



Facultad de Ciencias
VNIVERSIDAD
DE SALAMANCA



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID Y SALAMANCA

FACULTAD DE CIENCIAS

Máster en Semiconductores y Tecnologías Electrónicas

**RECOLECTORES PIEZOELÉCTRICOS APLICADOS A
SENSORES IOT DE BAJO CONSUMO PARA
ENTORNOS AGRÍCOLAS.**

Autor:

Sergio Carrasco Hernández

Tutor:

Salvador Dueñas Carazo

Cotutor:

María Helena Castán Lanaspá

Grupo de Caracterización de Materiales y Dispositivos Electrónicos

Valladolid, junio 2025



Máster en Semiconductores y Tecnologías Electrónicas
Sergio Carrasco Hernández





Resumen

El presente Trabajo de Fin de Máster se centra en el estudio y análisis del estado del arte en tecnologías de recolección de energía piezoeléctrica (PEH), con el objetivo de evaluar su viabilidad en sistemas autónomos de sensores para aplicaciones en agricultura inteligente.

El trabajo incluye una amplia revisión bibliográfica sobre el fenómeno piezoeléctrico, los distintos tipos de recolectores, sus configuraciones estructurales, materiales empleados, y los circuitos de interfaz más habituales para la gestión de la energía generada.

A partir del conocimiento adquirido, se plantea en la parte final del trabajo un diseño preliminar de prototipo, que integra un recolector piezoeléctrico, sensores de humedad, temperatura y luminosidad, un microcontrolador y un sistema de gestión energética. Este diseño se propone como ejemplo de aplicación de los conceptos estudiados, con el objetivo de posibilitar en el futuro la implementación de sistemas autosuficientes para la monitorización de variables ambientales en entornos agrícolas.

El trabajo establece así una base teórica y de diseño que puede servir de referencia para desarrollos posteriores en el campo de las redes de sensores autónomos aplicados a la agricultura.

Palabras clave

Recolección de energía piezoeléctrica, sensores IoT, sistemas autónomos, bajo consumo.



Abstract

This Master's thesis focuses on studying and analysing the current state of piezoelectric energy harvesting (PEH) technologies, with the aim of assessing their potential use in autonomous sensor systems for smart agricultural applications.

It includes an extensive review of the literature on the piezoelectric phenomenon, the various types of harvesters, their structural configurations and the materials used, as well as the most common interface circuits for managing the generated energy.

Building on this knowledge, the final section of the thesis presents a preliminary prototype design integrating a piezoelectric harvester, humidity, temperature and luminosity sensors, a microcontroller, and an energy management system. This design is presented as an example of applying the studied concepts, with the intention of enabling the future implementation of self-sufficient systems for monitoring environmental variables in agricultural environments.

Thus, the work establishes a theoretical and design basis that can serve as a reference for further developments in the field of autonomous sensor networks applied to agriculture.

Keywords

Piezoelectric energy harvesting, IoT sensors, stand-alone systems, low power consumption.



Palabras abreviadas

IoT – Internet of Things

WS Nodes – Wireless Sensor Nodes

WS Network – Wireless Sensor Network

MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems

PZT – Lead Zirconate Titanium (Pb-Zr-Ti)

PEHs – Piezoelectric Energy Harvesters

GEMC – Generalized Electromechanical Coupling Factor

PMN-PT - Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate

PVDF – Poly Vinylidene Fluoride

TrFE – Trifluoroetilene

SECE – Synchronous Electric Charge Extraction

NVC – Negative Voltage Converter

RH – Relative Humidity

GPIO – General Purpose Input/Output

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Fiel Effect Transistor

ADC – Analog to Digital Converter

PCB – Printed Circuit Board

BLE – Bluetooth Low Energy

TEG – Thermal Electric Generator

Índice de contenido

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	11
Capítulo 1.1. ORIGEN DEL PROYECTO.	11
Capítulo 1.2. OBJETIVOS.....	12
Capítulo 1.3. METODOLOGÍA.	12
Capítulo 2. RECOLECTORES DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICOS.....	15
Capítulo 2.1. PRINCIPIO PIEZOELÉCTRICO Y RECOLECTORES DE ENERGÍA.	16
Capítulo 2.2. REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA EN SENSORES INTELIGENTES.	18
Capítulo 2.3. FUENTES DE ENERGÍA DE LOS RECOLECTORES PIEZOELÉCTRICOS.	20
Capítulo 2.4. MODELADO DE RECOLECTORES DE ENERGÍA DE VIBRACIÓN.	22
Capítulo 2.4.1. Modelo general.....	22
Capítulo 2.4.2. Circuito equivalente.....	24
Capítulo 2.4.3. Potencia generada.	25
Capítulo 2.5. MODELADO DE UN RECOLECTOR PIEZOELÉCTRICO.	27
Capítulo 2.5.1. Modelo general.....	27
Capítulo 2.5.2. Circuito equivalente.....	29
Capítulo 2.5.3. Potencia de salida.	30
Capítulo 2.6. CONEXIONES EN SERIE Y PARALELO DE LOS PEH.....	31
Capítulo 3. TIPOS DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS DE VIBRACIÓN.....	33
Capítulo 3.1. CLASIFICACIÓN ESTRUCTURA GEOMÉTRICA.	33
Capítulo 3.1.1. Estructura de viga voladiza o cantilever.	33
Capítulo 3.1.2 Estructuras de vigas guiadas o de tipo puente.	36
Capítulo 3.1.3 Estructuras de puente pandeadas.	38
Capítulo 3.1.4 Estructuras de diafragma.....	38
Capítulo 3.1.5 Estructuras de tipo platillo.....	38
Capítulo 3.1.6 Estructura piezoeléctrica apilada.....	39
Capítulo 3.1.7 Otras tipologías.	39
Capítulo 3.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN MODO DE OPERACIÓN.....	40
Capítulo 3.2.1. PEH de vibración libre.	40
Capítulo 3.2.2. PEH de vibración forzada.	41
Capítulo 3.3. CLASIFICACIÓN SEGÚN NÚMERO DE CAPAS FUNCIONALES.....	42
Capítulo 3.3.1. PEH unimorfo.....	42
Capítulo 3.3.2. PEH bimorfo.	43
Capítulo 3.3.3. PEH multicapa.	44



Capítulo 3.4. CLASIFICACIÓN SEGÚN MATERIALES.	44
Capítulo 3.5. RESUMEN.	46
Capítulo 3.6. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO DE PEH.	47
Capítulo 3.7. EJEMPLOS GRÁFICOS DE PEH.	47
Capítulo 4. CIRCUITOS DE INTERFAZ.	51
Capítulo 4.1. RESISTENCIA COMO CARGA.	51
Capítulo 4.2. RECTIFICADOR DE PUENTE COMPLETO CON CONDENSADOR.	52
Capítulo 4.3. EXTRACCIÓN DE CARGA SÍNCRONA.	54
Capítulo 4.4. COMPARACIÓN ENTRE CARGA RESISTIVA, RECTIFICADOR DE PUENTE Y SECE.	56
Capítulo 4.4.1. Influencia del factor de acople electromecánico Γ	56
Capítulo 4.4.2. Influencia de la frecuencia de resonancia.	58
Capítulo 5. NODO SENSOR DE PARÁMETROS DE INTERÉS PARA LA APLICACIÓN PROPUESTA. .	59
Capítulo 5.1. SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA AIRE Y TEMPERATURA.	59
Capítulo 5.2. SENSOR HUMEDAD SUELO.	60
Capítulo 5.3. SENSOR DE LUMINOSIDAD.	62
Capítulo 5.4. SENSOR DE CONSUMO (OPCIONAL).	63
Capítulo 5.5. MICROCONTROLADOR.	64
Capítulo 5.6. GESTOR DE CARGA.	64
Capítulo 5.7. RECOLECTOR PIEZOELÉCTRICO.	65
Capítulo 6. DISEÑO FINAL DEL SISTEMA, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.	67
Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA.	71



Índice de figuras

Figura 1 Celda unitaria de PZT indicando su estructura cristalina y la existencia de simetría de inversión según su temperatura sea superior o inferior a la temperatura de Curie. [4]	17
Figura 2 Polarización de un material cerámico piezoeléctrico según su polaridad sea a) dominio de Weiss o b) polarizado por un campo eléctrico. [4]	17
Figura 3 Modos de operación de un material piezoeléctrico. a) d_{33} y b) d_{31} . [4]	18
Figura 4 Diagrama de bloques de un WS Node. [4]	19
Figura 5 Consumo de potencia para varias aplicaciones de IoT y densidades de potencia de varias fuentes de energía. [2]	20
Figura 6 Experimento de recolección de energía a partir de dos recolectores piezoeléctricos en tandem, corriente arriba y corriente abajo. [1]	21
Figura 7 a) Voltaje de salida para el Uperstream Piezoelectric Energy Harvester (UPEH) y b) del Downstream Piezoelectric Energy Harvester (DPEH) con velocidad del fluido de 0,23m/s. [1].	21
Figura 8 Simulaciones SR y resultados experimentales ER de los recolectores de energía piezoeléctricos en tandem usando como fuente un flujo de agua constante. [1]	22
Figura 9 Modelo general de un microgenerador basado en vibraciones. [4]	23
Figura 10 Circuito equivalente de un recolector piezoeléctrico. [4]	24
Figura 11 Potencia de salida del recolector de energía cinética de vibración en función de la frecuencia de excitación normalizada. [4]	26
Figura 12 Viga de un material piezoeléctrico usado en un PEH en modo d_{31} . [4]	27
Figura 13 Circuito equivalente desacoplado de un PEH a) sin considerar las pérdidas en el dieléctrico y b) considerando las pérdidas. [4]	29
Figura 14 Circuito equivalente de un PEH acoplado electromecánicamente. Las fuentes controladas pueden ser a veces reemplazadas por un transformador. [4]	29
Figura 15 Circuito equivalente simplificado de un PEH, donde se considera el factor de acople electromecánico para los elementos del dominio mecánico. [4]	30
Figura 16 Circuito equivalente de un PEH con carga compleja conjugada. [4]	31
Figura 17 Circuito equivalente de un PEH simplificado con carga compleja conjugada. [4]	31
Figura 18 Circuito equivalente simplificado de dos capas piezoeléctricas conectadas en serie. [6]	32
Figura 19 Circuito equivalente simplificado de dos capas piezoeléctricas conectadas en paralelo. [6]	32
Figura 20 Recolector piezoeléctrico de viga simple en voladizo. [5]	33
Figura 21 Frecuencia de resonancia de una viga en voladizo a) sin masa y b) con masa en su extremo. [5]	34
Figura 22 Frecuencia de resonancia frente a la longitud de la viga voladiza con diferentes espesores. [5]	34
Figura 23 Distribución de potencial eléctrico en un cantiléver. [5]	34
Figura 24 Desplazamiento de las vigas en voladizo o cantiléver para una frecuencia de excitación de 681.061Hz. [5]	35
Figura 25 Principio de diseño del ancho de banda en PEH. a) Salida de cada uno de los recolectores. b) Salida de la combinación en serie o paralelo. [2]	36
Figura 26 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo puente. [2]	37



Figura 27 Estructura de viga guiada. [5].....	37
Figura 28 Distribución del potencial eléctrico según la longitud de la viga guiada. [5]	37
Figura 29 Diseño de un PEH guiado por cuatro vigas. [5]	37
Figura 30 Frecuencia de resonancia de una estructura guiada por cuatro vigas. [5]	37
Figura 31 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo puente pandeado. [2] 38	
Figura 32 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo diafragma. [2]	38
Figura 33 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo platillo. [2].....	39
Figura 34 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico apilado. [2]	39
Figura 35 Recolectores de energía de vibración no lineales. a) Recolector de repulsión biestable magnética b) Recolector de atracción magnética c) Recolector de viga pandeada. [2]	40
Figura 36 Diseño estructural de un PEH de puente pandeado. [2].....	41
Figura 37 Diseño estructural y fotografía de un PEH de tambor abombado. [2]	41
Figura 38 Esquemático de un PEH de tipo puente pandeado. [2]	41
Figura 39 Ilustración del principio de funcionamiento de un PEH de vibración forzada. [2].....	42
Figura 40 Diagrama de un PEH unimorfo. [6]	43
Figura 41 PEH bimorfo en a) serie b) paralelo. [4]	43
Figura 42 Rendimiento de las diferentes morfologías para diferentes resistencias de carga. [2]	44
Figura 43 a) Modelo 3D de un PEH en forma de I b) Esquemático de un PEH en forma de I. c) Foto real del PEH. [2].....	48
Figura 44 fotografía de un PEH bimorfo encapsulado. [2].....	48
Figura 45 Recolector de energía aeroelástico. [2]	49
Figura 46 Posibles localizaciones de diferentes PEH en una persona. [2]	49
Figura 47 Circuito de interfaz con resistencia como carga. [4]	51
Figura 48 PEH con un rectificador de puente completo de diodos y una carga compuesta por una resistencia y un condensador. [4]	52
Figura 49 Formas de onda de la tensión de salida del PEH, el movimiento de la masa y la corriente que circula por el condensador C_{buf} . [4].....	53
Figura 50 PEH con interfaz SECE y una carga. [4].....	54
Figura 51 Formas de onda típicas de voltaje de salida del PEH V_p , el movimiento de la masa, la corriente a través de la bobina, IL y las señales de control de los interruptores. [4]	55
Figura 52 Potencia recolectada normalizada con resistencia como carga, asumiendo frecuencia de excitación como la frecuencia de resonancia. [4]	56
Figura 53 Potencia recolectada normalizada con rectificador y condensador como carga, asumiendo frecuencia de excitación como la frecuencia de resonancia. [4]	56
Figura 54 Potencia recolectada normalizada con SECE y condensador como carga, asumiendo frecuencia de excitación como la frecuencia de resonancia. [4]	56
Figura 55 Comparación de la potencia recolectada normalizada de los tres circuitos de interfaz propuestos en función del factor de acoplamiento electromecánico con $RL = 10k\Omega$. [4].....	57
Figura 56 Potencia recolectada normalizada para SECE, rectificador-condensador y resistencia como carga para a) frecuencia de resonancia y b) fuera de la frecuencia de resonancia. $I^2 = 0.56 \cdot 10^{-6} A^2$, $z = 45\mu m$. [4]	58
Figura 57 Circuito típico de aplicación para el SHTC3 con resistencias de pull-up y un condeador de desacoplo. [7]	60
Figura 58 Sensor de humedad del suelo SKU SEN0193. Dimensiones y vista superior de la PCB. [8]	60



Figura 59 Esquema eléctrico del sensor SKU SEN0193. [9]	61
Figura 60 Representación de la variación de tensión del sensor SKU SEN0193 con la capacidad del suelo.	62
Figura 61 Sensor VEML7700. [10]	62
Figura 62 Esquema de conexión del VEML7700. [10]	63
Figura 63 Circuito eléctrico y layout recomendable para el INA226. [11]	63
Figura 64 ESP32-S3 mini.	64
Figura 65 Esquema eléctrico típico del BQ25570 para un PEH. [12]	65
Figura 66 Modelos de recolectores piezoeléctricos de Volture (Piezo o antigua Midé). [13]	65
Figura 67 Conexión en serie o paralelo de los modelos de Volture. [13]	66
Figura 68 Rendimiento típico del modelo V22B a 80Hz. [13]	66
Figura 69 Esquema eléctrico propuesto.	68



Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.

Capítulo 1.1. ORIGEN DEL PROYECTO.

Este Trabajo de Fin de Máster surge del interés personal del autor en el desarrollo de tecnologías que permitan desplegar sensores en ubicaciones de difícil acceso, minimizando los desafíos asociados a su mantenimiento. Entre otros desafíos destacan la necesidad de fuentes de energía alternativas, la recarga o sustitución de baterías y la complejidad derivada de la monitorización remota y de la propia instalación de estos sistemas.

En este contexto, la recolección de energía piezoeléctrica se presenta como una posible solución, permitiendo eliminar la necesidad de recarga o reemplazo de baterías al aprovechar vibraciones mecánicas del entorno para generar energía. Sin embargo, esta tecnología parte de sus propias limitaciones y retos debido, entre otras cosas, a la baja frecuencia de muchas de las fuentes de vibración ambiental que están situadas por debajo de los 200Hz. Este hecho limita el rendimiento de los recolectores piezoeléctricos tradicionales pues el punto de máxima eficiencia generalmente se encuentra a frecuencias de resonancia mayores.

El interés del autor por los recolectores piezoeléctricos viene de la combinación entre el estudio de los fenómenos físicos de los semiconductores y el diseño de circuitos electrónicos capaces de aprovechar dichas propiedades. En particular el proyecto se orienta al desarrollo de un sensor autosuficiente destinado a aplicaciones agrícolas, un ámbito donde las soluciones energéticamente autónomas pueden aportar un valor significativo.

