas con mayor flujo peatonal y por último se selecciona la baldosa piezoeléctrica más idónea para dar cumplimiento de todos los objetivos en la investigación.

4.1 DETERMINACIÓN DE LA CARGA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y DEMANDA.

Debido a la crisis hospitalaria en el país, al deterioro y escasez de los equipos médicos, aunado a la falta de personal para operar y dar mantenimiento, esto genera el cierre muchos servicios, esto se explica de manera más detallada en el Capítulo III, sección, 3.3. Mediante inspección y evaluación de las diversas áreas de cada uno de los servicios (véase Tabla 4.1), se identifica y prioriza el área de estudio de la investigación. Por esta razón, se decide hacer énfasis en el estudio en el servicio del área P28 (Cuidados Neonatales), ya que es un servicio de vital importancia.

Tabla 4.1. Distribución de las Áreas de Servicios del IAHULA.




Piso 1	Piso 2	Piso 3	TORRE Piso 4, 5, 6	Piso 7	Piso 8	Piso 9
-Pabellón Militar -Ginecología (Área de Operación) -Unidad de Diálisis, Nefrología, y Transporte Renal - Consultorios de Urología -Unidad de Cuidados Intensivos (UCI)	Unidad de Ortopedia y Traumatología	Unidad de Cirugía	Medicina Interna	Pediatría	Oncología Pediátrica	-Neurocirugía y otros - Área de Enfermería.

Nivel Servicio (Sótano)	Nivel Mezzanina
-Unidad de Resonancia Magnética y Tomografía Digital - Unidad de Oncología -Auditorio - Área de Nutrición - Anatomía, Patología (Morgue) - Depósito General -Mantenimiento - Área de Lancería - Laboratorio de Microbiología - Área de Carpintería - Laboratorio de Prótesis - Área de Lavandería - Electro medicina	- Fisiatría - Dirección - Consulta Personal - Laboratorio de Toxicología - Consultas Externas: Epidemiología, Otorrinolaringología, Oftalmología, Nefrología, Reumatología, Medicina Interna, Toxicología, Infectología, Neurología, Psiquiatría. - Laboratorio General - Capilla
Nivel Emergencia	Nivel Plaza
- Quirófano 19 - Emergencia Obstétrica - Emergencia Adulto - Emergencia Pediátrica - Cirugía Pediátrica - Traumatología - Estadística de la Salud - Unidad de Radiología - Gastroenterología (Estudios) - Neumonología - Cirugía del Tórax - Cardiología - Biblioteca - Unidad de Tomografía - Ultrasonido - Radiología (Consulta) - Laboratorio de Emergencia.	- Gastroenterología (Consultas) - Admisión - Oficina de Supervisores de Servicios Generales 18 - Odontopediatría - Hematología - Cirugía General - Medicina Nuclear - Ginecología - Banco de Sangre - Pediatría - P28 (Cuidados Neonatales) - Hospitalización - Cafetín, Fotocopiadora, Librería - Departamento de EnfermeríaGenerales.

Gracias a la información suministrada por el grupo de enfermeras que hacen vida en el servicio y la revisión de los de los manuales de cada uno de los artefactos o equipos médicos que se encuentran en el sitio de estudio, se logró estimar la potencia de dichos equipos, Los cuales se describen a continuación (véase Tabla 4.2).

Datos del fabricante de cada uno de los equipos:

Tabla 4.2. Equipos o artefactos del Área P28 (Cuidados Neonatales).

EQUIPOS	VOLTAJE	POTENCIA	
Incubadora de Terapia Intensiva MEDIX PC 305	220V-50 Hz 110V-60 Hz	1 A 220V 2 A 110V	
Respirador Dräger Medical Evita 4	U_{nom} 100...240 VAC 50/60 Hz I_{nom} 3.2 A...1.2 A		
Bombillos LED'S		8 W	

4.1.1 Estimación y cálculo de la demanda eléctrica en el Área P28 (Cuidados Neonatales).

Para la estimación y cálculo de demanda, se puede observar de manera más detallada la elaboración de la tabla 4.3, véase en el Capítulo III, sección 2.4.1

Tabla 4.3. Cálculo de la Demanda Eléctrica.

	A	B	C = A x B	D	E = C x D	F = E/1000	
Dispositivo que consume energía	Cantidad de dispositivos	Energía (en vatios)	Total de vatios	Horas de uso diario	Vatios hora por día (W-h)	kWh/día	Prioridad del dispositivo
Incubadora de Terapia Intensiva MEDIX PC 305	24	220	5.280	24	126.720	126,72	Fundamental
Respirador Dräger Medical Evita 4	2	352	704	8	5.632	5,635	Fundamental
Bombillos LED'S	15	8	120	8	960	0.96	Esencial
Carga Demandada			6.104			6,104	
Consumo					133.312	133,312	

Para nuestro estudio la energía de respaldo durara un máximo de cuatro (4) horas una vez que falle el sistema de suministro de la red eléctrica nacional. De esta manera el consumo para este instante de tiempo nos queda de la siguiente manera:

$$\text{Carga Demandada} \times (4\text{horas}) = 6.104 \text{ Vatios} \times 4 \text{ horas.} \quad (4.1)$$

$$\text{Carga Demandada} \times (4\text{horas}) = 24.416 \text{ W-h} = 24,416 \text{ kW-h.}$$

4.1.2 Cantidad de energía estimada al caminar.

Teóricamente, la energía por paso se puede calcular de la siguiente manera, véase en el Capítulo II, sección 2.4, ecuación (2.4):

Valiéndose de la ecuación, queda:

$$E_p = 1.3\text{mgh}$$

Dónde:

- 1,3: es la constante que representa un promedio de valores de fuerza presentes en un golpe de talón al pasar sobre el sensor piezoeléctrico; de acuerdo a los datos obtenidos en el estudio de nilsson and thorstensson, este valor es de 1 a 1.5 cuando se camina y de 2 a 2.9 cuando se corre.
- m: corresponde al peso promedio de una persona en Venezuela se toma un valor de 70kg, para realizar los cálculos.
- g: que representa la fuerza de gravedad, siendo la altura del objeto que presiona al sensor con la segunda capa.
- De acuerdo a *Pavegen Systems* equivale a 0.005 metros el valor de h y E_p representa la energía potencial por cada paso.

Sustituyendo en la ecuación (2.4), se tiene:

$$E_p = 1.3(70 \text{ Kg}) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (0,005 \text{ m})$$

$$E_p = 4.46 \text{ J}$$

Tabla 4.4. Tiempo promedio que tarda una persona en caminar.

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

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

$$tp = \frac{t}{pasos} \quad (4.2)$$

$$t_p = \frac{60s}{75 \text{ pasos}} = 0.8 \text{ s}$$

Dónde:

t_p = tiempo promedio en dar un paso.

t = tiempo en segundos.

Y utilizando la ecuación (4.3); por paso dado es el resultado.

$$P = \frac{E_p}{t_p} \quad (4.3)$$

$$P = \frac{4.46 \text{ J}}{0.8 \text{ s}} = 5.575 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

4.2. Selección de baldosa

Para la realización de este proyecto se tomará en cuenta uno de los dos modelos de baldosas marca PAVEGEN anteriormente descritos, debido a que la cantidad de información que se maneja de estas es mayor con respecto a otras baldosas. En primer lugar, se realiza un cuadro comparativo de las dos baldosas para determinar los aspectos principales de estos.

Tabla 4.5. Cuadro comparativo de baldosas.

	Eco-Baldosa	BaldosaV3	U. Medida
Capacidad	7	3 a 5	julios
Carga máxima	500	700	kilogramo-fuerza
Desplazamiento vertical máximo	5	10	cm
Dimensiones	60x45	-	cm
Forma	Rectangular	Triangular	-

Con los datos obtenidos se puede concluir que la eco-baldosa posee una mayor capacidad de generación de energía con respecto a la V3, sin embargo, la V3 al poseer tres generadores en vez de uno central es mucho más eficiente para un lugar en donde van a transitar personas de manera aleatoria, provocando que independientemente cual sea la superficie por cual pise una persona los generadores se vayan a accionar. Es por este factor que se realizara este proyecto con esta baldosa. A continuación, se estudia con mayor detalle su diseño.

4.2.1. Características generales de la baldosa V3

Esta baldosa posee una forma triangular lo cual le permite acoplarse con otras de distintas formas geométricas, una baldosa está compuesta por un mosaico triangular equilátero, el cual posee 500 mm en cada uno de sus lados, mientras que los generadores poseen un diámetro de 180 mm y una altura de 92 mm.

La disposición triangular asegura que la tecnología V3 maximice la producción de energía y datos en tiempo real de cada paso. El sistema está diseñado para tomar un punto significativo y una carga distribuida.

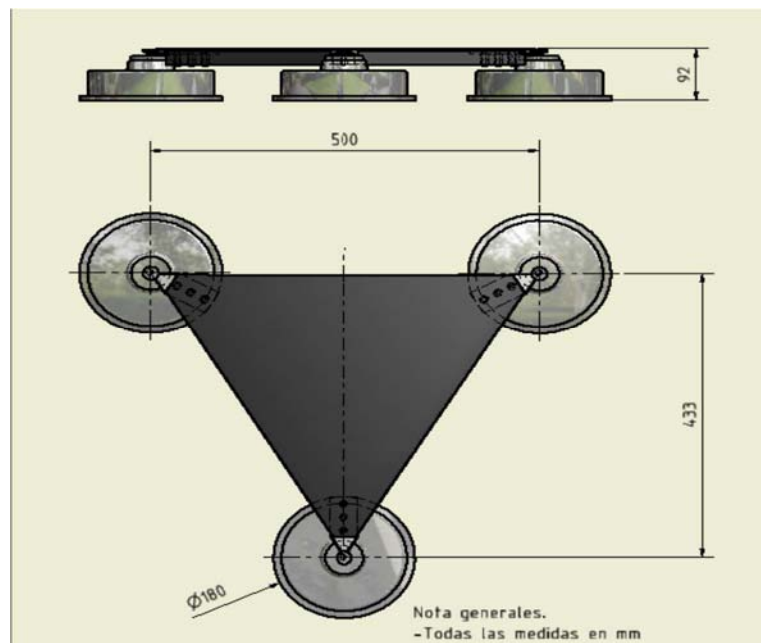


Figura 4.1. Dimensione de la Baldosa piezoeléctrica modelo V3.

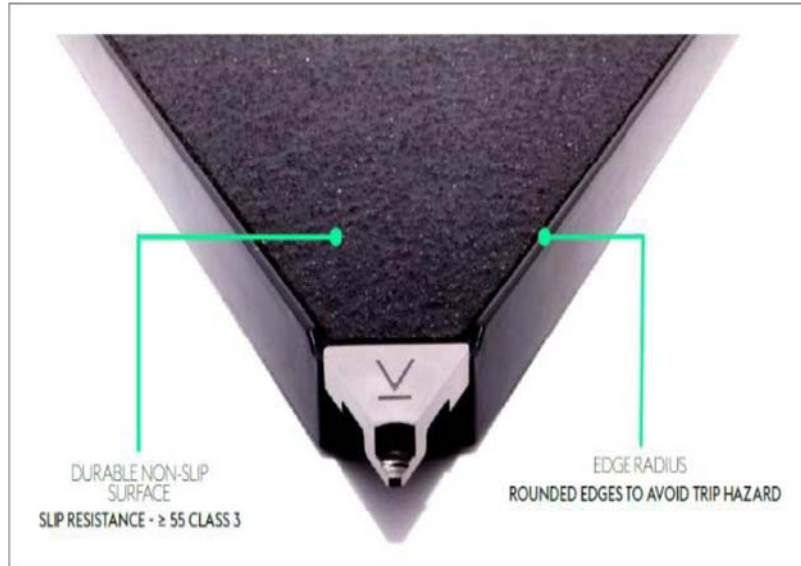


Figura 4.2. Baldosa PAVEGEN.

En la ilustración anterior (Figura 37) se observa que se diseñó el mosaico compuesto para que sea liviano, sin comprometer su resistencia, durabilidad y resistencia a cargas pesadas. Se usó plástico reforzado con vidrio (GRP) y resina poliéster. La parte interior tiene un intrincado diseño de costillas para garantizar la estabilidad y rigidez.

La construcción asegura la máxima transferencia de energía por paso y asegura un rendimiento óptimo para instalaciones interiores y exteriores.

El sistema que ofrece PAVEGEN consiste en módulos de baldosas, que serán instaladas con un controlador inteligente proporcionado por la misma empresa. Además de esto, cada baldosa cuenta con conexión Bluetooth. Por lo tanto, a la salida del controlador se obtiene un BUS de continua para conectar el banco de baterías, y un BUS de datos.

4.2.2 Capacidad de la baldosa V3

En el instante en que una persona pisa una baldosa, esta se mueve de manera vertical de 5 a 10mm. Esta presión crea una rotación sobre los generadores electromagnéticos que se sientan debajo de la superficie superior de los azulejos. La energía cinética es transformada en energía eléctrica a un promedio de 3-5 julios por paso.

4.2.3 Componentes y partes principales de la baldosa V3

La baldosa V3 posee distintos componentes, los cuales se especificaran a continuación.

- Alojamiento del generador: es el encargado de recibir la energía eléctrica producida por la pisada, es fabricada casi en su totalidad de aluminio y su tecnología es desconocida, pero se sabe que es capaz de transformar la energía cinética en energía eléctrica.

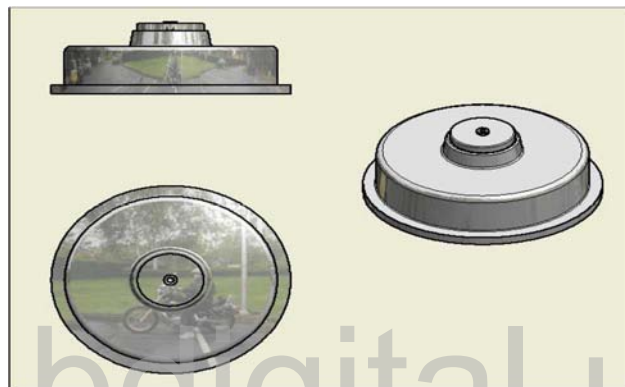


Figura 4.3. Alojamiento del generador.

- Puntillas: Es la parte que conecta la baldosa de los generadores, en la figura se logra apreciar con mayor detalle.

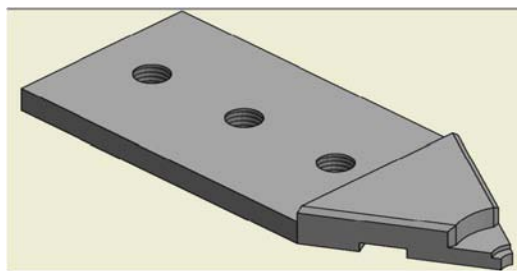


Figura 4.4. Puntillas.

- Hoja superior: está fabricada de goma resistente, es de este material para una mejor adherencia con el pie de la persona, posee un espesor de 3 mm como se muestra en la figura.



Figura 4.5. Hoja superior.

4.2.4 Guía de instalación Módulos Baldosas PAVEGEN.

Procedimiento:

1) Preparación del área: Dado que la matriz se va a instalar en un piso existente formado por adoquines de hormigón, es necesario retirar todos los adoquines en el área de instalación, para luego limpiar y nivelar la zona. Se recomienda que los adoquines circundantes al armazón se eliminen para crear una zona de trabajo de al menos 200 mm alrededor del contorno del marco. Esto debe exponer las vías del conducto de cable y drenaje.

2) Colocación de la cama de arena: La superficie de la cama de ajuste debe establecerse paralela a la superficie del entorno adoquines a una profundidad de 92 mm. La pendiente de la cama debe coincidir con la de los adoquines circundantes. La capa de arena debe ser compactada y tener al menos 8 mm de espesor. La superficie debe extenderse más allá de los límites de la matriz PAVEGEN. La superficie superior de la placa base debe estar a 80 mm por debajo del nivel de la superficie de adoquines adyacentes. La alineación de la placa se establece con la plantilla de pin PAVEGEN.

3) Montaje de las secciones del marco en placas base: El marco se construye usando secciones modulares y consiste en un marco superior e inferior. El marco inferior monta las almohadillas de borde y es la sección principal de soporte de carga. Se debe colocar temporalmente la fila

externa de generadores para que sirvan de referencia para la posición del marco. Las secciones del marco se atornillan y se colocan con la ayuda de plantillas de configuración PAVEGEN para establecer la cuadratura, la posición y el espacio de drenaje establecido en el borde del nivel inferior.

4) Asegurar el marco al concreto: Se debe perforar los agujeros preformados en el marco a través de la placa base en el concreto, utilizando anclajes químicos. Para esto se recomiendan espárragos de anclaje M8, Fischer FISVW 360S o equivalente. Se requiere la pistola de aplicación de resina Fischer FIS AM. Se debe colocar los conductos de cableado entre la matriz y el armario de control.

5) Instalación de conductos de drenaje: Se debe instalar el conducto de drenaje del borde a lo largo del borde inferior. Luego se cortará el conducto de tubería de PVC de sección rectangular y se pondrá en concreto. Se debe alinear el borde del conducto con las ranuras de drenaje en la placa base. Por último, se conectarán los canales de drenaje al desagote pluvial existente.

6) Sello contra el ingreso de agua: Se recomienda sellar la matriz para minimizar el daño causado por el agua en la plataforma. Para evitar que el agua se filtre debajo de la placa base, se debe colocar la masilla de polisulfuro entre la placa de base y la interfaz de hormigón y conducto. Se recomienda el uso de pistola de un componente, una base de caucho sintético sellante conforme a BS2515 / BSEN ISO 11600 F-12.5P. Por último, se debe pasar una tira de sellador de RTV de silicona alrededor de todas las juntas del marco.

7) Colocación de la cama de ajuste: Se debe colocar los adoquines alrededor del marco con un espacio de 15mm y luego colocar sellador de silicona entre estos y el marco de las baldosas piezoeléctricas. Luego de esto se deberán probar los drenajes.