Debido además al auge de los sistemas IoT implementados en hogares inteligentes, edificios inteligentes, industria 4.0, ciudades inteligentes, redes de dispositivos portables, monitorización de constantes vitales, implantes médicos, etc, la era del IoT está migrando gradualmente hacia un enfoque basado en sistemas autónomos energéticamente. En comparación con las baterías convencionales, la tecnología de recolección de energía ambiental ofrece ventajas significativas para sistemas IoT, como una mayor autonomía, la posibilidad de funcionamiento continuo sin necesidad de recarga, mayor portabilidad, sostenibilidad, y una reducción del peso y del volumen de los dispositivos. [1] [2]

En el marco concreto de la agricultura inteligente que se usa como ejemplo de implementación de un sensor alimentado mediante un recolector piezoeléctrico, los avances tecnológicos permiten mejorar la producción a través de inteligencia artificial, el internet de las cosas (IoT) y la automatización de procesos. Como ejemplo de las capacidades de sistemas IoT en este sector junto con sistemas de visión artificial y Big Data podrían predecir con mayor precisión el crecimiento de plantas como el maíz, permitiendo detectar y resolver posibles defectos y mejorando la calidad de los cultivos [3].



En el desarrollo de este TFM se propondrá un sistema basado en varios sensores, permitiendo sentar las bases de un sensor IoT capaz de transformar energía mecánica en eléctrica de forma autónoma para aprovecharla en sus propias actividades, permitiendo así medir parámetros de vital importancia para el entorno agrícola.

Capítulo 1.2. OBJETIVOS.

Objetivos de investigación:

- Estudiar el efecto piezoeléctrico.
- Estudiar las posibles fuentes de las que obtener energía.
- Estudiar los diferentes recolectores piezoeléctricos y sus eficiencias.

Objetivos de implementación:

- Plantear una posible aplicación real, explorando sensores y microcontroladores de bajo consumo como candidatos para un diseño autónomo basado en recolección de energía.
- Buscar un circuito de acople o acondicionamiento adecuado para poder usar la energía generada.
- Sentar las bases para el desarrollo hardware y software de un dispositivo IoT que permita medir tanto el rendimiento del sistema como los parámetros ambientales deseados.

Capítulo 1.3. METODOLOGÍA.

La metodología empleada en este TFM se estructura en torno a un enfoque por fases, coherente con los contenidos desarrollados en el índice. El proyecto se ha concebido en una primera etapa de investigación y otra de diseño con el objetivo de definir un prototipo funcional basado en recolección piezoeléctrica capaz de alimentar sensores y un microcontrolador orientados a aplicaciones IoT. Las fases del trabajo incluyen la investigación del fenómeno piezoeléctrico y los modelos matemáticos asociados, la caracterización de los diferentes tipos de dispositivos según su estructura, modos de operación y materiales, así como análisis de circuitos de interfaz para el acoplamiento energético. A partir de los conocimientos obtenidos se plantea un sistema teórico compuesto por el recolector piezoeléctrico como fuente de energía, los sensores y en controlador, que serviría como base para la futura implementación práctica y validación experimental, prevista para fases posteriores del proyecto.

Este plan de trabajo se inicia con la definición de los objetivos fundamentales, que orientarán la investigación y el desarrollo del tema propuesto. A partir de estos objetivos, se profundizará en el estudio del principio piezoeléctrico adecuado para el contexto planteado como fuente de energía, los requisitos energéticos en sensores inteligentes, así como las magnitudes que interesan medir en un entorno agrícola. Con el fin de plantear un posible prototipo a desarrollar en futuras etapas, se propondrá un



recolector piezoeléctrico que se ajuste a la situación concreta, junto con sensores y un controlador IoT de bajo consumo que podrían permitir la monitorización de parámetros en un entorno como puede ser un invernadero.

De esta forma se pretende abarcar un proyecto que parta de la investigación de un fenómeno físico que permita la recolección de energía y culmine con las bases para una futura implementación de un sensor totalmente autónomo para la recolección de datos en este tipos de entornos.



Máster en Semiconductores y Tecnologías Electrónicas
Sergio Carrasco Hernández





Capítulo 2. RECOLECTORES DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICOS.

En los últimos años los recolectores de energía han disminuido en tamaño y además incrementado en potencia de salida, lo que los hace atractivos para aplicaciones de alimentación de nodos de sensores (WS Nodes – Wireless Sensor Nodes) los cuales son originalmente a base de baterías. Estos nuevos y mejorados sistemas permiten prolongar el tiempo de vida de estos nodos y minimizar su mantenimiento. Varios WS Nodes podrían llegar a conectarse entre sí para formar una red de dispositivos o WS Network para aplicaciones como medidas de microclimas en agricultura, medición de tráfico y detección de humanos en edificios actuando como sensores. [4] [5]

Los recolectores de energía, terminología empleada para dispositivos a microescala que convierten pequeñas cantidades de energía del ambiente en energía eléctrica, presentan muchos mecanismos de conversión. Probablemente la fuente de energía más conocida sea la energía solar empleando células fotovoltaicas, pero también existen mecanismos basados en gradientes de temperatura empleando el efecto Seebeck, en las ondas de radio frecuencia de las telecomunicaciones y a partir de movimientos, vibraciones u ondas de sonido empleando principios de conversión capacitivos, inductivos y piezoeléctricos. Estos últimos se implementan en MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), tecnologías con componentes mecánicos y eléctricos integrados en una misma estructura microscópica, lo que permite la integración de partes móviles como vigas en voladizo con componentes electrónicos. [4] [5]

El principio capacitivo se basa en el movimiento de una de las dos placas que forman un condensador con respecto a la otra, lo que provoca que la energía almacenada se mueva a través de una carga. El principio inductivo emplea un imán permanente que se mueve con respecto a un bobinado, induciendo voltajes en esta bobina. Por último, el efecto piezoeléctrico surge de esfuerzos mecánicos en un material piezoeléctrico que produce una separación de las cargas en el material lo que las convierte en una diferencia de voltaje entre las diferentes capas del material.

Como se observa en la Tabla 1, los diferentes métodos de recolección en base a vibraciones presentan diferentes características, entre las que los piezoeléctricos destacan en densidad de almacenamiento energética y facilidad de integración en MEMS, lo que justifica su análisis en profundidad en los siguientes apartados. [4]



MÉTODO DE RECOLECCIÓN	FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN	REQUERIMIENTOS	IMPEDANCIA DE SALIDA	CORRIENTE DE SALIDA	VOLTAJE DE SALIDA	EFICIENCIA	DENSIDAD ALMACENAMIENTO ENERGÉTICA
Capacitivo	Fácil de crear en MEMS	Polarización o carga inicial	Alta	Baja	Alto $> 100V$	Baja	Muy baja
Inductivo	Fácil de crear resortes, imanes y bobinados en MEMS	Rectificadores y elevadores de alta eficiencia	Media	Alta	Bajo $< 1V$	Baja (poca eficiencia en imanes planares)	Baja
Piezoeléctrico	Fácil de depositar materiales piezoeléctricos en MEMS	Requiere estrés mecánico	Alta	Baja	Alto	Poco tiempo de vida y gran fragilidad	Alta

Tabla 1 Resumen de las principales características de los recolectores de energía a basados en vibraciones.

Capítulo 2.1. PRINCIPIO PIEZOELÉCTRICO Y RECOLECTORES DE ENERGÍA.

La piezoelectricidad es la forma de convertir energía mecánica en energía eléctrica y viceversa a partir de materiales principalmente cerámicos y cristales que pertenecen a determinadas clases. Estos materiales exhiben un efecto piezoeléctrico que se puede dividir en dos tipos según la dirección de la conversión de energía: El efecto de generar cargas eléctricas conforme a una deformación en el material al aplicarle determinadas fuerzas se denomina efecto piezoeléctrico directo. Por el contrario, existe el fenómeno denominado efecto piezoeléctrico inverso, a partir del cual se puede crear una deformación cuando se somete al material a un campo eléctrico. [4] [6]

Los materiales piezoeléctricos son sólidos como los cerámicos o los cristales que no presentan simetría de inversión, es decir, si se invierten las coordenadas espaciales respecto a un punto central, su estructura no permanece idéntica. Estos materiales pueden generar cargas eléctricas bajo determinadas fuerzas aplicadas en su estructura. Un ejemplo de un material que puede presentar o no simetría de inversión es el PZT o plomo circonato titanio. Si no se supera la temperatura de Curie del material, se presenta una estructura dónde el átomo de zirconio o de titanio se desplaza fuera del centro de la celda unitaria como se puede observar en la Figura 1.

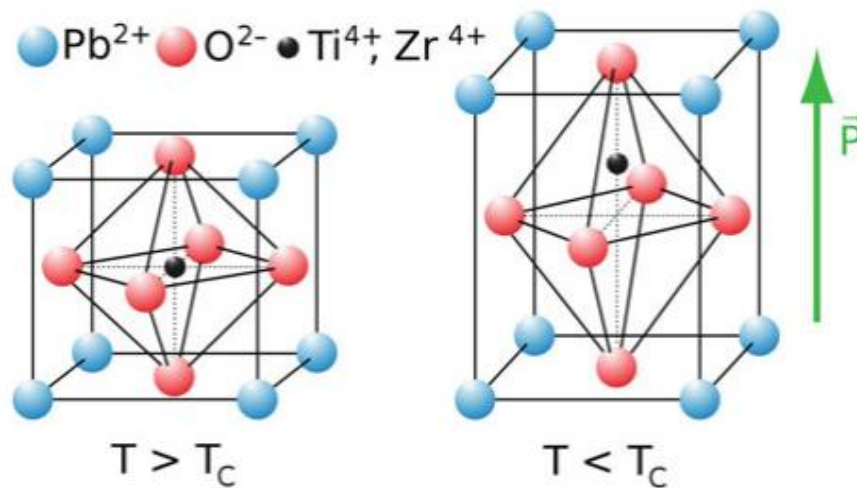


Figura 1 Celda unitaria de PZT indicando su estructura cristalina y la existencia de simetría de inversión según su temperatura sea superior o inferior a la temperatura de Curie. [4]

En los materiales cerámicos este desplazamiento crea un dipolo asimétrico que al reproducirse a lo largo del material de forma natural y en direcciones aleatorias crea el denominado dominio de Weiss, lo que permite que de forma macroscópica no se aprecie el efecto piezoeléctrico como se puede observar en la Figura 2a. Si a este material se le aplica un fuerte campo eléctrico se alinean de forma permanente los dominios de Weiss (Figura 2b) de los diferentes cristales del material policristalino y este material presentará propiedades piezoeléctricas.

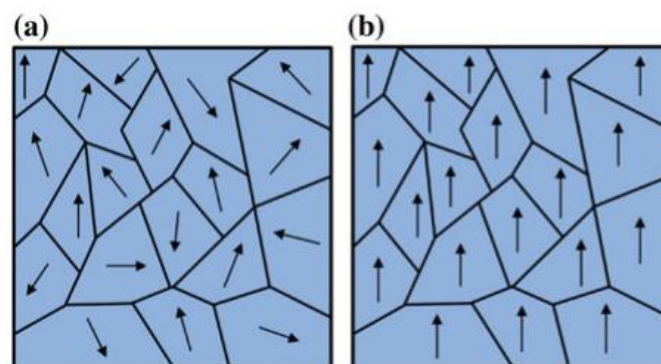


Figura 2 Polarización de un material cerámico piezoeléctrico según su polaridad sea a) dominio de Weiss o b) polarizado por un campo eléctrico. [4]

En los recolectores piezoeléctricos se emplea el efecto piezoeléctrico directo para captar energía, funcionando el sistema más como un sensor que como un actuador. En estos dispositivos la tensión observada dependerá directamente de la deformación aplicada. Existen varias configuraciones determinadas por números dependiendo de la dirección en la que se genere la diferencia de potencial y en la que se aplique la fuerza. En los modos d_{33} y d_{31} de la Figura 3 las direcciones en las que se obtiene el voltaje se definen por el mismo número, el 3, mientras que la dirección de la fuerza aplicada está alineada en el eje 3 para el caso a) y alineada en el eje 1 para el caso b). Generalmente el modo

d_{31} es el más usado para recolectores piezoeléctricos, empleando para ello estructuras más complejas como se detallará más adelante. [4] [5]

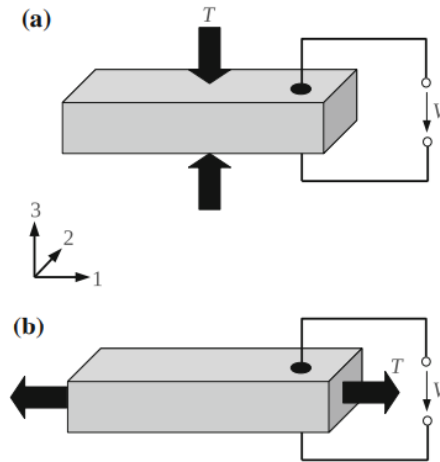


Figura 3 Modos de operación de un material piezoeléctrico. a) d_{33} y b) d_{31} . [4]

Capítulo 2.2. REQUERIMIENTOS DE ENERGÍA EN SENSORES INTELIGENTES.

Los avances en la electrónica de baja potencia han reducido en consumo energético de las unidades de procesamiento de señales por debajo de los $100\mu\text{W}$, lo que permite alimentar dispositivos a pilas o baterías durante unos pocos meses, requiriendo un reemplazo o recarga de baterías frecuente. Gracias además a la introducción de modos de bajo consumo en los microcontroladores como *Sleep* o *Deep sleep* y a los avances en los recolectores energéticos que permiten obtener potencias en un rango de 10 a $100\mu\text{W}$, se ven viables aplicaciones de nodos de sensores alimentados por estos sistemas de obtención de energía. [4]

Un nodo sensor inalámbrico (WS Node) está compuesto generalmente por un bloque de gestión de energía que controla la energía proveniente del ambiente o del almacenamiento de energía, los diferentes sensores, una unidad de procesamiento de las señales y una unidad de transmisión de datos por radiofrecuencia como se observa en la Figura 4. Elementos almacenadores de energía para este tipo de sistemas podrían ser pequeños supercondensadores o baterías secundarias que permitan estabilizar y almacenar la energía recolectada. [4]

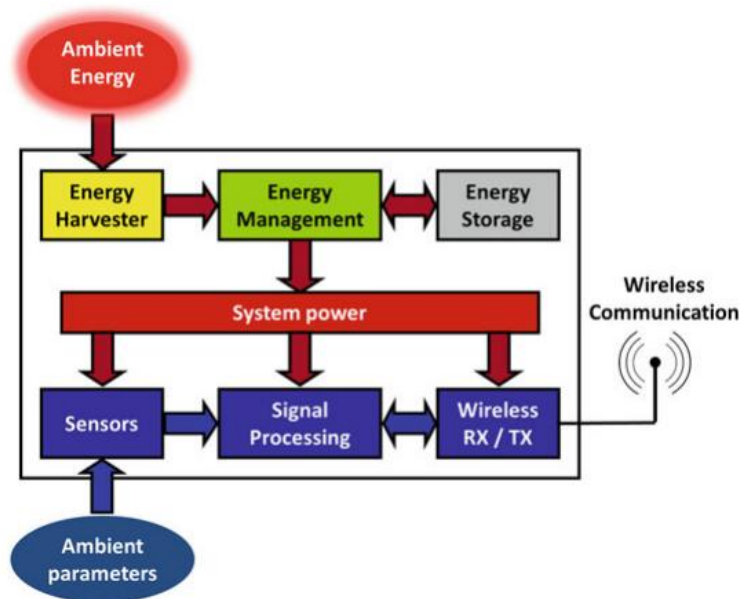


Figura 4 Diagrama de bloques de un WS Node. [4].

Las aplicaciones de la recolección de energía deben tener suficiente energía mecánica disponible en el entorno de trabajo y además requieren de proporcionar la suficiente energía eléctrica para garantizar el correcto funcionamiento del dispositivo. Es por esto que el consumo del equipo es un factor limitante para la expansión de este tipo de sistemas. Las aplicaciones donde fuentes de energía o baterías grandes no son una opción como los dispositivos médicos implantables y sistemas de monitorización son uno de los posibles objetivos de la tecnología de recolección de energía. Otros sistemas que estarían interesados en esta forma de autosuficiencia son los dispositivos del internet de las cosas (IoT) como la localización GPS, sensores infrarrojos, escáneres laser o dispositivos como relojes, gafas, collares inteligentes, etc.