8) Colocación e instalación de gabinete de equipos: Se debe seleccionar un gabinete de equipo IP56 adecuado para el sitio. Se recomienda acero inoxidable o un color claro para reflejar la radiación solar. Como la disipación de potencia del equipo para alojar en el gabinete es baja, no es necesario un sistema de enfriamiento activo. Se recomienda que el gabinete del equipo esté equipado y que el controlador de carga esté conectado a la matriz antes de que se instalen los

generadores. Estos pueden dañarse si se activan sin conexión a una carga. Luego se deberá tender el cableado DC-Bus desde la matriz hasta el gabinete del equipo. Se deberá instalar el sensor de luz ambiental en una posición apropiada. El controlador de salida carga las baterías, mide la potencia y controla la iluminación. Se instalarán las baterías; no se deberá conectar al controlador de carga en esta etapa. Luego se instalará el enlace de celular si es necesario y sus respectivas aplicaciones.

9) Instalación de generadores: Se procede a instalar los generadores en la base instalada. Se deberá respetar los márgenes establecidos con la plantilla proporcionada por PAVEGEN. Una vez instalados los generadores se tenderán y conexionará el cableado de los mismos. Se debe colocar grasa siliconada en cada punto de conexión. Cada cable estará provisto de enchufes y terminales adecuados.

10) Pruebas: Mecánicas: se tendrá que comprobar el movimiento libre y el retorno de las fichas. Luego se ajustará la posición de la almohadilla si la loseta se está pegando o no está corriendo libremente. Eléctricas: se medirá la energía de prueba y alimentación de datos. Luego se retirarán los tornillos, y se aplicará el compuesto de bloqueo (Locktite 2400) y se ajustaran nuevamente los tornillos. Por último, se apretarán los tornillos con la herramienta anti manipulación PAVEGEN.

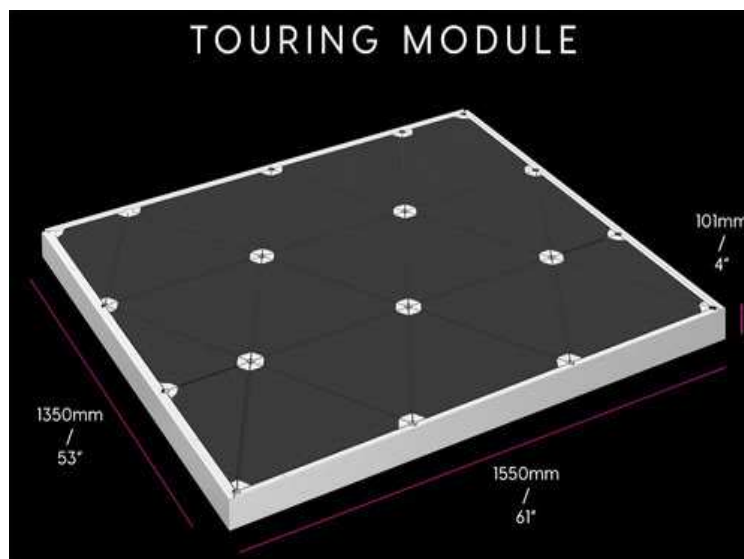


Figura 4.6. Módulo de baldosa PAVEGEN.

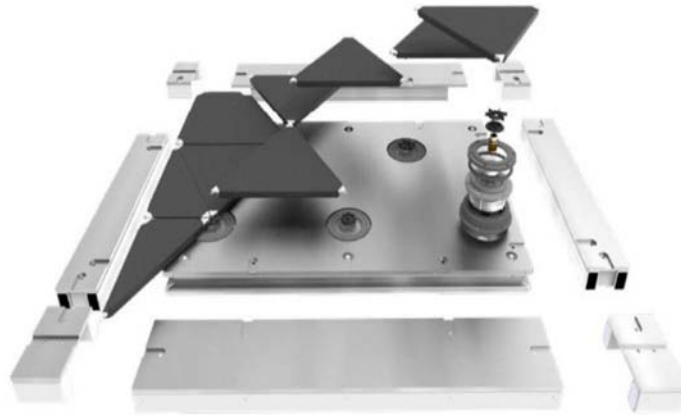


Figura 4.7. Despiece de baldosa PAVEGEN.



Figura 4.8. Instalaciones de Módulos de Baldosas PAVEGEN.

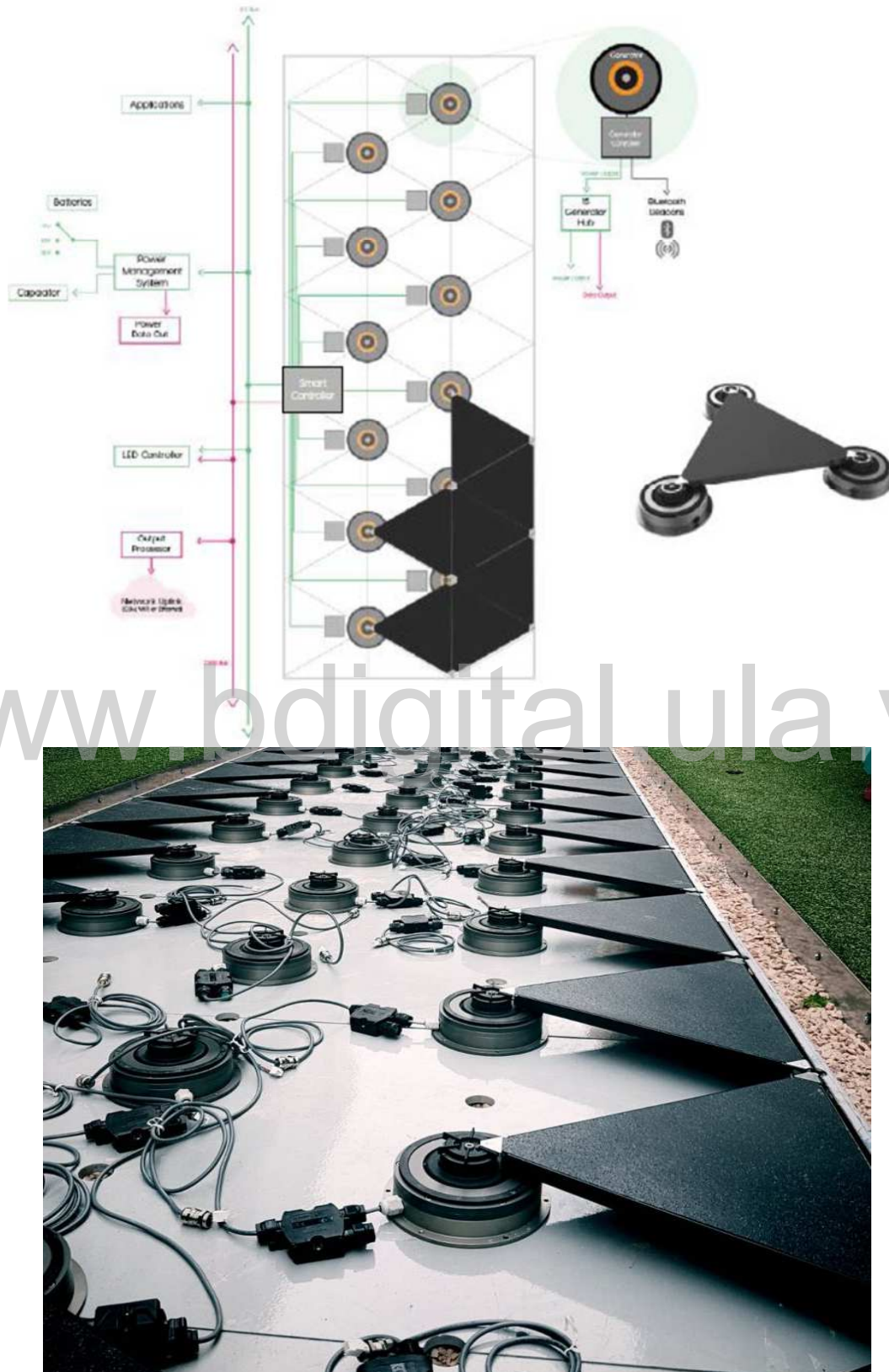


Figura 4.9. Diagrama del sistema PAVEGEN.

4.3. IDENTIFICAR LAS ÁREAS CON MAYOR FLUJO PEATONAL Y CANTIDAD DE PERSONAS QUE TRANSITAN.

Mediante observación de las diversas entradas o accesos y encuestas digitales realizadas al personal que hace vida en el Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida, se determina que la entrada con mayor flujo peatonal es la entrada de nivel plaza la cual dispone de unos 80 m² para la ubicación e instalación de las baldosas piezoeléctricas. Por otra parte, la cantidad de personas que transitan por el lugar es un factor muy importante a considerar, ya que con esto definirá el número de baldosas a instalar. El número de personas que transitan por dicha entrada es aproximadamente un promedio de 1400 personas diarias.

10:46 PM 38

Cargo o función que ejerce dentro de la institución hospitalaria *

Residente

Cédula de identidad *

21183112

Nombre y Apellido *

LUIS LIZANO

Indiqué la cantidad de personas que fluyen o transitan diariamente por la entrada Nivel Plaza del I.A.H.U.LA *

1500

Enviado el 8/2/21 22:03

10:46 PM 38

Cargo o función que ejerce dentro de la institución hospitalaria *

Médico residente

Cédula de identidad *

V19145638

Nombre y Apellido *

Delia Buitrago

Indiqué la cantidad de personas que fluyen o transitan diariamente por la entrada Nivel Plaza del I.A.H.U.LA *

1200

Enviado el 8/2/21 22:01

Figura 4.10. Encuesta digital.