El consumo actual de la mayoría de dispositivos IoT se muestra en la Figura 5 donde aparece las diferentes fuentes de recolección (mecánica, térmica y energía radiante) así como las diferentes tecnologías y su consumo. Se puede observar que para lograr la conexión e interoperabilidad de los dispositivos IoT es necesaria una gran cantidad de energía, lo que causaría un gran consumo de batería y un coste de mantenimiento debido a los ciclos de vida de éstas. [2]

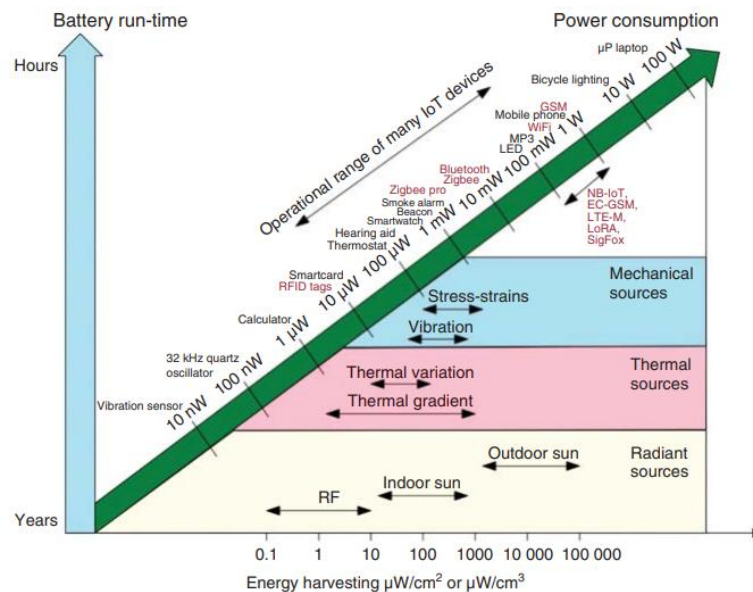


Figura 5 Consumo de potencia para varias aplicaciones de IoT y densidades de potencia de varias fuentes de energía. [2]

Con el desarrollo de las tecnologías de recolección de energía y el IoT de bajo consumo la recolección de energía ambiental empieza a ser una opción para las necesidades de estos dispositivos, siendo en el futuro una fuente de energía prometedora. En concreto, la recolección de energía piezoeléctrica permite obtener una gran densidad de energía y tensiones de voltaje elevados en comparación con otros métodos de recolección de energía, teniendo el potencial de sustituir las baterías de litio. [2]

Capítulo 2.3. FUENTES DE ENERGÍA DE LOS RECOLECTORES PIEZOELÉCTRICOS.

Una de las posibles fuentes viables para la aplicación en el sector de la agricultura es a partir de las vibraciones generadas por fluidos como el movimiento cinético del aire o del agua empleado para ello el regadío de los cultivos. Las vibraciones producidas por estos fluidos son fuentes renovables y alternativas de energía. Un ejemplo de un recolector piezoeléctrico se muestra en la Figura 6, donde se emplea como fuente de energía un canal con un flujo constante de agua y sin turbulencias. La cantidad de agua que fluye es controlada mediante una bomba y se emplea un sistema de adquisición de datos y un ordenador para medir la potencia disipada en cada una de las resistencias variables conectadas a cada recolector piezoeléctrico. Se realizan varios experimentos cambiando la distancia entre cada uno de los recolectores para ver la influencia de éstos en las vibraciones del sistema.

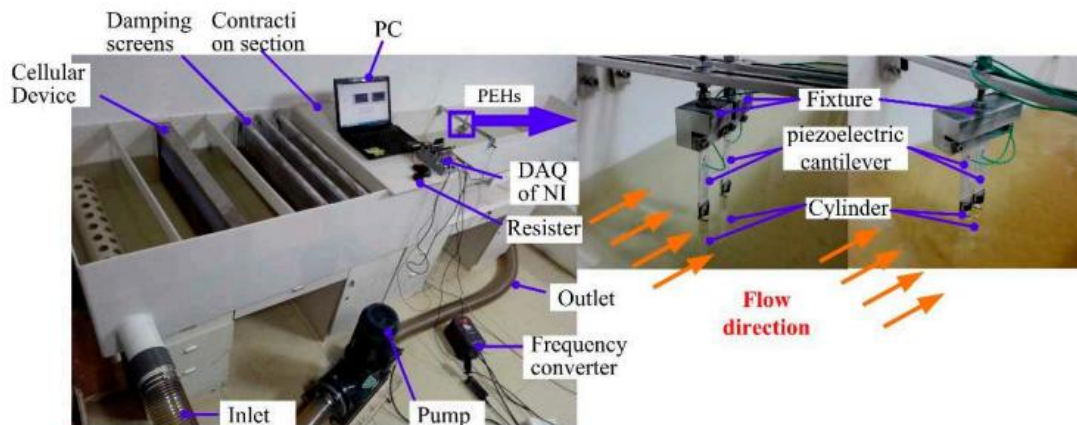


Figura 6 Experimento de recolección de energía a partir de dos recolectores piezoelectricos en tandem, corriente arriba y corriente abajo. [1]

En la Figura 7 se observan algunos de los resultados obtenidos, graficando la tensión medida en las resistencias de carga del circuito en función del tiempo para una velocidad del fluido determinada. Como se observa es una tensión que varía de forma senoidal con tensiones positivas y negativas. [1]

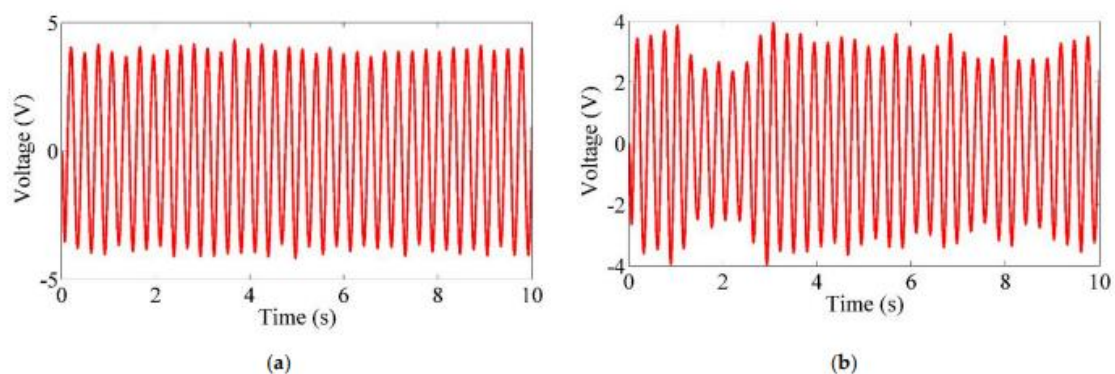


Figura 7 a) Voltaje de salida para el Uperstream Piezoelectric Energy Harvester (UPEH) y b) del Downstream Piezoelectric Energy Harvester (DPEH) con velocidad del fluido de 0,23m/s. [1]

Como conclusión general del estudio, se observa que este sistema es capaz de generar potencias de salida de hasta $371\mu\text{W}$ en determinadas condiciones, como se observa en la Figura 8 comparando simulaciones y resultados experimentales. Este experimento demuestra a simples rasgos la viabilidad de la recolección energética a partir de flujos de agua.

En la Figura 8 se observa que la energía cinética a partir de vibraciones es un método de obtención de potencia muy adecuado para los WS Nodes lo que los convierte en un foco de investigación con gran interés. [5]

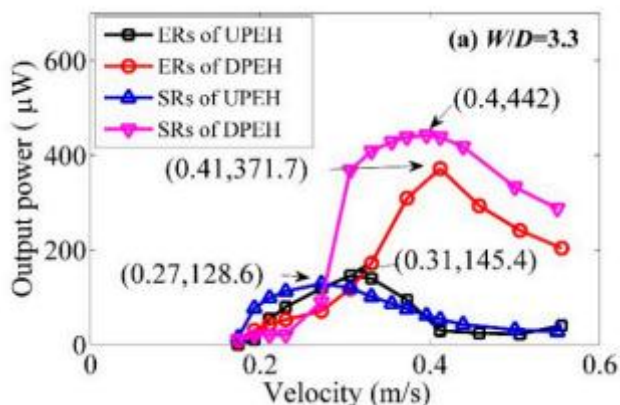


Figura 8 Simulaciones SR y resultados experimentales ER de los recolectores de energía piezoeléctricos en tandem usando como fuente un flujo de agua constante. [1]

Además de las fuentes de energía basadas en la vibración de fluidos, otra posibilidad interesante para la generación de energía en entornos agrícolas reside en las vibraciones estructurales de un invernadero, como las inducidas por el viento, cambios térmicos, o maquinaria en operación. Estas vibraciones, aunque de baja frecuencia y amplitud moderada, pueden ser aprovechadas mediante recolectores piezoeléctricos diseñados con una frecuencia de resonancia ajustada a las vibraciones de la estructura. Este tipo de enfoque podría permitir aprovechar directamente la infraestructura existente como soporte mecánico y fuente de excitación para la recolección de energía, lo cual es especialmente atractivo en instalaciones distribuidas como los nodos sensores en un invernadero.

Capítulo 2.4. MODELADO DE RECOLECTORES DE ENERGÍA DE VIBRACIÓN.

En este capítulo se describirá el modelo general de los recolectores de energía basados en vibraciones. Se estudiará la dependencia de estos sistemas con la frecuencia y cuál es el límite de potencia extraíble mediante este sistema. Además, se planteará el circuito equivalente que permitiría realizar simulaciones.

Capítulo 2.4.1. Modelo general.

La mayoría de los recolectores de energía basados en vibraciones se pueden modelar como un sistema de segundo orden con un grado de libertad. El sistema consiste en un marco que transmite las vibraciones a una masa inercial suspendida m a través de un muelle k , un amortiguador b y un transductor conectado a una interfaz eléctrica como se muestra en la Figura 9.

Si el marco de este sistema vibra se producirá un movimiento armónico de tipo sinusoidal del marco que se moverá según la expresión $y(t)$ cuya amplitud está definida por \hat{y} y la frecuencia de vibración será ω . El movimiento relativo de la masa con respecto al marco $z(t)$ que define de nuevo su amplitud mediante el término \hat{z} , presenta la

misma frecuencia de vibración y además aparece un término que indicaría un ángulo de desfase φ entre $y(t)$ y $z(t)$.

$$y(t) = \hat{y} \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Ecuación 1

$$z(t) = \hat{z} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Ecuación 2

Si a este sistema se le suman los efectos de la fricción y la resistencia del aire aparece el término amortiguador d .

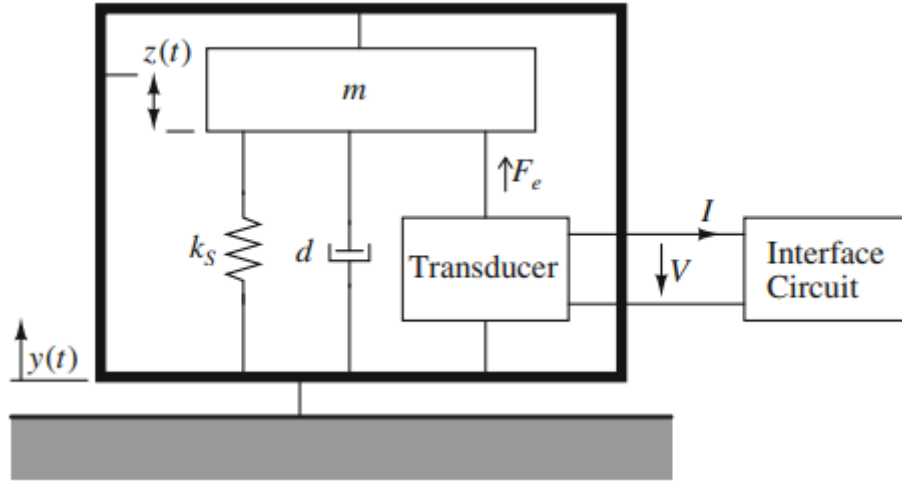


Figura 9 Modelo general de un microgenerador basado en vibraciones. [4]

Con el movimiento de la masa del dispositivo se puede deformar el transductor, convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica.

A partir de las expresiones anteriores se puede obtener la expresión que relaciona cada componente del sistema:

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

Ecuación 3

Dónde m es la masa del dispositivo, k_s es la constante del muelle y F_e la fuerza de recuperación debida a la retroalimentación del transductor. Expresando la fuerza del transductor como $F_e = d_e \cdot \dot{z}$ se puede simplificar la expresión anterior a:

$$m \cdot \ddot{y} = m \cdot \ddot{z} + (d + d_e) \cdot \dot{z} + k_s \cdot z$$

Ecuación 4

Si se realiza la transformada de Laplace de esta ecuación se obtiene:

$$ms^2y = ms^2z + (d + d_e)sz + k_s z$$

Ecuación 5

Definiendo la frecuencia natural del sistema como $\omega_n = \sqrt{\frac{k_s}{m}}$ y los términos adimensionales del factor del amortiguamiento mecánico y eléctrico del sistema como $\tau_d = \frac{d}{2m\omega_n}$ y $\tau_e = \frac{d_e}{2m\omega_n}$ se puede proporcionar la función de transferencia del sistema:

$$\frac{z(s)}{y(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\omega_n(\tau_d + \tau_e)s + \omega_n^2}$$

Ecuación 6

El movimiento de la masa relativa al marco explica el principio de operación básico del dispositivo. Si la frecuencia de excitación coincide con la frecuencia de resonancia del sistema, el movimiento de la masa se magnifica y una cantidad de energía considerable sería convertida en energía eléctrica útil. Para acoplar las vibraciones ambientales al método de transducción, los recolectores de energía de vibración necesitan un transductor y un convertor de energía diseñados meticulosamente para maximizar la energía convertida con unas pérdidas mínimas.

Como se ha comentado anteriormente, los recolectores piezoeléctricos son los más adecuados para la obtención de energía en comparación con los capacitivos e inductivos debido a su simple diseño y principio de operación en la tecnología MEMS. [4] [5]

Capítulo 2.4.2. Circuito equivalente.

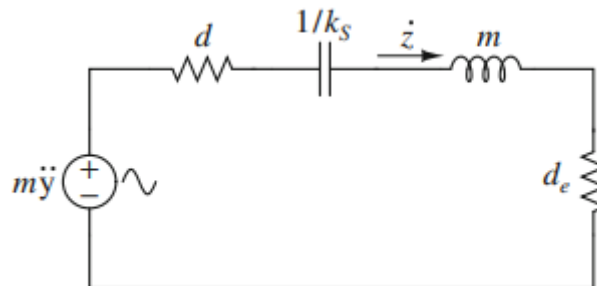


Figura 10 Circuito equivalente de un recolector piezoeléctrico. [4]

El modelo mecánico de un recolector de energía basado en vibraciones correspondiente a la función de transferencia discutida en el apartado anterior corresponde al circuito equivalente de la Figura 10. Este circuito será muy importante en el desarrollo de los circuitos de interfaz que permitan extraer la potencia del sistema, así como en las simulaciones.

En el circuito equivalente la fuerza mecánica proveniente de las vibraciones se puede representar como una fuente de voltaje de valor $m\ddot{y}$ mientras que la velocidad del movimiento del dispositivo \dot{z} se puede representar como la corriente eléctrica que circula por ese circuito. La masa se representa mediante una inductancia de valor m que impediría el cambio en los valores de corriente mientras que el muelle sería modelado



con un condensador de valor $1/k_s$. Los factores de amortiguamiento se representarían como resistencias d y d_e . [4]

Capítulo 2.4.3. Potencia generada.

Atendiendo al circuito equivalente de un recolector de energía de vibraciones se puede obtener la potencia efectiva disipada en el transductor mediante la expresión:

$$P_{RMS}(\omega) = I_{RMS}^2 \cdot R_e = \left(\frac{\hat{z}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot d_e = \frac{(\omega \hat{z})^2}{2} d_e \quad \text{Ecuación 7}$$

De la expresión anterior se determina que cuanto mayor sea la frecuencia de vibración y mayor la amplitud del desplazamiento, mayor será la potencia obtenida del sistema. También la potencia se verá incrementada si el factor de amortiguamiento eléctrico es elevado.

A partir de la derivación de la función de transferencia de la Ecuación 6 se puede obtener la expresión de la amplitud del desplazamiento en función de la frecuencia de oscilación, de tal forma que:

$$\hat{z}(\omega) = \frac{\frac{\omega}{\omega_n} \hat{y}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left[2(\tau_d + \tau_e) \frac{\omega}{\omega_n} \right]^2}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Si la frecuencia de excitación coincide con la de resonancia $\omega = \omega_n$, la expresión de la potencia se simplifica, obteniendo:

$$P(\omega) = \frac{m \cdot \omega_n^3 \cdot \hat{y}^2 \cdot \tau_e}{4(\tau_d + \tau_e)^2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Del circuito equivalente también se obtiene que la potencia máxima en el transductor se obtendría cuando el amortiguamiento mecánico y el eléctrico sean iguales $\tau_d = \tau_e$, lo que significaría que la misma potencia de entrada se disipa en rozamiento y en generar energía eléctrica. Siguiendo esta premisa, la potencia límite viene definida por la ecuación:

$$P_{lim}(\omega) = \frac{m \cdot \omega_n^3 \cdot \hat{y}^2}{16\tau_d} \quad \text{Ecuación 10}$$

O escrito en términos del factor de amortiguación $d = 2m\omega_n\tau_d$:

$$P_{lim}(\omega) = \frac{(m\hat{a})^2}{8d} \quad \text{Ecuación 11}$$

De la Ecuación 11 se deduce que para obtener una potencia elevada se debe tener un factor de amortiguamiento mecánico lo más bajo posible.

Además, como se ha comentado anteriormente, la potencia generada dependerá del grado de coincidencia de la frecuencia de vibración de la fuente con la frecuencia resonante del sistema. Este grado de coincidencia se representa mediante la relación ω/ω_n . En la Figura 11 se observa una gráfica donde la potencia disipada en el amortiguador eléctrico es máxima cuando la frecuencia de excitación coincide con la resonancia. [4]

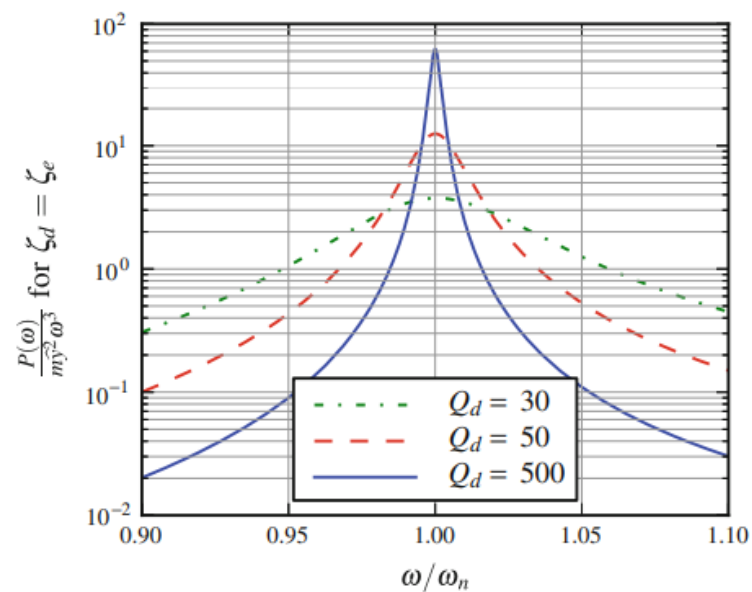


Figura 11 Potencia de salida del recolector de energía cinética de vibración en función de la frecuencia de excitación normalizada. [4]

Estos modelos de recolectores de energía en base a vibraciones justifican el uso de reestructuras resonantes en el diseño de recolectores de energía piezoeléctricos, siendo la frecuencia de operación y el tipo de vibración los factores de consideración en el siguiente capítulo.

Capítulo 2.5. MODELADO DE UN RECOLECTOR PIEZOELÉCTRICO.

Para el caso de este TFM, el modelo del recolector de energía piezoeléctrico (PEH) es de gran interés.

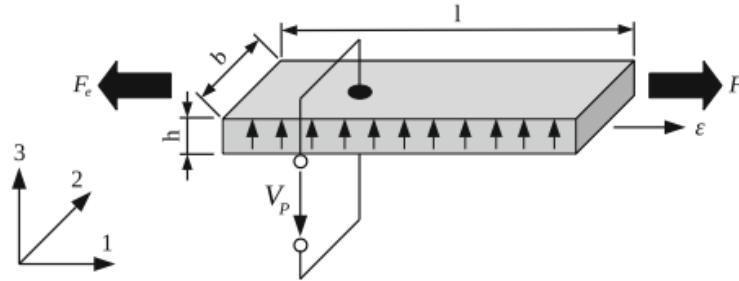


Figura 12 Viga de un material piezoeléctrico usado en un PEH en modo d_{31} . [4]

Capítulo 2.5.1. Modelo general.

En la Figura 12 se muestra el esquema de un material piezoeléctrico al que se aplica una fuerza F que causa una elongación del material ε . Sobre este material se pueden establecer las siguientes relaciones:

$$\begin{cases} F = k_p \cdot \varepsilon + \Gamma \cdot V_p \\ I = \Gamma \cdot \dot{\varepsilon} - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases} \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde k_p denota la rigidez del material piezoeléctrico, V_p es la tensión generada en los extremos del material, C_p es la capacidad de salida del piezoeléctrico y Γ representa el factor de acoplamiento electromecánico generalizado, que mide la eficiencia con la que la energía mecánica se convierte en energía eléctrica en un sistema piezoeléctrico.

En la Ecuación 12 se muestra que la fuerza total se compone de la fuerza elástica del muelle y de la fuerza de acoplamiento. Debido al balance de estas dos componentes, la resultante puede ser considerada como una fuerza de restauración F_e que actúa sobre la masa del dispositivo.

Normalmente los materiales piezoeléctricos son bastante rígidos, lo que provoca que las frecuencias de resonancia sean elevadas, resultando en que la estructura más conveniente para generar grandes deformaciones en el eje 3 y que genere una elongación en el eje 1 es la tipología de viga en voladizo o cantilever.

Tomando la elongación como $z(t)$ al igual que en el capítulo anterior, se pueden escribir las ecuaciones anteriores como:

$$\begin{cases} F_e = k_p \cdot z + \Gamma \cdot V_p \\ I = \Gamma \cdot \dot{z} - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases} \quad \text{Ecuación 13}$$



Finalmente, el sistema de segundo grado de un recolector de vibraciones que es piezoeléctrico se define por:

$$\begin{cases} ma = m\ddot{z} + d\dot{z} + kz + \Gamma V_p \\ I = \Gamma \cdot \dot{z} - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases} \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde $k = k_p + k_s$ es la suma de la rigidez del material piezoeléctrico y de la estructura que lo soporta.

Volviendo al factor de acoplamiento electromecánico del piezoeléctrico Γ , un alto acoplamiento significa que una gran cantidad de energía puede ser recolectada del entorno. Existe también un efecto en la salida de la potencia del recolector, donde la carga induce un factor de amortiguamiento debido a la retroalimentación en la deflexión de la viga del piezoeléctrico, d_e , como se ha mostrado en el capítulo 2.4.1. Esto significa que un recolector piezoeléctrico altamente acoplado (con alta conversión de energía) presenta un mayor amortiguamiento que uno con un factor Γ menor.

El factor de acoplamiento electromecánico generalizado (GEMC) se ha reportado con un valor de hasta 0.7. Dado que este factor depende de la geometría y la estructura usada en el PEH se plantea un parámetro llamado factor de acoplamiento efectivo que se define como:

$$k_{eff}^2 = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{oc}^2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Dónde ω_{oc} y ω_{sc} corresponden con las frecuencias angulares de resonancia del circuito abierto y en cortocircuito respectivamente. Valores realistas de k_{eff}^2 están en el rango de 0.01 a 0.1, existiendo varias frecuencias de resonancia dependiendo de la carga eléctrica a la que esté conectado el PEH. En concreto la frecuencia fundamental es determinada en el caso en el que el PEH está cortocircuitado como se muestra en la Ecuación 16. La frecuencia de anti-resonancia obtenida en cortocircuito es mayor y se obtiene con la Ecuación 17. La Ecuación 18 relaciona el GEMC con el factor de acople electromecánico. [4]

$$\omega_{sc} = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad k = k_p + k_s \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\omega_{oc} = \omega_{sc} \sqrt{1 + k_{eff}^2} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$k_{eff}^2 = \frac{\Gamma^2}{kC_p} \quad \text{Ecuación 18}$$

Capítulo 2.5.2. Circuito equivalente.

Como primera aproximación, siguiendo la Ecuación 14 se puede plantear el circuito equivalente de la Figura 13. La fuente de corriente sinusoidal $I_p = \Gamma \dot{z}$ representa la vibración de la viga y la capacidad de salida es representada por un condensador de valor C_p . El voltaje a través del piezoelectrico está indicado por V_p y en ocasiones se añade una resistencia R_{par} para considerar las pérdidas dieléctricas debidas a que el material piezoelectrico no es un aislante perfecto, pudiéndose omitir ya que su valor es elevado ($> 10M\Omega$).

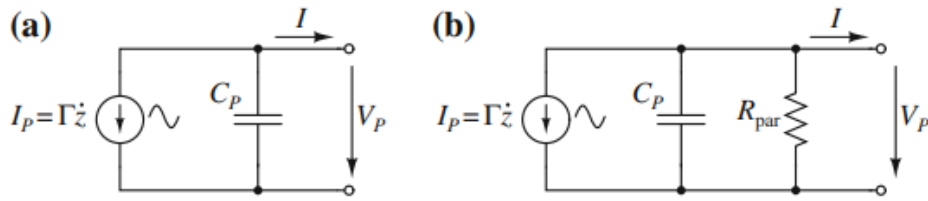


Figura 13 Circuito equivalente desacoplado de un PEH a) sin considerar las pérdidas en el dieléctrico y b) considerando las pérdidas. [4]

Si se desea plantear un circuito equivalente más completo, que permita modelar el factor de la retroalimentación del circuito de interfaz en el PEH o una predicción de la potencia de salida para una vibración, se necesita representar la velocidad mecánica por una corriente eléctrica $\dot{z} \equiv I_m$. De esta forma el sistema de la Ecuación 14 puede representarse como:

$$\begin{cases} ma = m\dot{I}_m + dI_m + k \int I_m dt + \Gamma \dot{V}_p \\ I = \Gamma \cdot I_m - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases} \quad \text{Ecuación 19}$$

Con este nuevo sistema, se plantea el circuito equivalente de la Figura 14.

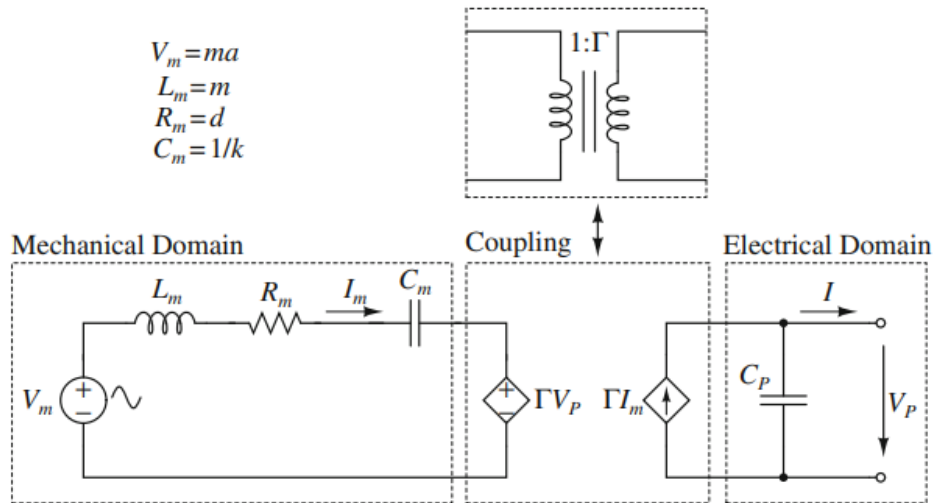


Figura 14 Circuito equivalente de un PEH acoplado electromecánicamente. Las fuentes controladas pueden ser a veces reemplazadas por un transformador. [4]

Con el fin de simplificar el circuito de la Figura 14 y reducir el número de elementos, se realiza una conversión de los parámetros del dominio mecánico al dominio eléctrico mediante el uso del factor de acoplamiento Γ . Esta transformación permite representar el acoplamiento electromecánico mediante un transformador ideal. Aplicando esta conversión, las componentes del primario (dominio mecánico) se reflejan en el secundario (dominio eléctrico), obteniéndose así el circuito equivalente mostrado en la Figura 15.

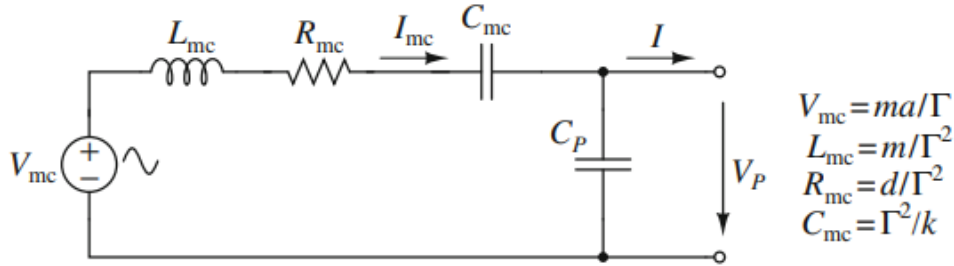


Figura 15 Circuito equivalente simplificado de un PEH, donde se considera el factor de acople electromecánico para los elementos del dominio mecánico. [4]

Estos modelos de circuitos equivalentes permiten realizar simulaciones del PEH con mayor o menor detalle, teniendo en cuenta que cuanto más complejo sea el modelo más tiempo de cómputo necesitará el programa de simulación para llegar a un resultado estacionario. [4]

Capítulo 2.5.3. Potencia de salida.

La máxima potencia de salida de este tipo de circuitos se obtiene de forma teórica cuando la impedancia de la carga conectada es el conjugado de la impedancia interna del PEH. Para el circuito simplificado de la Figura 15 la impedancia interna del generador es:

$$Z = \frac{1}{j\omega C_p + \frac{1}{R_{mc} + \frac{1}{j\omega C_{mc}} + j\omega L_{mc}}} \quad \text{Ecuación 20}$$

Y por tanto la carga que maximizaría la potencia sería su conjugado:

$$\bar{Z} = \frac{1}{-j\omega C_p + \frac{1}{R_{mc} - \frac{1}{j\omega C_{mc}} - j\omega L_{mc}}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Para conseguir que la carga conectada al circuito sea el conjugado se duplican los elementos pasivos y se intercambian los condensadores por inductancias y viceversa, obteniendo el circuito de la Figura 16.

Piezoelectric Harvester

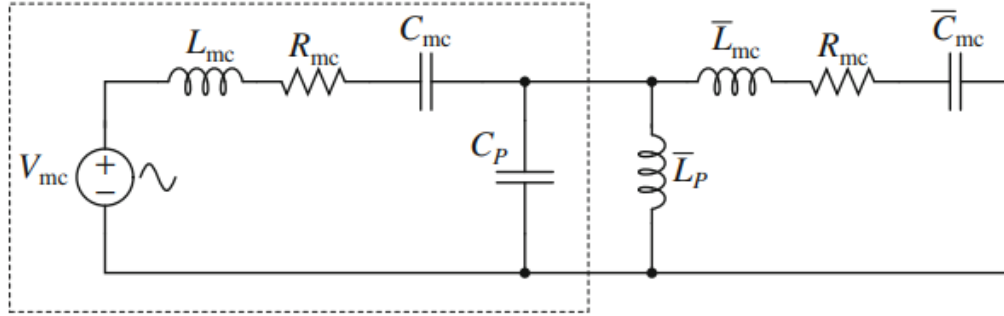


Figura 16 Circuito equivalente de un PEH con carga compleja conjugada. [4]

En este circuito el par condensador-inductancia $C_p - \bar{L}_p$ crean una impedancia infinitamente grande mientras que los otros pares $C - \bar{L}$ y $L - \bar{C}$ crean una impedancia cero si los valores de la impedancia de la carga cumplen con:

$$\bar{L}_p = \frac{1}{\omega^2 C_p} \quad \bar{L}_{mc} = \frac{1}{\omega^2 C_{mc}} \quad \bar{C}_{mc} = \frac{1}{\omega^2 L_{mc}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Estas condiciones permitirían reducir el circuito equivalente a un simple divisor de tensión como el mostrado en la Figura 17. En este caso la potencia máxima posible viene definida por la expresión:

$$P_{lim} = \frac{V_{p,RMS}^2}{R_{mc}} = \frac{\hat{V}_{mc}^2}{8R_{mc}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde $V_{p,RMS}$ indica el voltaje eficaz por la resistencia de carga y \hat{V}_{mc} la amplitud de la fuente de voltaje. [4]

Piezoelectric Harvester

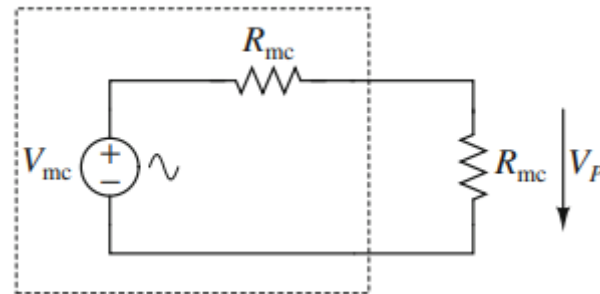


Figura 17 Circuito equivalente de un PEH simplificado con carga compleja conjugada. [4]

Capítulo 2.6. CONEXIONES EN SERIE Y PARALELO DE LOS PEH.