4.4. CALCULO DEL NÚMERO DE BALDOSAS Y POTENCIA.

Los módulos de baldosas PAVEGEN poseen una dimensión de 1550 mm x 1350 mm. Esto daría como resultado un área de los módulos de baldosas de 2092.500 mm², transformando esta cantidad a metros cuadrados da como resultado 2.093 m².

De igual manera, se conoce el área del nivel plaza donde se desea ubicar estos módulos, la cual tiene una dimensión de 80 m².

Para estimar o calcular la cantidad de baldosas a instalar se divide el área del nivel plaza entre el área de los módulos de baldosas. Por lo tanto, nos queda:

$$\frac{\text{area del nivel plaza}}{\text{area de los modulos}} = \frac{80 \text{ m}^2}{2.093 \text{ m}^2} = 38.22 \text{ Modulos de Baldosas} \quad (4.4)$$

La cantidad de Modulos PAVEGEN a instalar serian $38.22 \cong 38$ Módulos de Baldosas

Para calcular la energía promedio por una Baldosa PAVEGEN con unas dieciocho (18) pisadas por minuto con promedio en una hora de utilización de las baldosas, se procede de la siguiente manera:

$$N_t = 18 \times 60 = 1080 \text{ pisadas} \quad (4.5)$$

Donde

N_t: número total de pisadas.

N: número de pisadas.

t: tiempo de utilización de cada baldosa.

El cálculo de la potencia de cada baldosa se procede de la siguiente manera:

$$Pt = Nt \cdot Pi. \quad (4.6)$$

$$Pt = 1080 \times 5 J = 5400 J.$$

Donde

Pt: Potencia total.

Nt: Número total de pisadas.

Pi: potencia generada interna.

Finalmente, la energía generada por baldosa está dada por:

$$E = \frac{Pt \cdot 1W - h}{3600J} \quad (4.7)$$

$$E = \frac{5400 J \cdot 1W - h}{3600J}$$

$$E = 1.5 W - h$$

La energía generada en una hora por las baldosas PAVEGEN, sería 1.5 W-h por 38 módulos, dando como resultado 57 W-h. Dichos módulos PAVEGEN posee 21 baldosas individuales, estos estarían en uso por un periodo de 15 horas diarias, nos queda de la siguiente manera:

$$57 W-h \cdot 21 \text{ baldosas individuales} \cdot 15 = 17.955 W-h \quad (4.8)$$

Como se observó y definió anteriormente en el apartado 3.3, la cantidad de personas que transitan o fluyen por la entrada del nivel plaza del Instituto Autónomo Hospital Universitario

de Los Andes (IAHULA) del estado Mérida es de 1400 personas diarias, por lo tanto los 17.955 W-h que genera el sistema instalado de baldosas PAVEGEN, nos da como resultado una potencia total de:

$$17.955 \text{ W-h} \times 1400 \text{ personas} = 25.137.000 \text{ W-h} = 25,137 \text{ kW-h.} \quad (4.9)$$

Esta es la potencia total diaria que generaría el sistema de módulos de baldosas PAVEGEN una vez instaladas, para cubrir los requerimientos y consumo de energía eléctrica del Área P28 (Cuidados Neonatales), durante un periodo de 4 horas diarias, si llega a fallar el sistema eléctrico.

4.5 DISEÑO MEDIANTE AUTOCAD DEL CONJUNTO FORMADO POR LOS MÓDULOS DE BALDOSAS PIEZOELECTRICAS

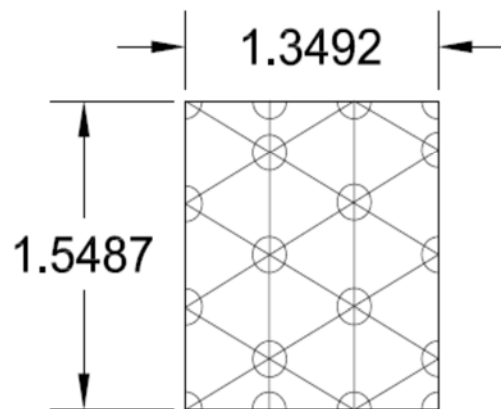
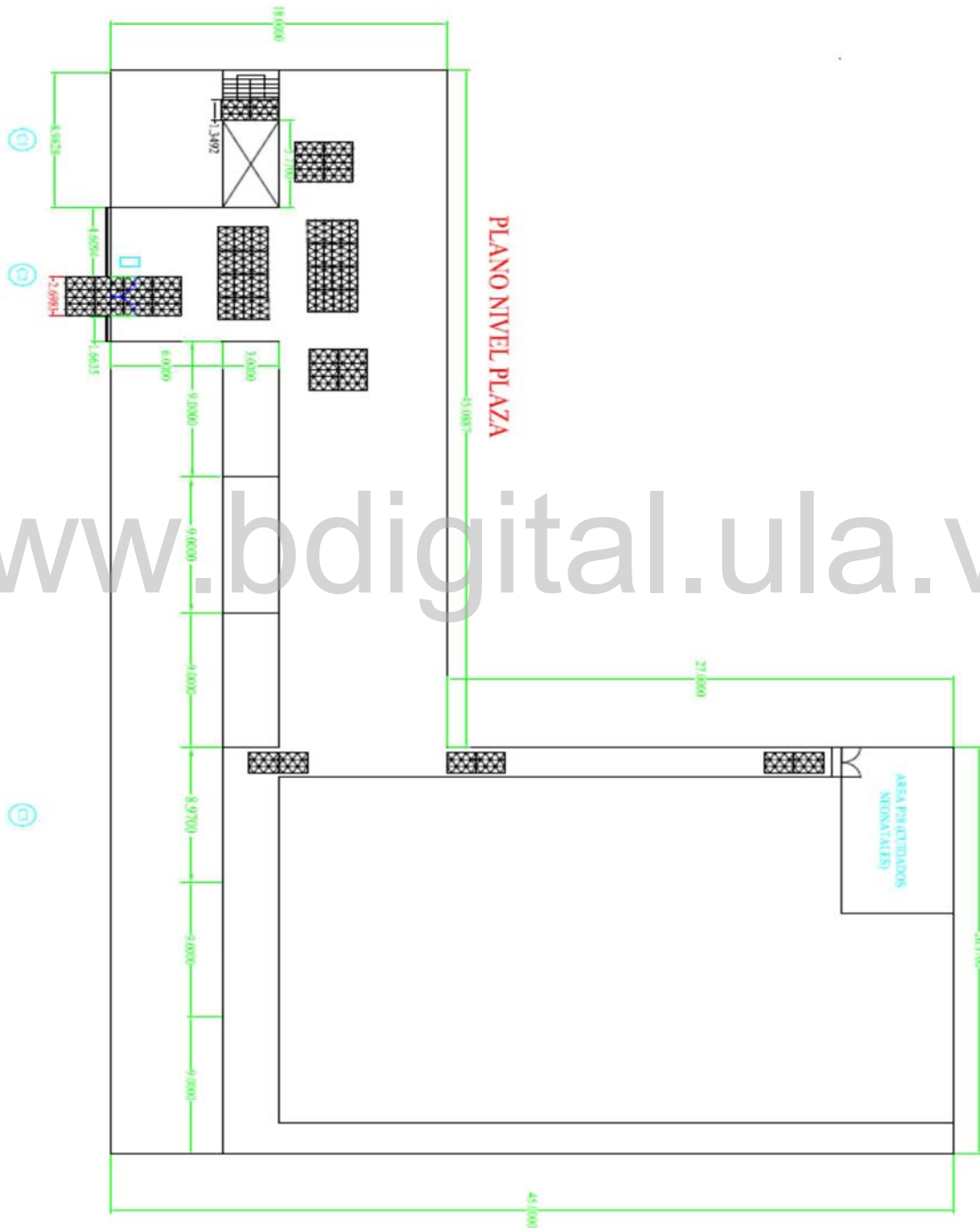