Como se comentará en el capítulo siguiente, es posible conectar varias capas de piezoeléctricos entre sí dando lugar a configuraciones en serie y en paralelo, resultando en los circuitos equivalentes de la Figura 18 y Figura 19 respectivamente. Estas configuraciones permitirán aumentar la tensión (serie) o la corriente (paralelo) proporcionada a la carga, pero pueden afectar a la capacidad de salida del circuito C_p .

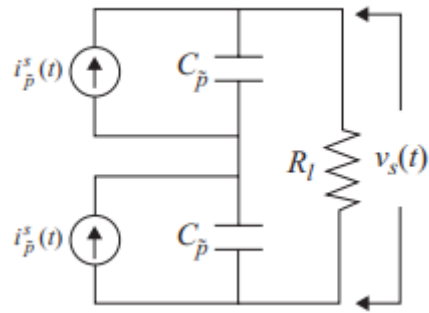


Figura 18 Circuito equivalente simplificado de dos capas piezoeléctricas conectadas en serie. [6]

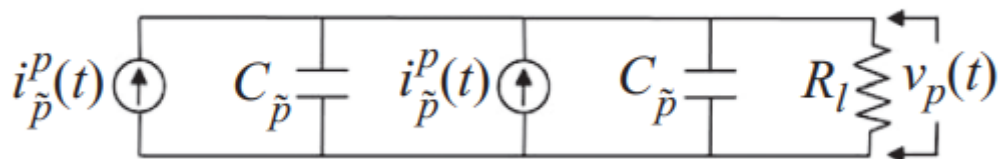


Figura 19 Circuito equivalente simplificado de dos capas piezoeléctricas conectadas en paralelo. [6]

Capítulo 3. TIPOS DE SENSORES PIEZOELÉCTRICOS DE VIBRACIÓN.

En este capítulo se hará una clasificación de los diferentes recolectores de energía piezoeléctricos valorando el principio de funcionamiento, su estructura geométrica, la morfología del material, el número de capas funcionales y una mención de las posibles aplicaciones o entornos para estos dispositivos. Entre los diferentes tipos se busca obtener la tipología con mayor rendimiento y con las características necesarias para recolectar energía del ambiente agrícola, teniendo en cuenta las posibles características de este entorno como la humedad y la temperatura.

Capítulo 3.1. CLASIFICACIÓN ESTRUCTURA GEOMÉTRICA.

En este capítulo se hará una descripción detallada de algunos de los tipos estructurales de los recolectores piezoeléctricos de vibración.

Capítulo 3.1.1. Estructura de viga voladiza o cantilever.

En este tipo de recolector de energía consiste en una viga en voladizo dónde una capa de material piezoeléctrico está intercalada entre dos electrodos y colocado sobre una viga de silicio como se ve en la Figura 20. Gracias a las vibraciones externas una fuerza F es aplicada en el extremo libre de la viga creando un ángulo de curvatura θ con un desplazamiento x . Esta estructura es la más usada en recolectores piezoeléctricos ya que pueden producir una mayor deformación media bajo una determinada carga. [5] [2]

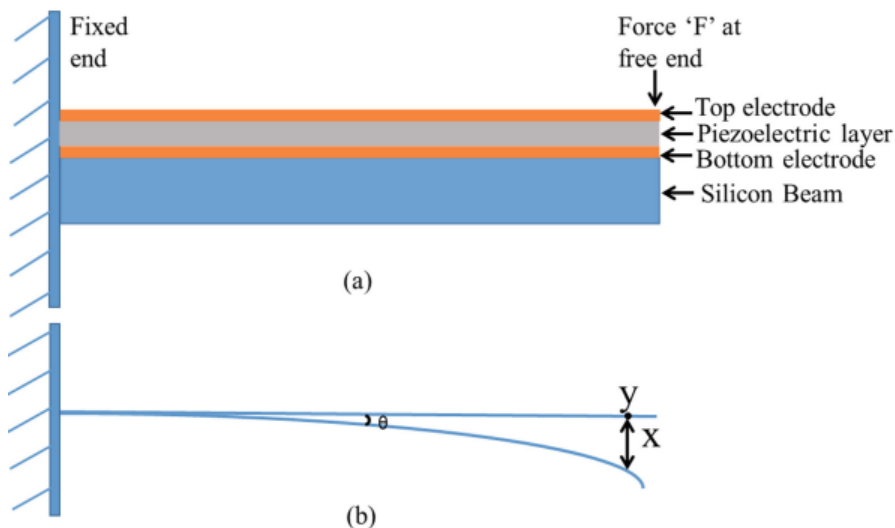


Figura 20 Recolector piezoeléctrico de viga simple en voladizo. [5]

Este tipo de viga puede ser modelado como un sistema de muelle-masa-amortiguador, cuya frecuencia de resonancia está determinada por el momento de inercia, las dimensiones y la masa de la propia viga. La frecuencia de resonancia viene dada por la expresión siguiente, donde f es la frecuencia, m es la masa de la viga en voladizo, k es la constante del muelle, E es el módulo de Young de elasticidad de la viga en voladizo y w , l y t son el ancho, largo y espesor de la viga.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad k = \frac{Ewt^3}{4l^3}$$

Ecuación 24

Aplicando esta expresión se pueden aprovechar las vibraciones disponibles en el ambiente que están presentes en un rango de hasta 2kHz, siendo las más comunes las inferiores a los 200Hz. Las frecuencias de operación que permiten obtener mayores potencias con los recolectores piezoeléctricos de tipo voladizo son más bajas, por lo que los parámetros de longitud, anchura y espesor de la viga deben garantizar la menor frecuencia de resonancia posible. Esta característica se puede mejorar añadiendo una masa, denominada masa sísmica, en el extremo de la viga para reducir considerablemente la frecuencia, con la limitación de que una masa demasiado grande podría llegar a romper el dispositivo. Este efecto se observa detalladamente en la Figura 21, dónde con una masa en el extremo de la viga en voladizo se consigue reducir la frecuencia de resonancia en un 52%. El efecto de las diferentes longitudes y espesores de la viga en la frecuencia de resonancia se puede ver también en la Figura 22, dónde a mayor longitud y espesor las frecuencias obtenidas son menores.

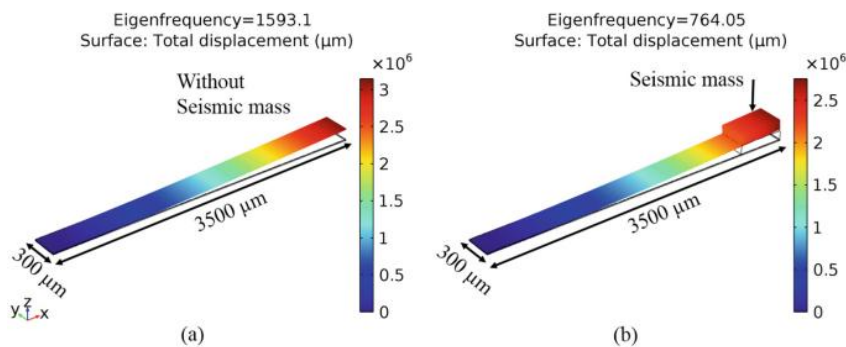


Figura 21 Frecuencia de resonancia de una viga en voladizo a) sin masa y b) con masa en su extremo. [5]

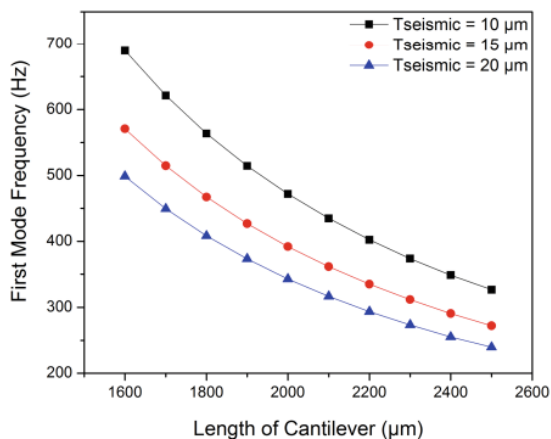


Figura 22 Frecuencia de resonancia frente a la longitud de la viga voladiza con diferentes espesores. [5]

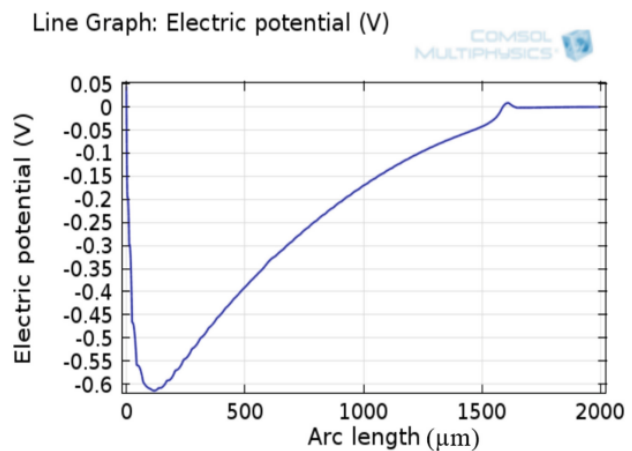


Figura 23 Distribución de potencial eléctrico en un cantiléver. [5]



La distribución de la diferencia de potencial en el material piezoeléctrico según las diferentes simulaciones es el observado en la Figura 23, dónde se puede observar que en el principio de la zona empotrada de la viga se produce un pico de potencial de 0,6V y este se reparte de forma más o menos lineal en el resto de la viga hasta llegar al punto de la masa dónde el potencial es nulo. Al analizar otras variables, como el esfuerzo mecánico en la muestra, la simulación muestra también un pico de esfuerzo en la misma posición donde se observa el pico de tensión, lo cual es coherente con el comportamiento esperado según el efecto piezoeléctrico.

Las estructuras en voladizo o cantilever pueden ser conectadas entre sí formando matrices, permitiendo incrementar el rango de frecuencias de operación del recolector piezoeléctrico variando alguno de los parámetros en las diferentes estructuras. En las simulaciones realizadas en tres cantiléver de longitudes 2000, 2100 y 2200 μm se observan frecuencias de 1215Hz, 867Hz y 681Hz respectivamente, por lo que el rango de operación de este dispositivo está entre 681Hz y 1215Hz. Esto permite obtener un amplio ancho de banda de operación, pero aumenta el coste de fabricación. Además, como desventaja solo uno de los cantiléver es excitado en función de la frecuencia, generando las otras dos potencias residuales o casi nulas como se muestra en la Figura 24. Debido a esto, las estructuras de vigas en voladizo matriciales no presentan una buena relación volumen/potencia de salida.

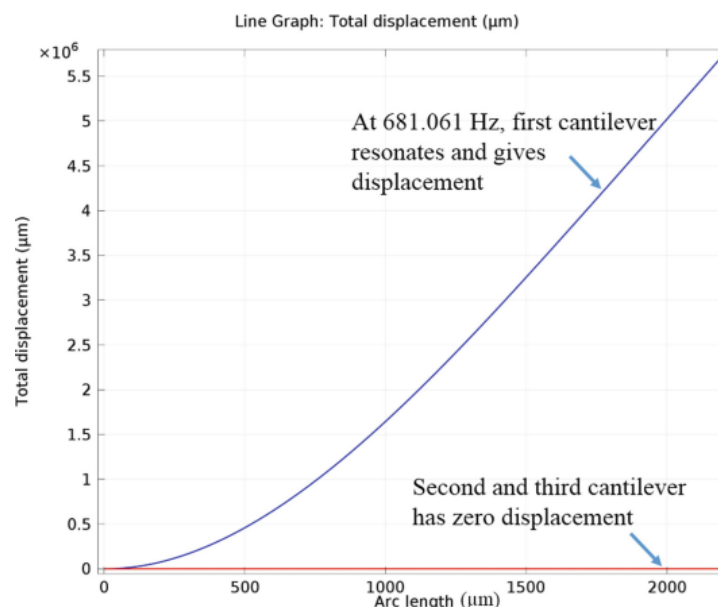


Figura 24 Desplazamiento de las vigas en voladizo o cantiléver para una frecuencia de excitación de 681.061Hz. [5]

En esta tipología, al conectarse múltiples vigas en voladizo en serie o paralelo con diferentes frecuencias de operación se obtienen respuestas multifrecuencia, aumentando el ancho de banda de los dispositivos, como se puede observar en la Figura 25. [2]

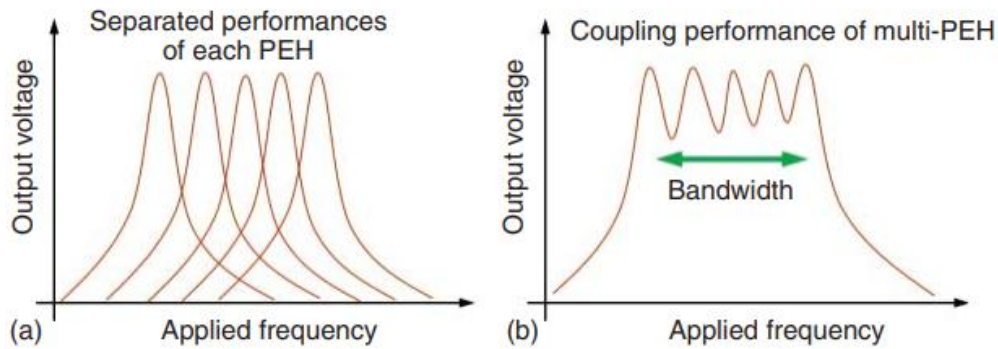


Figura 25 Principio de diseño del ancho de banda en PEH. a) Salida de cada uno de los recolectores. b) Salida de la combinación en serie o paralelo. [2]

Capítulo 3.1.2 Estructuras de vigas guiadas o de tipo puente.

Otras posibles configuraciones son las configuraciones en tipo puente, que están ancladas por dos extremos con una masa sísmica en el medio. Estas estructuras proporcionan un funcionamiento estable ya que están sujetas por amos extremos, aguantando mayor estrés y un menor desplazamiento. Sin embargo, este tipo de estructuras tienen una mayor constante del muelle en su modelo físico, lo que aumenta las frecuencias de resonancia. Un ejemplo de este tipo de estructura es el mostrado en la Figura 26. En la Figura 27 se puede observar el comportamiento de la deformación ante un estrés en una simulación, donde los extremos en color azul estarían fijos al marco del dispositivo. En este caso la distribución del potencial en la simulación es bastante diferente a la del cantiléver, estando linealmente definido y centrado en la masa de la viga biempotrada como se muestra en la Figura 28. En general su conversión de energía y densidad de potencia de salida son bajas comparadas con la tipología cantiléver, entendiendo la densidad de potencia como la relación entre la potencia de salida y el volumen del dispositivo para una determinada entrada.

Es posible obtener frecuencias de resonancia menores con diseños de PEH de tipo puente con cuatro anclajes como el mostrado en la Figura 29 y Figura 30. En esta tipología la masa sísmica está conectada al marco mediante cuatro vigas o puentes con la idea de que su longitud limite la frecuencia de resonancia, aportando estabilidad. En este tipo de tipologías se usa una masa sísmica grande aprovechando los cuatro apoyos, ayudando a reducir este parámetro.

En los casos de la tipología en puente, la frecuencia de resonancia sigue las siguientes expresiones, donde n toma el valor de 2 para la estructura de dos vigas guiadas o 4 para la de cuatro vigas guiadas. [2] [5] [6]

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad k = \frac{nEwt^3}{l^3}$$

Ecuación 25

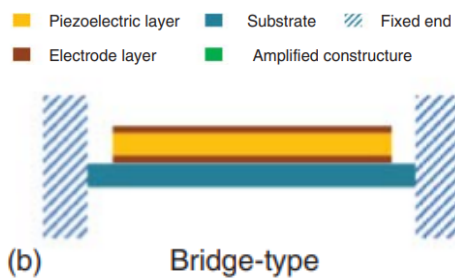


Figura 26 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo puente. [2]

Eigenfrequency=1535.2 Surface: Total displacement (μm)

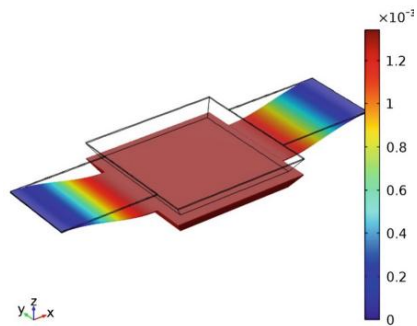


Figura 27 Estructura de viga guiada. [5]

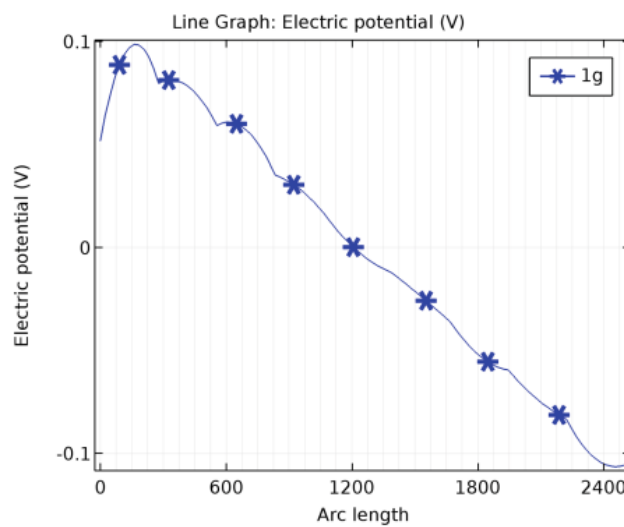


Figura 28 Distribución del potencial eléctrico según la longitud de la viga guiada. [5]

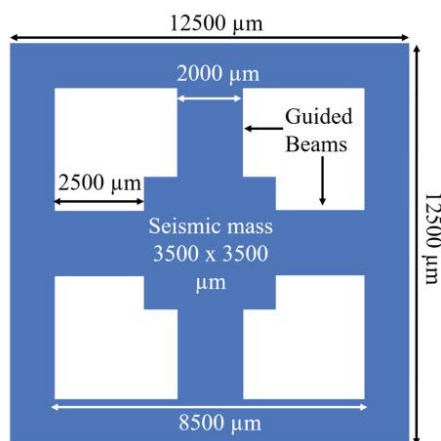


Figura 29 Diseño de un PEH guiado por cuatro vigas. [5]

Eigenfrequency=335.96 Surface: Total displacement (μm)

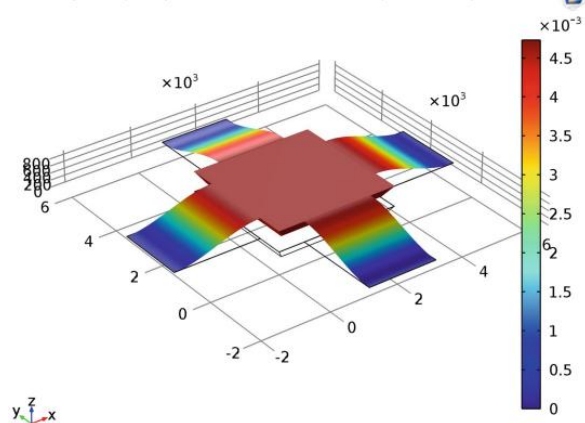


Figura 30 Frecuencia de resonancia de una estructura guiada por cuatro vigas. [5]

Capítulo 3.1.3 Estructuras de puente pandeado.

Algunos recolectores de energía emplean estructuras pretensionadas que, al estar sometidas a una tensión inicial, presentan un comportamiento no lineal frente a fuerzas de excitación externas. Esto permite mejorar la eficiencia en la recolección de energía y obtener mayores densidades de potencia. Un ejemplo de este tipo de estructuras es el puente pandeado de la Figura 31. [2]

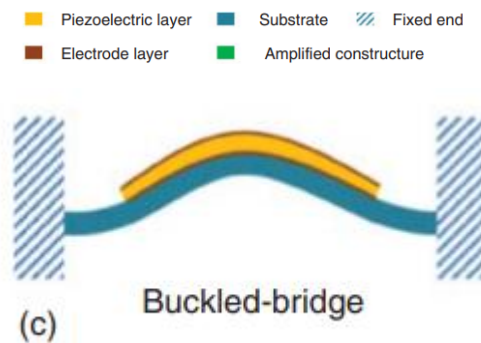


Figura 31 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo puente pandeado. [2]

Capítulo 3.1.4 Estructuras de diafragma.

En este tipo de estructuras, el elemento piezoeléctrico se configura generalmente como una membrana circular o cuadrada sujeta en sus bordes. Una importante ventaja de las estructuras de diafragma comparadas con los cantiléver es la compatibilidad con modos de operación de presión. Estos modos se basan en la configuración de tipo d_{31} . [2]

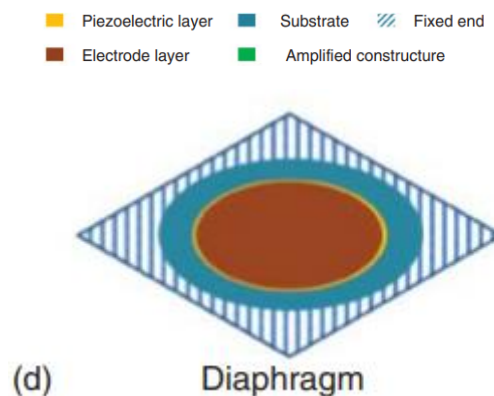


Figura 32 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo diafragma. [2]

Capítulo 3.1.5 Estructuras de tipo platillo.

En este tipo de recolectores, se usan mecanismos de amplificación mecánica que permiten aumentar la fuerza de excitación o el desplazamiento. Estos mecanismos permiten obtener una mayor conversión de energía y por tanto mayor eficiencia. Normalmente usan un modo de acción d_{31} . Un ejemplo de este tipo de estructura es el mostrado en la Figura 33, donde una estructura permite transformar esfuerzos de compresión verticales en horizontales de tracción. [2]

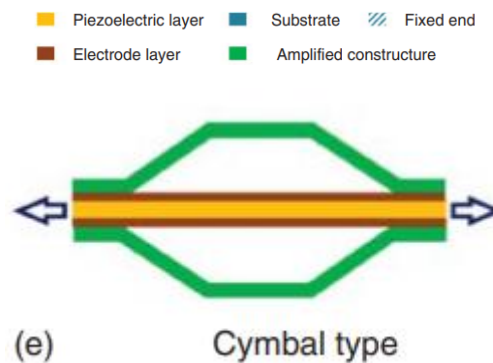


Figura 33 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico tipo platillo. [2]

Capítulo 3.1.6 Estructura piezoeléctrica apilada.

La estructura piezoeléctrica apilada está diseñada por múltiples capas de estructuras piezoeléctricas como se observa en la Figura 34. Esta tipología permite mejorar la eficiencia de la fuerza longitudinal aplicada, por lo que típicamente emplean el modelo d_{33} .

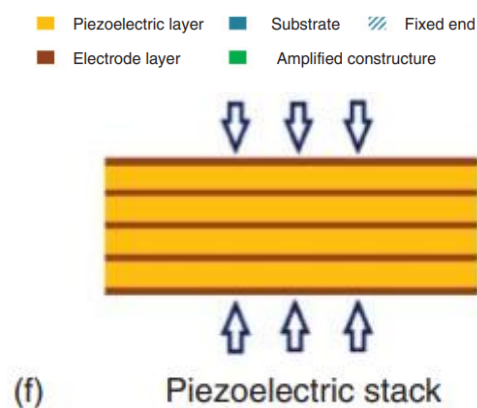


Figura 34 Diagrama esquemático de un recolector piezoeléctrico apilado. [2]

Capítulo 3.1.7 Otras tipologías.

Otras tipologías menos usadas debido a sus grandes frecuencias de resonancia y baja deformación son las mostradas en la Figura 35. En estos montajes se logran mejores características en frecuencia y salida basándose en diferentes substratos flexibles o usando curvaturas o dobleces en la propia estructura en el proceso de fabricación. [2]

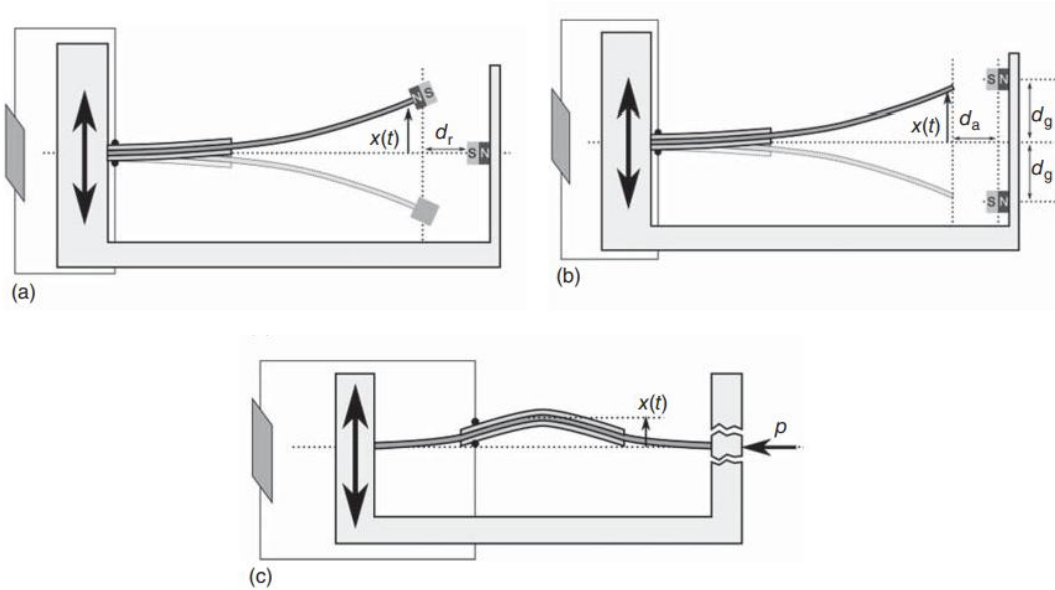


Figura 35 Recolectores de energía de vibración no lineales. a) Recolector de repulsión biestable magnética b) Recolector de atracción magnética c) Recolector de viga pandeada. [2]

Capítulo 3.2. CLASIFICACIÓN SEGÚN MODO DE OPERACIÓN.

Los recolectores de energía piezoeléctricos pueden diferenciarse según el principio de excitación mecánica que aprovechan para generar energía. Esta clasificación distingue dos tipos principales: Recolectores de vibración libre, que generan electricidad a partir de impulsos iniciales no sostenidos y recolectores de vibración forzada, que operan bajo excitaciones periódicas continuas aplicadas por el entorno.

Capítulo 3.2.1. PEH de vibración libre.

Los PEH de vibración libre se basan en la respuesta transitoria del sistema tras recibir un impulso inicial. Una vez que una masa o estructura recibe un estímulo mecánico (como un golpe, impacto o liberación), el sistema vibra a su frecuencia natural, sin necesidad de un estímulo periódico continuo.

Estos dispositivos suelen diseñarse para operar en resonancia mecánica, ya que bajo esas condiciones se maximiza el desplazamiento relativo y, por tanto, la tensión generada por el material piezoeléctrico. Su aplicación es habitual en entornos donde los eventos vibracionales son esporádicos o de baja frecuencia.

La principal línea de investigación de recolectores de energía de vibración libre se basa principalmente en la estructura tipo cantilever, centrándose en el efecto de las masas sísmicas y geometrías flexibles para maximizar el rendimiento.

Como ejemplo representativo de PEH en esta configuración está la estructura en puente pandeado de la Figura 36. En esta configuración la masa situada en el centro del puente genera una fuerza de inercia centrada que producirá deformaciones cuando se produzca una excitación por vibración. Una imagen de otro dispositivo real basado en el funcionamiento anterior es el mostrado en la Figura 37. [2]

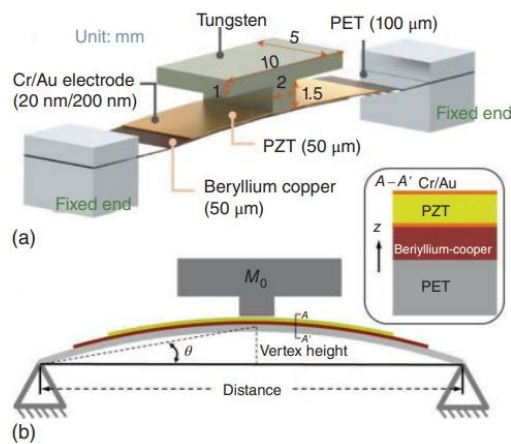


Figura 36 Diseño estructural de un PEH de puente pandeado. [2]

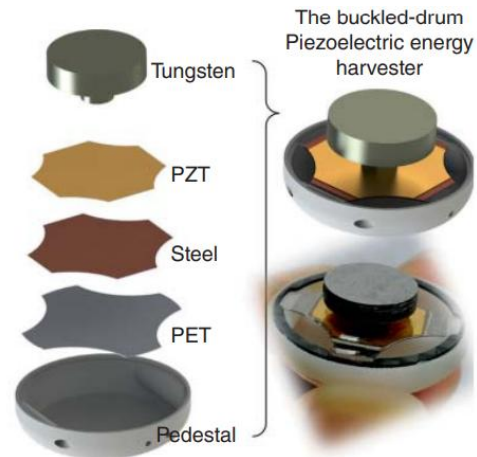


Figura 37 Diseño estructural y fotografía de un PEH de tambor abombado. [2]

Capítulo 3.2.2. PEH de vibración forzada.

En contraste, los PEH de vibración forzada operan bajo una excitación mecánica periódica continua, como las vibraciones inducidas por maquinaria, motores, flujos turbulentos o resonancias estructurales ambientales. Estas aplicaciones podrían estar colocados en el interior de las ruedas de los vehículos para aprovechar el movimiento rotatorio.

Este enfoque permite un control más fino de la frecuencia y amplitud de excitación, lo cual facilita el diseño adaptado a una frecuencia de operación específica. En este caso, el objetivo es aumentar el rendimiento al mantener la estructura vibrando de forma sostenida a su frecuencia óptima.

Un ejemplo de este tipo de dispositivos es el mostrado en la Figura 38, donde una fuerza es aplicada en el centro del puente y los electrodos del piezoeléctrico están conectados a una carga.

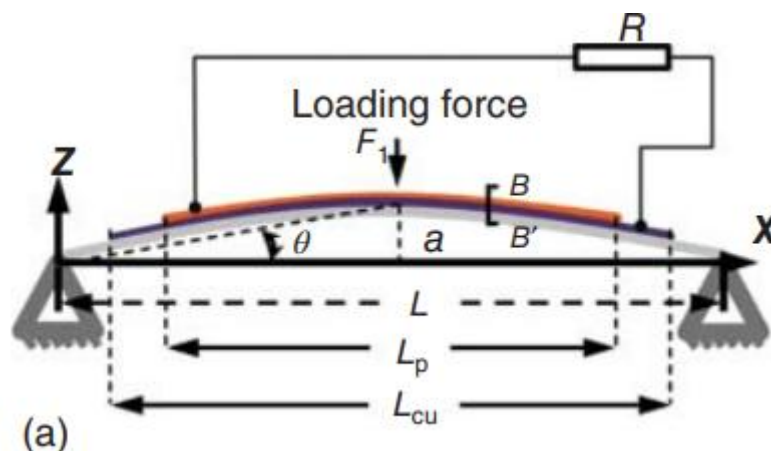


Figura 38 Esquemático de un PEH de tipo puente pandeado. [2]

Como se ha mencionado anteriormente, una aplicación de este tipo de dispositivos es en el interior de las ruedas de un vehículo como se muestra en la Figura 39. En este dispositivo se pretende medir la presión del neumático obteniendo energía de la rotación de la rueda sobre un eje. En esta aplicación un marco fijo en el que se sitúan los materiales piezoeléctricos recibe las fuerzas de excitación mediante los dientes de un engranaje móvil que impactan sobre los puentes pandeados, generando de esta forma energía. [2]

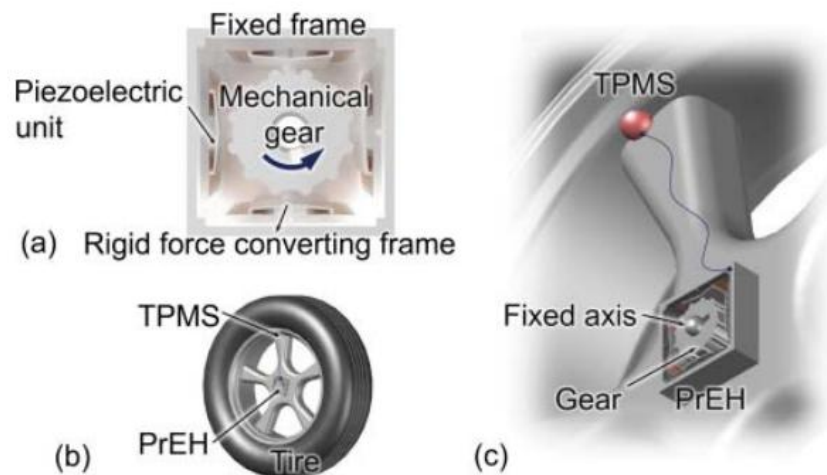


Figura 39 Ilustración del principio de funcionamiento de un PEH de vibración forzada. [2]

Capítulo 3.3. CLASIFICACIÓN SEGÚN NÚMERO DE CAPAS FUNCIONALES.