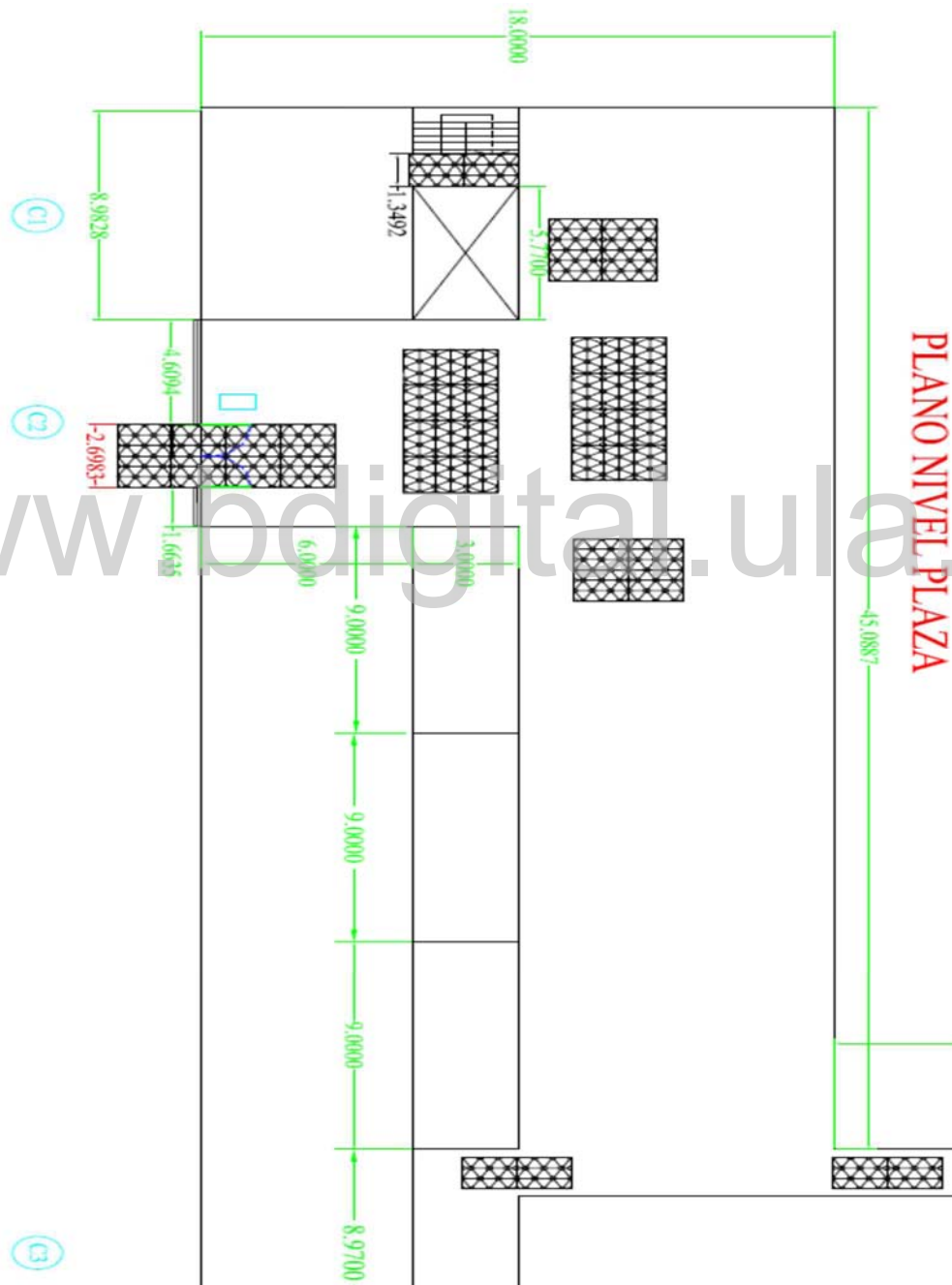
Figura 4.11. Módulos de baldosas piezoeléctricas PAVEGEN.

En el siguiente plano 4.1 corresponde al diseño del plano visto desde planta del nivel plaza del hospital universitario, en la cual se dispone la instalación de los módulos de baldosas piezoeléctricas, el cual está distribuido en las secciones C2, C3 y C3.



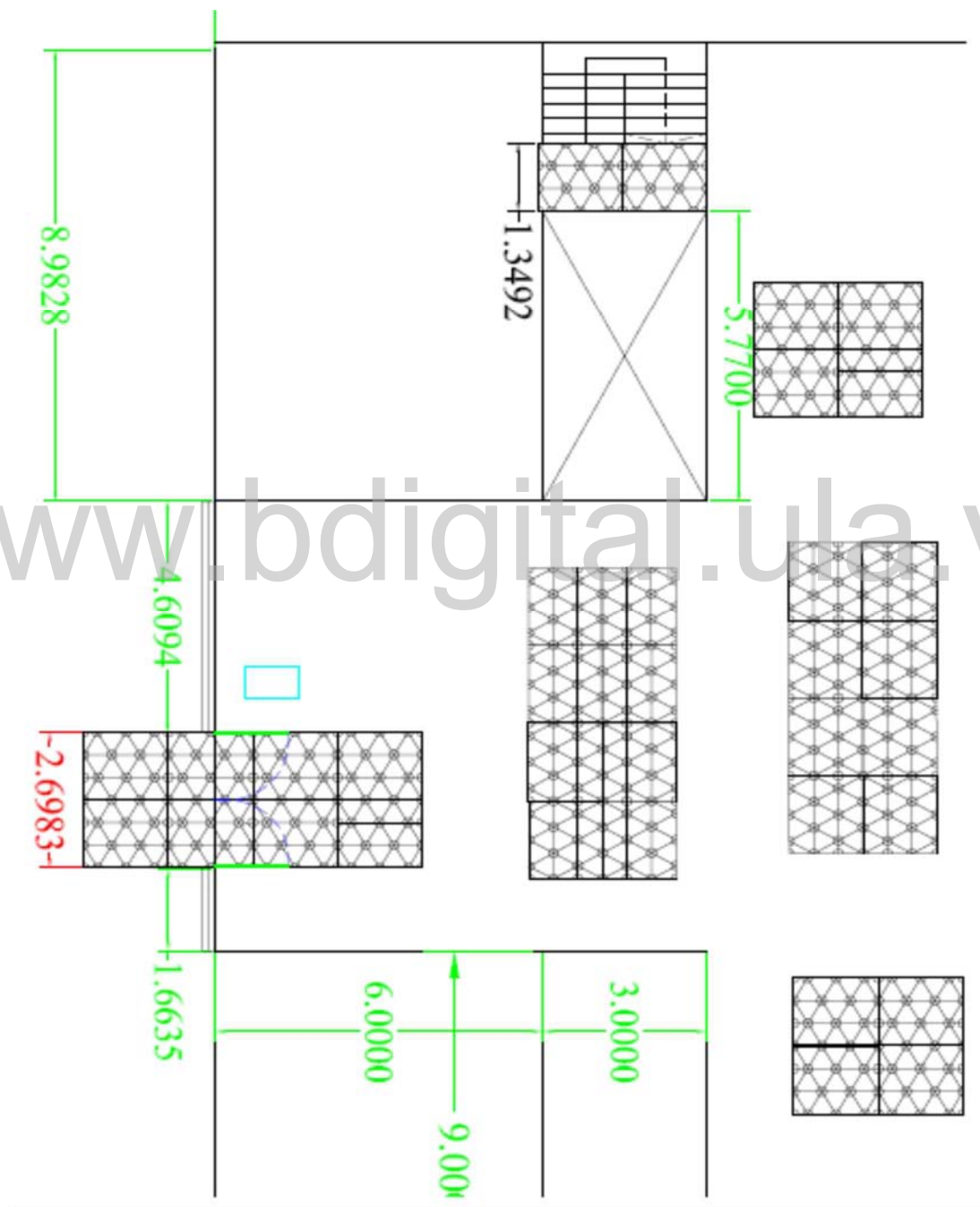
Plano 4.1. PLANO NIVEL PLAZA.

En el plano 4.2 se puede apreciar de manera más detallada la distribución del área C del nivel plaza. La sección C1 indica el área de las escaleras y ascensores, en el área C2 se observa la entrada principal y la sección C3 el área para acceder a el pasillo 2 para ingresar al área P28 (cuidados neonatales).



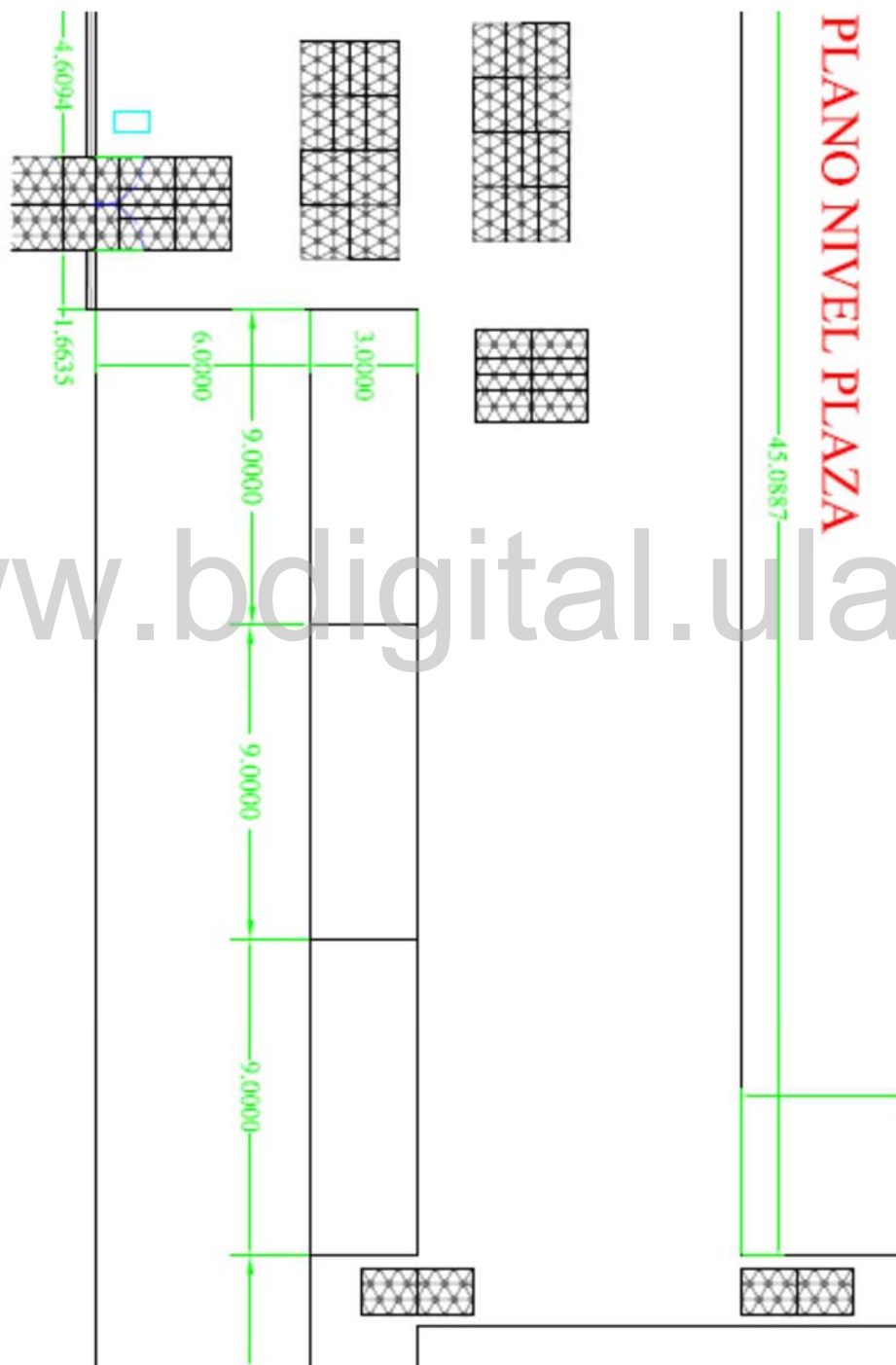
Plano 4.2. PLANO NIVEL PLAZA ÁREA C1, C2 y C3.