Una forma habitual de clasificar los recolectores piezoeléctricos (PEH) es atendiendo al número y disposición de las capas activas piezoeléctricas que componen la estructura del dispositivo. Esta clasificación resulta especialmente relevante porque afecta directamente a la cantidad de carga eléctrica generada, la sensibilidad a la deformación mecánica y la flexibilidad del sistema.

En función de este criterio, se distinguen principalmente tres configuraciones: Unimorfo, bimorfo o multicapa. Cada una de estas configuraciones presenta ventajas e inconvenientes en términos de rendimiento energético, complejidad de fabricación, rigidez y adaptabilidad al entorno de uso. Por tanto, su elección dependerá tanto de la aplicación específica como de los requisitos de tamaño, flexibilidad y frecuencia de operación del recolector.

Capítulo 3.3.1. PEH unimorfo.

Un recolector piezoeléctrico es unimorfo si solo cuenta con una capa piezoeléctrica activa adherida al sustrato pasivo. Esta configuración es la mostrada en la Figura 40, donde un material típicamente piezocerámico está unido a una estructura creando en este caso un recolector con tipología de cantilever (con o sin masa sísmica).

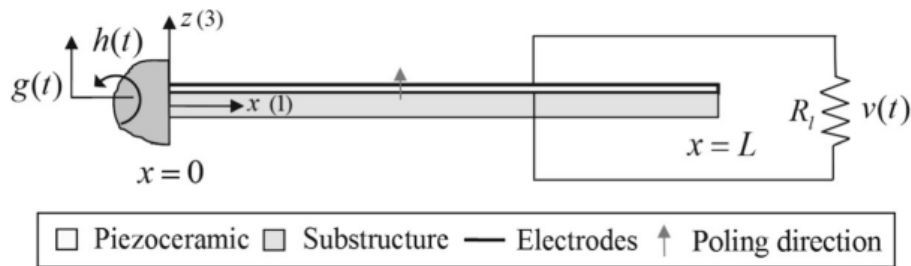


Figura 40 Diagrama de un PEH unimorfo. [6]

Capítulo 3.3.2. PEH bimorfo.

Un recolector piezoeléctrico es bimorfo si cuenta con dos capas piezoeléctricas (conectadas en serie o paralelo) dispuestas simétricamente o sobre ambas caras del sustrato que trabajan típicamente en la configuración d_{31} . En esta morfología cuando una de las superficies es traccionada y la otra es comprimida.

Se dice que las capas están en serie cuando las direcciones de polarización de las dos capas del piezoeléctrico están en direcciones opuestas, como se muestra en la Figura 41a. En comparación con el unimorfo, a la tensión obtenida es el doble y la capacidad de salida es dividida a la mitad.

La configuración en paralelo es usualmente más favorable ya que la corriente y la capacidad de salida se suplican, mientras el voltaje se mantiene. Un ejemplo de esta estructura es la de la Figura 41b.

Este tipo de morfología permite por tanto aumentar la densidad de potencia de las diferentes estructuras como la del cantilever además de que, debido a la elevada rigidez del material piezoeléctrico, se obtienen frecuencias de resonancia menores. Pese a esto, los PEH bimorfos tienen un peor factor de calidad comparado con los unimorfos, existiendo mayores pérdidas en la conversión de energía mecánica. [2] [4]

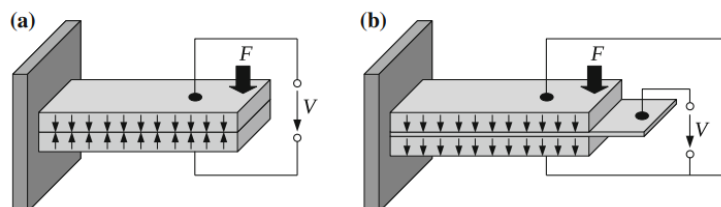


Figura 41 PEH bimorfo en a) serie b) paralelo. [4]

Si se observa la gráfica de la Figura 42, se pueden observar las diferentes potencias de salida de la configuración bimorfa con respecto a la unimorfa en la cara inferior o superior de un cantilever. Como se ha comentado anteriormente, la potencia obtenida con los PEH bimorfos es mayor, pero sin llegar a duplicarse debido al bajo factor de calidad de conversión de energía.

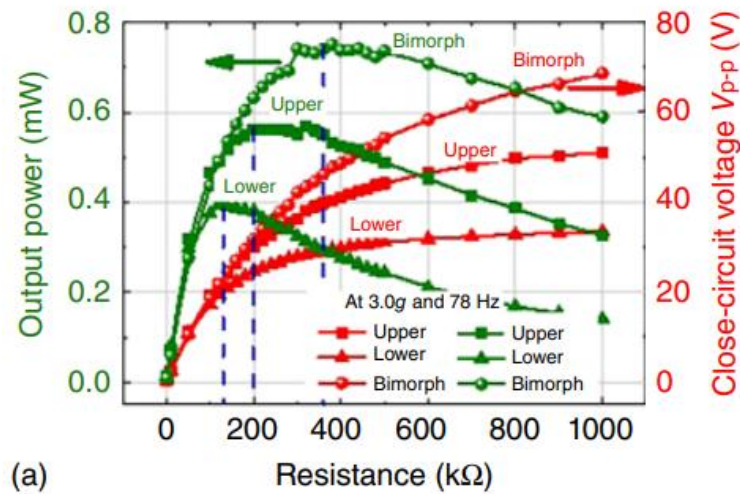


Figura 42 Rendimiento de las diferentes morfologías para diferentes resistencias de carga. [2]

Capítulo 3.3.3. PEH multicapa.

Por último, un recolector multicapa o de tipo stack o apilado se compone de múltiples capas de material piezoeléctrico, habitualmente cerámico, intercaladas con electrodos y conectadas eléctricamente en serie o en paralelo. Esta configuración permite aumentar la densidad de carga generada, así como alcanzar mayores voltajes o corrientes de salida en función del modo de conexión.

Este tipo de morfología es especialmente útil en aplicaciones donde se dispone de espacio reducido y la fuerza aplicada es de tipo compresivo, como en suelos, actuadores embebidos o sistemas de presión.

Entre sus principales ventajas destacan su alta densidad de potencia por volumen y su eficiencia cuando se trabaja en modo d_{33} . Sin embargo, también presenta inconvenientes como la alta rigidez estructural, fragilidad mecánica, mayor peso específico, y una fabricación más compleja y costosa que las configuraciones unimorfa o bimorfa. [2]

Capítulo 3.4. CLASIFICACIÓN SEGÚN MATERIALES.

Los materiales utilizados en recolectores de energía piezoeléctricos (PEH) determinan en gran medida el rendimiento eléctrico, la flexibilidad mecánica, la durabilidad y el coste del dispositivo. En función de su composición y propiedades físicas, los materiales piezoeléctricos se clasifican principalmente en:

- Cerámicos (como PZT, PMN-PT): Alta constante piezoeléctrica, alto voltaje de salida, pero rígidos, frágiles y difíciles de procesar.
- Polímeros (como PVDF, P(VDF-TrFE): Flexibles, fáciles de procesar, adecuados para aplicaciones portátiles o implantables, aunque con menor eficiencia.



- Compuestos: Combinación de polímero y cerámico para mejorar flexibilidad sin perder tanto rendimiento.
- Monocristales (como LiNbO_3 o langasita): Alta sensibilidad y estabilidad térmica, pero caros y poco comunes en aplicaciones comerciales.

Esta clasificación es fundamental para seleccionar el tipo de material según la aplicación: rigidez estructural (cerámicos), adaptabilidad (polímeros) o balance entre ambos.

El material cerámico PZT es uno de los más utilizados en recolectores piezoeléctricos debido a su alto coeficiente de acoplamiento electromecánico (GEMC) y su eficiencia de conversión energética. Comparado con otros materiales como AIN o películas obtenidas por procesos sol-gel, el PZT sinterizado ofrece mejor rendimiento, especialmente en configuraciones volumétricas.

Asimismo, el uso de un sustrato metálico frente a sustratos de silicio presenta ventajas importantes: permite alcanzar frecuencias de resonancia más bajas, mejora la resistencia mecánica y elimina la necesidad de procesos de grabado profundo, lo que reduce la fragilidad del dispositivo a bajas frecuencias.

En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra un resumen de algunas de las características de los materiales más frecuentes usados en los recolectores de energía piezoeléctricos. [2]

MATERIAL	TIPO	PIEZOELECTRICIDAD	FLEXIBILIDAD	PROCESABILIDAD	APLICACIONES
PZT	Cerámico	Alta	Muy baja	Moderada	Vibraciones forzadas
PVDF	Polímero	Media	Alta	Alta	Sensores flexibles y portables
PMN-PT	Cerámico	Muy alta	Muy baja	Baja	Alta potencia
AIN	Cerámico	Baja	Baja	Alta	MEMS, filtros RF
P(VDF-TrFE)	Polímero	Media	Alta	Alta	Textiles, biomecánicas

Tabla 2 Resumen de algunas propiedades de los materiales más frecuentes para PEH.

MATERIAL	RESISTENCIA A LA HUMEDAD	RESISTENCIA TÉRMICA	RESISTENCIA UV
PZT	Baja, requiere encapsulado	Alta ($>200^{\circ}\text{C}$)	Baja (requiere protección)
PVDF	Alta (hidrofóbico)	Media ($80-100^{\circ}\text{C}$)	Alta
PMN-PT	Baja, requiere encapsulado	Alta ($>200^{\circ}\text{C}$)	Baja (requiere protección)
AIN	Baja, requiere encapsulado	Alta ($>200^{\circ}\text{C}$)	Moderada
P(VDF-TrFE)	Alta (hidrofóbico)	Media ($80-100^{\circ}\text{C}$)	Alta

Tabla 3 Resumen de algunas propiedades de los materiales más frecuentes para PEH (continuación).



Capítulo 3.5. RESUMEN.

En la Tabla 4 se muestran algunas de las características más significativas de los modelos estudiados a lo largo de este capítulo.

TIPOLOGÍA	MODO DE OPERACIÓN	APLICACIÓN TÍPICA	FRECUENCIA DE RESONANCIA	VENTAJAS	DESVENTAJAS	MATERIALES COMUNES
Cantilever	d_{31}	Ambiente con vibración ambiental baja	Baja	Alta deformación, buena eficiencia	Fragilidad, poco rango	PZT, PVDF
Matriz de cantilever	d_{31}	Multifrecuencia, ambientes variables	Intermedia	Amplio ancho de banda	Costoso, complejo y baja densidad de potencia	PZT
Viga guiada (puente)	d_{31}	Alta estabilidad, dispositivos fijos	Muy alta	Estabilidad mecánica	Mayor rigidez, baja densidad de potencia	PZT
Puente pandeado	d_{31} d_{33} Vibraciones forzadas o libres	Ambientes con eventos mecánicos intermitentes	Alta	Mayor densidad de potencia	Complejidad estructural, pretensionado	PZT
Diafragma	d_{31}	Sensores de presión	Intermedia	Compatible con la presión	Difícil fabricación	PVDF
Platillo	d_{31}	Ampliación mecánica de energía	Variable	Ampliación del desplazamiento útil	Difícil fabricación, uso limitado	PVDF
Multicapa, apilado o Stack	d_{33}	Carga compresiva o con espacio reducido	Alta	Alta densidad de energía, compacto	Rigidez elevada, fabricación costosa	PZT, PMN-PT

Tabla 4 Resumen de las características principales de los modelos estructurales de PEH.

A partir del análisis comparativo de las distintas tipologías de PEH, se pueden establecer algunas conclusiones en función de las necesidades de una aplicación orientada al entorno agrícola. Este tipo de entorno se caracteriza por condiciones variables de humedad y temperatura, presencia de vibraciones de baja intensidad y necesidad de dispositivos compactos, fiables y de bajo mantenimiento.

Entre las distintas configuraciones geométricas analizadas, la estructura cantilever destaca por su alta eficiencia de conversión, sensibilidad a pequeñas vibraciones lo que favorece mucho la aplicación en este tipo de entornos. Sin embargo, su fragilidad y limitada estabilidad mecánica pueden representar un problema si no se controla adecuadamente la amplitud de las vibraciones o si existen golpes esporádicos.

Como contraparte, las estructuras tipo puente o guiadas ofrecen una mayor estabilidad mecánica, menor desplazamiento y mayor robustez ante condiciones de estrés prolongado. Su mayor frecuencia de resonancia puede ser una limitación, aunque pueden adaptarse mediante el uso de masas sísmicas.

En cuanto a los materiales, los polímeros piezoeléctricos como el PVDF presentan ventajas significativas para aplicaciones agrícolas: son flexibles, resistentes a la humedad y fácilmente procesables, aunque con menor rendimiento energético que los materiales cerámicos como el PZT, los cuales requieren mayor protección estructural y encapsulado para garantizar su durabilidad.



Desde el punto de vista funcional, las configuraciones unimorfas ofrecen un buen equilibrio entre sencillez, resistencia y adaptabilidad, mientras que las configuraciones bimorfas con materiales cerámicos podrían emplearse si se implementan en estructuras reforzadas o encapsuladas, además de que aumentan su densidad de energía.

Capítulo 3.6. CONSIDERACIONES DEL DISEÑO DE PEH.

El diseño de un PEH debe centrarse en maximizar el estrés mecánico inducido en la capa piezoeléctrica activa, ya que este parámetro está directamente relacionado con la cantidad de energía eléctrica generada. En este contexto, la estructura de viga en voladizo es una de las más utilizadas debido a su capacidad para producir una deformación media elevada ante una excitación vibratoria, lo que se traduce en una alta eficiencia de conversión energética.

Actualmente, una parte significativa de la investigación en este campo se basa en diseños tipo cantilever formados por capas piezoeléctricas y sustratos no piezoeléctricos de igual longitud. En este tipo de configuraciones, la frecuencia de resonancia del dispositivo debe ser cuidadosamente ajustada para que coincida con la frecuencia dominante de la fuente de vibración, con el fin de maximizar la transferencia de energía. Dado que muchas vibraciones presentes en entornos naturales, como maquinaria, estructuras o suelos; se encuentran por debajo de los 200 Hz, la investigación se ha centrado en desarrollar PEH que operen eficazmente en dicho rango.

Para ajustar la frecuencia de resonancia, es esencial tener en cuenta factores como la longitud y espesor del cantilever, así como la inclusión de una masa sísmica en su extremo libre. Sin embargo, estas variables están limitadas por consideraciones de fabricación microelectromecánica (MEMS) y por el riesgo de fractura estructural, especialmente cuando se incrementa demasiado la masa o se extiende la longitud.

Aunque los cantilever presentan un rendimiento elevado en torno a su frecuencia de resonancia, su ancho de banda operativo limitado representa una desventaja frente a fuentes de vibración no constantes. Para mitigar esta limitación, se han propuesto varias soluciones estructurales, entre las que destacan el uso de matrices de cantilever con distintas longitudes para cubrir un rango más amplio de frecuencias y el desarrollo de estructuras no lineales como los PEH de puente pandeado.

Capítulo 3.7. EJEMPLOS GRÁFICOS DE PEH.

Con el fin de complementar las clasificaciones presentadas a lo largo de este capítulo, se recopilan imágenes representativas de distintos recolectores piezoeléctricos obtenidas de la bibliografía consultada. Estas ilustraciones permiten observar con mayor claridad la morfología, escala y configuración estructural de los dispositivos analizados, sirviendo como apoyo visual para comprender mejor las tipologías y su potencial aplicación.