En el plano 4.3 se logra ver de forma más amplia la sección C2 la cual es el área con mayor flujo peatonal en el nivel plaza mediante el cual se puede ingresar o acceder al área C1 Y C3. El área de la sección C1 el área de acceso para los peatones para ingresar a los niveles superiores e inferiores por medio de las escaleras como del ascensor.



Plano 4.3. PLANO NIVEL PLAZA ÁREA C1,C2 .

En la siguiente plano 4.4 se puede ver de manera más detallada la disposición de los módulos de baldosas piezoeléctricas para acceder a la sección C3 para ingresar al área de cuidados neonatales P28



Plano 4.4. PLANO NIVEL PLAZA ÁREA C2 y C3.

4.6 Determinación del banco de baterías

Para determinar el banco de baterías es indispensable conocer la potencia necesaria calculada en el apartado 4.4.

Se considera que la potencia estará presente durante 4 horas diarias cuando falle el sistema de la red de energía eléctrica nacional y será constante.

$$E = 25,137 \text{ kW-h.}$$

Se adapta una tensión de diseño de 24V, por lo que la capacidad del banco será:

$$C = \frac{25,137 \text{ kW} - \text{h.}}{24} = 1.047,375 \text{ A} - \text{h.} \quad (4.10)$$

Esto sería válido si el ciclo de la batería es del 100%, es decir, si se pudiera descargar y cargar completamente.

Las baterías de TROJAN son líderes en el mercado mundial de baterías de ciclo profundo, donde hay tanto baterías de Gel como baterías de AGM de 6V o 12V.

Las baterías TROJAN ofrecen una alta durabilidad y robustez gracias a la calidad de todos sus componentes.

➤ **Baterías AGM de ciclo profundo**

Como líder mundial en la fabricación de baterías de ciclo profundo de más de 85 años, TROJAN ha desarrollado Reliant™ AGM con C-Max Technology™ para plataformas de trabajo aéreo, que requieren un diseño de baterías de ciclo profundo a prueba de derrames.

La tecnología de C-Max Technology es única a la línea Reliant e incorpora una amplia gama de características, que no se encuentran en muchas de las ofertas de baterías AGM de hoy, incluidos una fórmula de pasta patentada, separador único, diseño de carcasa fabricada con un polímero especial y máximos supresores de llamas. Estos elementos combinados ofrecen mayor producción total de energía, rendimiento sostenido maximizado, calidad consistente y mayor durabilidad.

Tabla 4.6. Características vs Beneficios Baterías TROJAN.

Características	Beneficios
<p>Formula de pasta patentada</p> <p>La pasta se caracteriza por los elementos diseñados para cumplir con las necesidades de aplicaciones de ciclo profundo</p>	<p>Maximiza el rendimiento sostenido e incrementa la producción de energía total</p>
<p>Composición de separador único</p> <p>El diseño de mayor espesor asegura una alta compresión para un contacto efectivo entre la fibra de vidrio y las placas</p>	<p>Protege contra la estratificación para una vida más prolongada de la batería</p>
<p>Diseño de carcasa con polímero plástico</p> <p>Fórmula diferente de la carcasa de polímero plástico con las paredes externas de la carcasa reforzadas</p>	<p>incrementa la durabilidad y proporciona una mayor compresión en las celdas de la batería para asegurar un rendimiento confiable</p>
<p>Máximos supresores de llamas</p> <p>Cuenta con un supresor de llamas por cada celda</p>	<p>Ofrece máxima seguridad de la batería</p>
<p>Excelencia de fabricación</p> <p>Tecnología avanzada de Trojan, componentes de primera, normas de calidad más exigentes, proceso de pegado en ambos lados y técnicas de fabricación superior</p>	<p>Ofrece calidad de batería consistente para una funcionalidad de batería fiable en aplicaciones AGM de ciclo profundo</p>

➤ Responsabilidad Ambiental

En TROJAN, cuando decimos “*Clean energy for life™*” (Energía limpia por vida) se desea decir cada una de esas palabras. Como defensores proactivos de la sostenibilidad ambiental, nuestra responsabilidad ambiental se enfoca en iniciativas de energía limpia y programas de reciclaje.

- Las baterías TROJAN son 97% reciclables. El plástico del contenedor, el plomo de la batería y el electrolito de las baterías usadas de ciclo profundo pueden ser reciclados para producir nuevas baterías de ciclo profundo.

- A través de su alianza con Southern California Edison (SCE), TROJAN ahorra más de 8 millones de kilovatios/hora y reduce las emisiones de CO₂ en más de 12 millones de libras reduciendo significativamente el consumo anual de energía y la huella de carbono.

Según el fabricante, para aumentar la vida útil de las mismas, se podrá descargar solo el 50% del ciclo. Con este porcentaje se tendrán aproximadamente 2750 ciclos.

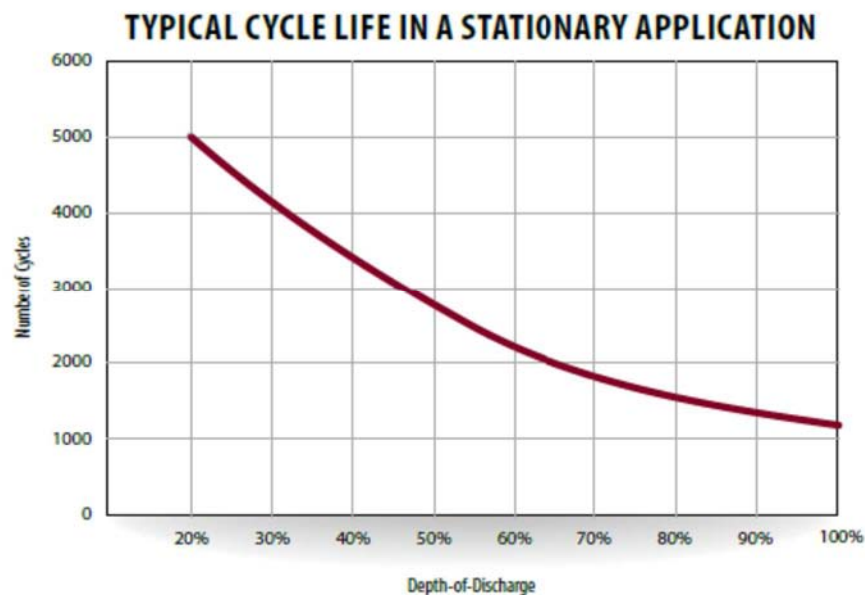


Figura 4.12. Ciclos de vida útil VS porcentaje de descarga en baterías TROJAN,

Por lo tanto, la capacidad del banco de baterías deberá aumentar al doble, para aumentar la vida útil de las mismas y será de 2094,75 Ah.

Otro dato relevante a tener en cuenta, es que se tendrá que adicionar un 10% debido a la energía consumida por el inversor de potencia.

Finalmente, la capacidad debe ser de 2.304,225 Ah.

Se seleccionan baterías Reliant de ciclo profundo de 6 voltios con C-max technology de 290 Ah tipo L16-AGM. Para lograr la capacidad y tensión necesaria se adopta una configuración requieren 10 baterías, para alimentar la carga requerida. de 3 baterías en serie y otras 7 en paralelo. Así se obtiene 2320Ah y 24V. Por lo tanto, se requieren 10 baterías, para alimentar la carga requerida.

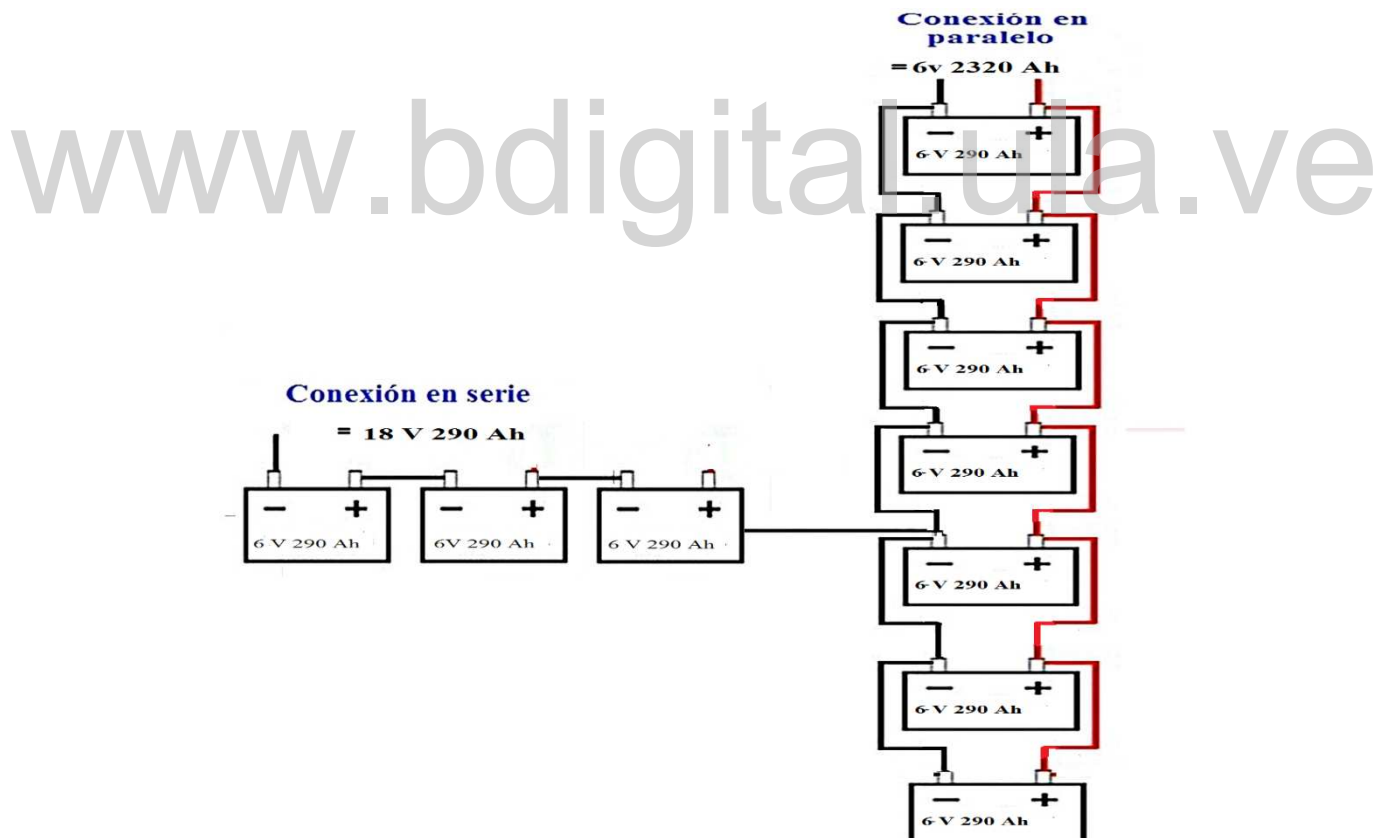


Figura 4.13. Esquema de conexión del banco de baterías TROJAN tipo L16-AGM.

CONCLUSIONES

La demanda de energía eléctrica en el mundo hace que las empresas distribuidoras tiendan a generar más energía para cubrir la demanda, esto conlleva a quemar más combustible para generar más energía eléctrica sin embargo esto requiere de combustibles fósiles que contaminan con CO₂ el medio ambiente, y debido a que los combustibles fósiles no son infinitos el ser humano se ha visto en la necesidad de implementar sistemas renovables que generen energía eléctrica de manera limpia o verde, la implementación de estos sistemas renovables conlleva a mucha inversión económica y hay sistemas que no son lo suficientemente rentables para invertir en ellos.

Debido a la alta demanda energética hoy en día, plantear formas de obtención de energía generada por otras fuentes no convencionales y amigables con el medio ambiente, son el principio de una nueva generación de sistemas energéticos.

Por lo tanto, la cosecha de energía apunta a capturar la energía que rodea a un sistema, para luego convertirla en energía eléctrica utilizable, siendo una de las tecnologías más amigables con el ambiente, en el caso del uso de los materiales piezoeléctricos para la cosecha de energía, debido a la propiedad de generar energía bajo deformación.

Así se puede concluir que los materiales piezoeléctricos permiten convertir señales eléctricas en ondas mecánicas, y, viceversa, como también, indicar que las características eléctricas y mecánicas de los dispositivos piezoeléctricos dependen del tipo de material y de las dimensiones geométricas. Además la temperatura a la que se expone el material piezoeléctrico y la deformación a la que se somete, tienen límites relacionados con la pérdida de las propiedades piezoeléctricas.

Por su parte el uso de materiales piezoeléctricos, por medio de la cosecha de energía, permite crear sistemas autónomos que no necesiten alimentación externa para su funcionamiento. Entre las aplicaciones de los materiales piezoeléctricos, un lugar importante ocupa los llamados generadores piezoeléctricos.

Asimismo en términos generales un generador piezoeléctrico convierte energía mecánica en eléctrica. Siendo importante resaltar o destacar que en función de la aplicación del generador piezoeléctrico, el diseño de esto incluye validar la cantidad de energía a generar en la deformación, el voltaje de salida, la carga potencial, las opciones de almacenamiento de la energía generada, etc.

En igual forma, el diseño de un piezoeléctrico analiza fenómenos eléctricos y mecánicos. En igual forma el modelo equivalente para un material piezoeléctrico más utilizado tiene dos variantes, una exclusivamente eléctrica, y, otra que incluye elementos electromecánicos.

Con base en la investigación sobre el *harvesting* (cosecha o recolección) de energía surge de la necesidad de encontrar energías alternativas que permitan cuidar el medio ambiente y satisfacer la creciente demanda de energía existente actualmente. Así pues el aprovechamiento de energía humana para resolver problemas en la escala humana, es una opción potencial que debe ser explotada.

El campo de aplicación de los materiales piezoeléctricos es tan amplio que abarca desde la recolección de energía, procesos industriales tales como ultrasonido, la utilización en electromedicina y el desarrollo de nanotecnología, entre otros. De todos ellos, el menos explotado es el de recolección de energía eléctrica. Solo pocas empresas se encuentran en proceso de investigación y desarrollo en esta aplicación, siendo la más relevante la empresa inglesa PAVEGEN, los cuales distribuyen y promocionan sus baldosas. Otra empresa pionera fue la israelí Innwattech, la cual vio el cierre definitivo de sus actividades en 2016.

Para terminar la evaluación del proyecto se tuvieron las siguientes consideraciones: el cálculo de potencia eléctrica del área de cuidados neonatales (P28) fue de 25,137 kW-h, para la evaluación de fabricante de baldosas se seleccionó al fabricante PAVEGEN debido a su trayectoria y a la facilidad de implementación e instalación de su producto. Para el cálculo de superficie de generación en el área del nivel plaza fue de 80 m² que equivale a 38 módulos de baldosas piezoeléctricas completos y para la Estimación de tránsito peatonal fue de 1400 personas durante 15 horas diarias.

Para finalizar el Diseño del sistema de cosecha de energía al caminar, simulando mediante la herramienta computacional un sistema de baldosas piezoeléctricas en las áreas con mayor flujo peatonal del Instituto Autónomo Hospital Universitario de Los Andes (IAHULA), dicha área es la entrada de acceso principal al nivel plaza.

En conclusión para determinar del banco de batería se eligieron baterías de ciclo profundo, las cuales requieren un ciclo de carga y descarga del 50% para maximizar su vida útil. Con estas consideraciones se obtienen 2750 ciclos (7,5 años). Se seleccionó para dicho banco 10 baterías Reliant de ciclo profundo de 6 voltios con C-max technology de 290 Ah tipo L16-AGM, resultando el banco de 24V y 2320 Ah.

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

La elaboración de este trabajo representa un aspecto positivo en lo que respecta a la aplicación del conocimiento de la ingeniería eléctrica en la creación de novedosas alternativas no contaminante, y que se recomienda considerarlo como referencia para futuros trabajos que se orienten en esa dirección.

Por otro lado, se propone también construir prototipos basados en otros modelos disponibles y probados de recientes investigaciones y que proporciona un mayor nivel de energía eléctrica generada.

De esta manera se recomienda:

- Buscar información de acceso restringido a través de diferentes bibliotecas universitarias ya que presenta ciertas ventajas como búsqueda avanzada de artículos, información reciente y archivos anexos.

- Futuras investigaciones deben establecer condiciones estándar de operación de los módulos de baldosas piezoeléctricas o indicadores normalizados para la evaluación y desempeño de las mismas, evitando así obtener resultados afectados por variables externas.

- Evaluar la construcción de este tipo módulos de baldosas piezoeléctricas a partir de materiales económicos, con diseños asequibles, de manera que se pueda incentivar la apropiación de esta tecnología a grandes escalas.

Con el fin de obtener mayor cantidad de energía eléctrica se recomienda:

- Ampliar el número de módulos de baldosas piezoeléctricas ya que producirán mayor cantidad de vibraciones mecánicas debido al flujo peatonal aprovechable para la producción de energía eléctrica.
- Llevar el trabajo a mayor escala.
- Se recomienda realizar un estudio en el cual se encuentre la zona más transitada de la universidad o en cualquier parte que se desee implementar el uso de las baldosas, de tal manera que se aproveche al máximo el uso de estas.
- Adicionalmente, con respecto al proyecto en sí, se recomienda un estudio de mecánica de suelos para saber en qué condiciones se encuentra el terreno del área del nivel plaza para la instalación de los componentes descritos en este proyecto.

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS

[1] E. Sepúlveda Orozco "Diseño de un colector de energía piezoeléctrico (energy harvesting) mediante optimización topológica que maximice la transformación de energía mecánica en eléctrica generada por un ser humano al caminar". Tesis Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2014.

[2] A. Erturk y D. J. Inman, "Piezoelectric energy harvesting". John Wiley & Sons, 2011

[3] J. Park, S. Lee, y B. M. Kwak, "Design optimization of piezoelectric energy harvester subject to tip excitation", J. Mech. Sci. Technol., vol. 26, No 1, pp. 137-143, enero. 2012.

[4] J. Paulo y P. D. Gaspar, "Review and future trend of energy harvesting methods for portable medical devices", 2010

www.bdigital.ula.ve

[5] M. T. Penella y M. Gasulla, "A review of commercial energy harvesters for autonomous sensors", en IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007, 2007, pp. 1-5.

[6] R. P. Areny, "Sensores y acondicionadores de señal: prácticas". Marcombo, Barcelona, España, 2004.

[7] A. Morales Espitia, J. Contreras Calderón "Análisis de conveniencia de la implementación de la energía piezoeléctrica en las salas de Cinecolombia en la ciudad de Bogotá D.C.". Tesis Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C, 2016.

[8] D. Jia y J. Liu, "Human power-based energy harvesting strategies for mobile electronic devices", Front. Energy Power Eng. China, vol. 3, No 1, pp. 27-46, mar. 2009.

[9] D. J. Morton, "Human locomotion and body form a study of gravity and man". Baltimore: Williams & Wilkins, 1952.

[10] T. Starner y J. A. Paradiso, "Human generated power for mobile electronics", en Low-Power Electronics Design, CRC Press, 2004, p. 896.

[11] D.A. Tamayo Zapata, N.K. Cardozo Gutiérrez "El uso de piezoeléctricos para la generación de energía sostenible como proyecto piloto en un perfil vial de Bogotá". Tesis Pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C, 2017.

[12] A. Khaligh, P. Zeng and C. Zheng, "Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies—state of the art" ,in IEEE Transactions on Industrial Electronics ,vol. 57, No. 3, pp. 850-860, March 2010.

[13] T. Starner, "Human-powered wearable computing" ,IBM Syst. J., vol. 35, No. 3/4, pp. 618–629, 1996.

[14] K.H. Dasuki Garcia "Sistema de cosecha de energía a partir del movimiento del cuerpo humano para un sensor wearable de pulso cardiaco". Tesis pregrado, Fundación Universidad del Norte, Barranquilla, 2018.

[15] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, "A piezoelectric frequency up-converting energy harvester with rotating proof mass for human body applications", Sensors Actuators A. Phys., vol. 206, pp 178-185, 2014

[16] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices" ,Proc. IEEE, vol. 96, No. 9, pp. 1457–1486, 2008

[17] S. Khalifa, M. Hassan and A. Seneviratne, "Step detection from power generation pattern in energy-harvesting wearable devices", 2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems , Sydney, NSW, 2015, pp. 604-610.

[18] Y. Masuda, A. Noda and H. Shinoda, "Whole body human power-based energy harvesting using a conductive embroidered cloth and a power aggregation circuit", 2018 IEEE 15th International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN) , Las Vegas, NV, 2018, pp. 214-217.

[19] H. Kalantarian and M. Sarrafzadeh, "Pedometers without batteries: an energy harvesting shoe", in IEEE Sensors Journal , vol. 16, No. 23, pp. 8314-8321, Dec.1, 2016.

[20] L.V Arévalo Lizarazo, D.A Lamprea Beltrán "Diagnóstico para la implementación de baldosas piezoeléctricas como alternativa de energía renovable en la universidad santo Tomás Villavicencio campus aguas claras". Tesis pregrado, Universidad Santo Tomás, Villavicencio, 2019.

[21] Heinrich Kuttruff, "Ultrasonics: fundamental and applications" (1989).

[22] P. Ordóñez Cebrián "Estudio del comportamiento de una cerámica piezoeléctrica mediante elementos finitos". Tesis Master, Universidad Politécnica de Valencia, Gandía, 2011.

[23] J.A Gallego Juárez, "Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers". Instituto de Acústica CSIC. Madrid, España.

[24] «Wikipedia La enciclopedia libre,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricidad>. [Último acceso: 13 marzo 2020].

- [25] N. Castellanos, "Evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación", *Inventum*, No 15, p. 37, 2013.
- [26] Á. Gómez Molina "Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos". Tesis Master, Universidad de Alcalá . Escuela Politécnica Superior, 2018.
- [27] S. Martínez-Murillo Alejano "Análisis de vigas con materiales piezoeléctricos". Tesis Pregrado, Universidad Carlos III de Madrid.
- [28] «Nano Days,» [En línea]. Available: https://www.nisenet.org/sites/default/files/catalog/uploads/spanish/12194/electricsqueeze_images_13nov13_sp.pdf. [Último acceso: 13 Marzo 2020].
- [29] IEEE Standard on Piezoelectricity 1987 ANSI/ IEEE Standard 176-1987
- [30] S. Priya, D. J. Inman, "Energy harvesting technologies". Springer 2009.
- [31] A. Erturk y D. J. Inman, "Piezoelectric energy harvesting". John Wiley & Sons, 2011.
- [32] S.O. Reza Moheimani and Andrew J. Fleming, "Piezoelectric transducers for vibration control and damping". Springer 2006.
- [33] D. M. Prendes Hurtado "Generación de energía mediante piezoeléctricos en vías ferroviarias". Tesis Pregrado, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2016.
- [34] <http://sensortechcanada.com/technical-notes/articles/navy-type-pzt/>.
- [35] <http://www.bostonpiezooptics.com/equivalent-ceramic-materials>.
- [36] A. Martín Malmcrona "Aplicaciones del efecto piezoeléctrico para la generación de energía". Tesis Pregrado, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2018.

[37] E. Suaste Gomez, “Piezoelectric ceramics”. 2010.

[38] A. Khaligh, P. Zeng, and C. Zheng, “Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies 2014;state of the art”, *Ind. Electron. IEEE Trans.*, vol. 57, No. 3, pp. 850–860, 2010.

[39] E. L. Horsley, M. P. Foster, D. a Stone, and M. Street, “State-of-the-art piezoelectric transformer technology keywords piezoelectric transformer designs”, *Epe*, pp. 1–10, 2007.

[40] A. Ramos and C. Ferreira, “System for micro generation and energy storage, state of the art – example of the piezoelectric effect”, 2016. 102

[41] S. R. P. S. R. Platt, S. F. S. Farritor, and H. H. H. Haider, “On low-frequency electric power generation with PZT ceramics”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 10, No. 2, pp. 240–252, 2005.

[42] C. Sun, G. Shang, X. Zhu, Y. Tao, and Z. Li, “Modeling for piezoelectric stacks in series and parallel”, *Proc. 2013 3rd Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl. ISDEA 2013*, vol. 0, pp. 954–957, 2013.

[43] Web Corporativa de REE, “Red electrica de españa”, 28 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/red21/almacenamiento-energetico>. [Último acceso: 28 Mayo 2021].

[44] A. Oliveros "Estudio de la carga actual, calidad de la energía eléctrica y optimización del sistema eléctrico del instituto autónomo hospital universitario de los andes (IAHULA.)". Tesis Pregrado, Universidad de los Andes, Mérida, 2009.

[45] D. B. M. M. Alfredo González, " Métodos de estimación de la demanda en sistemas electricos de baja tension",energética, vol. Vol. XXVIII, No. 3, pp. 20, 21, 22, 23, 2007.

[47] Transparency international, "Transparencia venezuela", [En línea]. Available: <http://www.transparencia.org.ve>. [Último acceso: 20 04 2020].

[48] EPIKEIA, "Ula observatorio de derechos humanos", [En línea]. Available: <http://www.uladdhh.org.ve>. [Último acceso: 20 04 2020].

[49] E. Ojeda "Diseño de instalación de baldosas piezoeléctricas para iluminar multicancha en la sede viña del mar". Tesis Pregrado, Universidad Técnica Federico Santa María, sede viña del mar – José Miguel Carrera, 2019.

[50] Autodesk, «autodesk,» 20 Febrero 2021. [En línea]. Available: <https://latinoamerica.autodesk.com/products/autocad/overview>. [Último acceso: 25 Mayo 2021].

[51] Autosolar, «autosolar,» 25 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://autosolar.es/baterias-de-litio> . [Último acceso: 25 Mayo 2021].

[52] Monsolar, «monsolar,» 25 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.monsolar.com/fotovoltaica-aislada/baterias/monoblock/gel.html>. [Último acceso: 25 Mayo 2021].