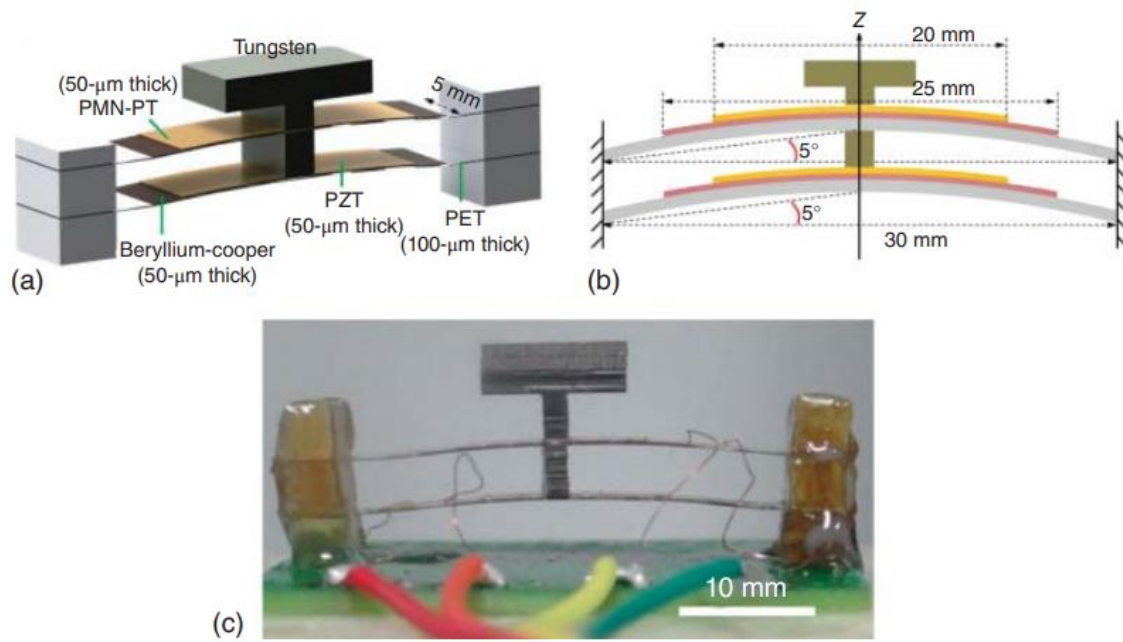


Figura 43 a) Modelo 3D de un PEH en forma de I b) Esquemático de un PEH en forma de I. c) Foto real del PEH. [2]

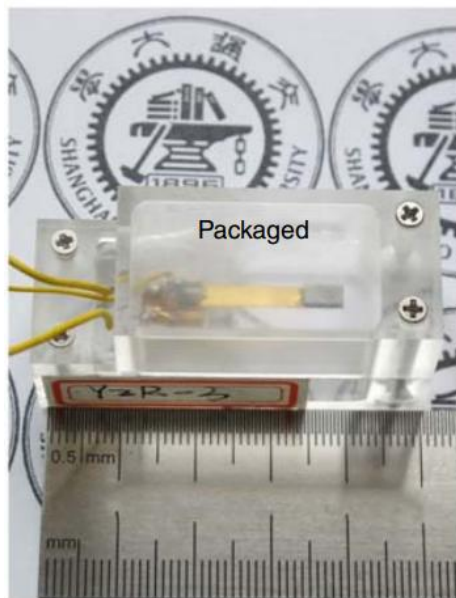


Figura 44 fotografía de un PEH bimorfo encapsulado. [2]

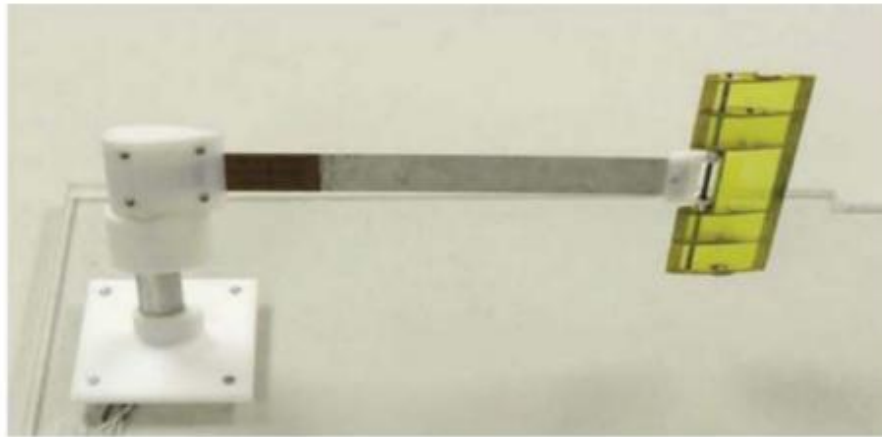


Figura 45 Recolector de energía aeroelástico. [2]

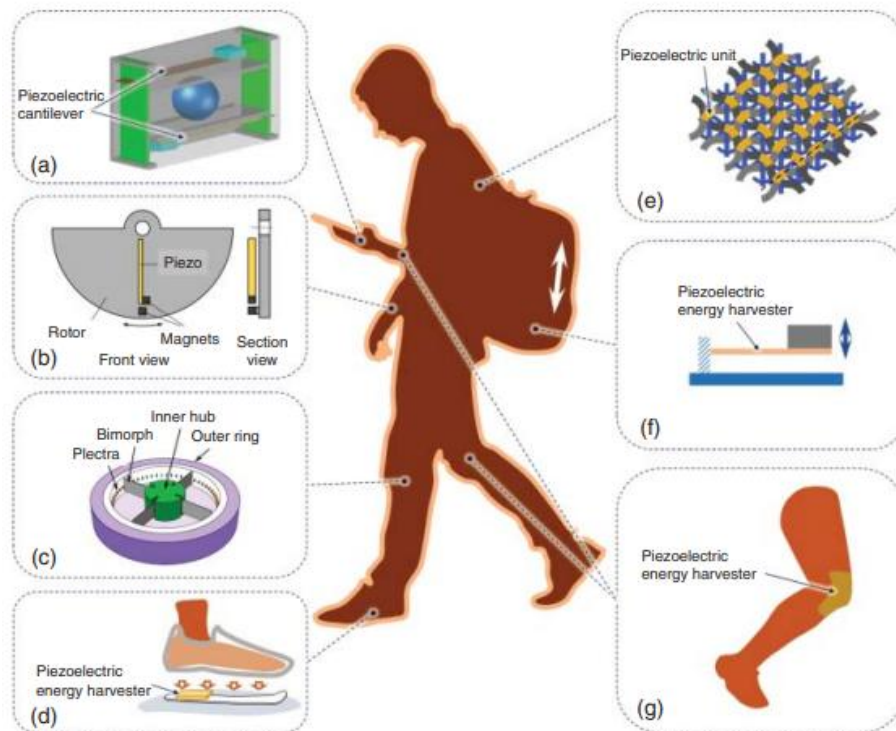


Figura 46 Posibles localizaciones de diferentes PEH en una persona. [2]



Máster en Semiconductores y Tecnologías Electrónicas
Sergio Carrasco Hernández



Capítulo 4. CIRCUITOS DE INTERFAZ.

Existen muchas formas de extraer potencia desde un recolector piezoeléctrico, desde un simple rectificador de diodos a sistemas mucho más complejos que requerirán parte de la energía recolectada para funcionar. Estos últimos circuitos activos se denominan circuitos de extracción de carga eléctrica síncronos o SECE de sus siglas en inglés. Los SECE incrementarían la energía extraída y además permitirían desacoplar la carga del recolector, disminuyendo los efectos sobre el PEH producidos por la circuitería que tiene que alimentar. A continuación se describirán desde los circuitos más simples a algunos más complejos, así como sus características principales. [4]

Capítulo 4.1. RESISTENCIA COMO CARGA.

El circuito de interfaz más simple es una resistencia conectada entre los extremos del PEH. Debido a la ausencia de una etapa de rectificación previa, el voltaje y la corriente en la carga es alterna. Además, no se puede almacenar energía para un posterior uso. Por esto, este sistema no es adecuado para una aplicación realista. Sin embargo, es un sistema ampliamente usado para caracterizar los dispositivos piezoeléctricos para saber sus capacidades de potencia de salida. [4]

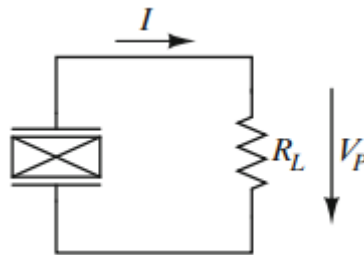


Figura 47 Circuito de interfaz con resistencia como carga. [4]

Analizando el circuito de la Figura 47, se observa que se trata de un sistema lineal, donde la corriente es obtenida directamente a partir de la relación de la resistencia y la tensión $I = \frac{V_p}{R_L}$. Aplicando lo visto en el Capítulo 2.5, en concreto el desarrollo del sistema presente en la Ecuación 12, se puede representar nuevamente el sistema en el dominio de Laplace como:

$$\begin{cases} F = k_p \cdot \varepsilon + \Gamma \cdot V_p \\ I = \Gamma \cdot \dot{\varepsilon} - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases} \rightarrow \begin{cases} ma = (ms^2 + ds + k)z + \Gamma \cdot V_p \\ \frac{V_p}{R_L} = s\Gamma z - sC_p \cdot V_p \end{cases} \quad \text{Ecuación 26}$$

Siendo d el amortiguamiento parásito, $k = k_p + k_s$ la suma de la rigidez del piezoeléctrico y del material de soporte y z el desplazamiento de la masa sísmica.

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior se obtiene la tensión en el piezoeléctrico, teniendo en cuenta que $s = j\omega$, denotando la variación de la tensión con la frecuencia.

$$V_p = \frac{ma\Gamma s}{\left(sC_p + \frac{1}{R_L}\right)(ms^2 + ds + k) + \Gamma^2 s}$$

Ecuación 27

De este modo, la potencia eficaz en la resistencia respondería a la expresión:

$$P_{res} = \frac{\hat{V}_p^2}{2R_L} =$$

Ecuación 28

$$= \frac{m\hat{a}}{2} \cdot \frac{\omega^2 R_L \Gamma^2}{\left[k - (m + C_p d R_L) \omega^2\right]^2 + \omega^2 \left[d + R_L (\Gamma^2 + C_p (k - m \omega^2))\right]^2}$$

Derivando e igualando a cero la Ecuación 28 se puede obtener el valor de la resistencia necesaria para que la potencia disipada sea máxima:

$$\frac{dP_{res}}{dR_L} = 0 \rightarrow R_{L,P_{m\acute{a}x}} = \sqrt{\frac{d^2 \omega^2 + (k - m \omega^2)^2}{C_p^2 d^2 \omega^4 + (\Gamma^2 \omega + \omega C_p (k - m \omega^2))^2}}$$

Ecuación 29

Si de igual forma se deriva con respecto al factor de acople Γ , se obtiene el valor óptimo:

$$\frac{dP_{res}}{d\Gamma} = 0 \rightarrow \Gamma_{P_{m\acute{a}x}} = \frac{1}{\omega R_L} \sqrt{(1 + C_p^2 R_L^2 \omega^2) \cdot [d^2 \omega^2 + (k - m \omega^2)^2]}$$

Ecuación 30

Capítulo 4.2. RECTIFICADOR DE PUENTE COMPLETO CON CONDENSADOR.

Los rectificadores de puente completo son un sistema simple de convertir la corriente alterna proveniente de los PEH a corriente continua para ser usada en los dispositivos electrónicos convencionales. Estos sistemas permiten conectar un condensador en paralelo a la carga que sirve como almacenador de energía, como se ve en la Figura 48.

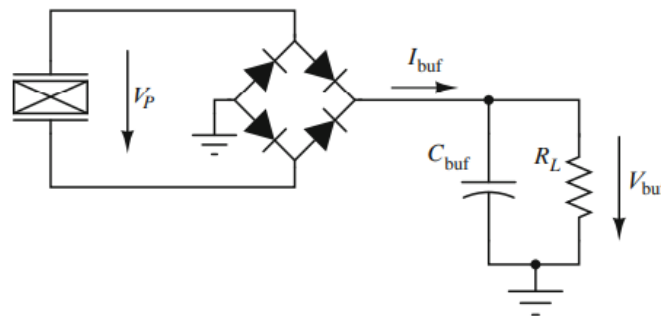


Figura 48 PEH con un rectificador de puente completo de diodos y una carga compuesta por una resistencia y un condensador. [4]

Si se toma el condensador C_{buf} como lo suficientemente grande como para que la tensión V_{buf} se mantenga constante después de varios ciclos de excitación y los diodos

son tomados como ideales las formas de onda de la tensión en el PEH, la corriente I_{buf} y la excitación serían las mostradas en la Figura 49.

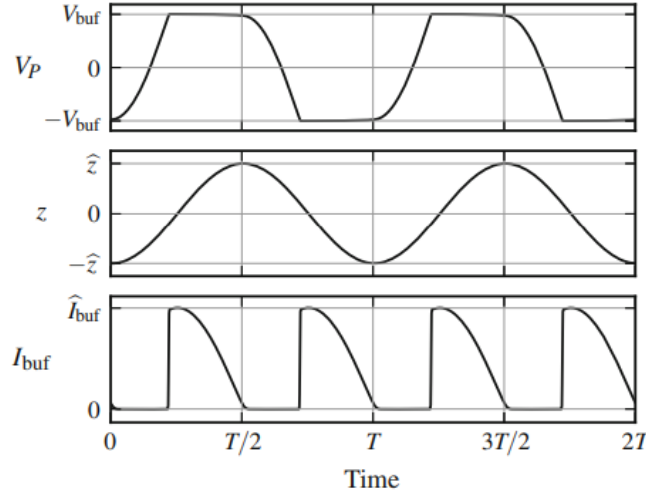


Figura 49 Formas de onda de la tensión de salida del PEH, el movimiento de la masa y la corriente que circula por el condensador C_{buf} . [4]

En este circuito, los diodos solo conducen cuando $|V_p| \geq V_{buf}$ y dado que V_{buf} es constante, el valor de V_p satura entre $\pm V_{buf}$. Una vez que la masa comienza alcanza su velocidad mínima y comienza a ir en la dirección del estado de reposo la tensión V_p disminuye y la corriente de carga del condensador se vuelve cero hasta que de nuevo se produce una deformación del piezoeléctrico fuera de la situación de equilibrio y la tensión $|V_p|$ alcanza el valor $|V_{buf}|$. Mientras que la tensión en los extremos del recolector no es superior a V_{buf} , no se produce recolección de energía ya que los diodos bloquean el paso de corriente. En este punto el PEH estaría trabajando como en circuito abierto. [4]

La carga acumulada en el condensador en medio periodo de la excitación se puede calcular mediante la integral de la corriente I_{buf} que recarga el condensador, que en este caso sería la carga disipada en la resistencia ya que V_{buf} se mantiene constante.

$$\int_0^{T/2} I_{buf} dt = \frac{V_{buf}}{R_L} \cdot \frac{T}{2} = \frac{V_{buf}}{R_L} \cdot \frac{\pi}{\omega} \quad \text{Ecuación 31}$$

Si se sustituye la corriente por la Ecuación 26, se obtiene el valor de la tensión en los extremos de la carga:

$$\int_0^{T/2} (\Gamma \cdot \dot{z} - C_p \cdot \dot{V}_p) dt = \frac{V_{buf}}{R_L} \cdot \frac{\pi}{\omega} \rightarrow V_{buf} = \frac{R_L \Gamma \omega \hat{z}}{R_L C_p \omega + \frac{\pi}{2}} \quad \text{Ecuación 32}$$

A partir de la Ecuación 32 se puede obtener la potencia extraída mediante el rectificador de puente completo ideal:

$$P_{rect} = \frac{V_{buff}^2}{R_L} = \frac{R_L \Gamma^2 \omega^2 \hat{z}^2}{\left(R_L C_p \omega + \frac{\pi}{2}\right)^2}$$

Ecuación 33

En contraste con la carga puramente resistiva, el rectificador representa una carga no lineal que depende de la amplitud del desplazamiento \hat{z} del PEH.

Capítulo 4.3. EXTRACCIÓN DE CARGA SÍNCRONA.

Un sistema de extracción de carga eléctrica síncrona (SECE) simple está compuesto por un rectificador, tres interruptores y una bobina como se observa en la Figura 50. En este circuito de interfaz, un rectificador o controlador de voltaje negativo NVC voltear la mitad de la onda de voltaje sinusoidal V_p del PEH al dominio de tensión positiva. Los interruptores se usan para almacenar temporalmente la energía en la bobina L antes de que sea liberada al condensador de almacenamiento C_{buf} . Esta tipología de interfaz permite extraer toda la energía almacenada en la capacitancia C_p del piezoeléctrico en cada uno de sus ciclos, a diferencia del circuito formado únicamente por el puente rectificador, que hacía saturar el valor de V_p .

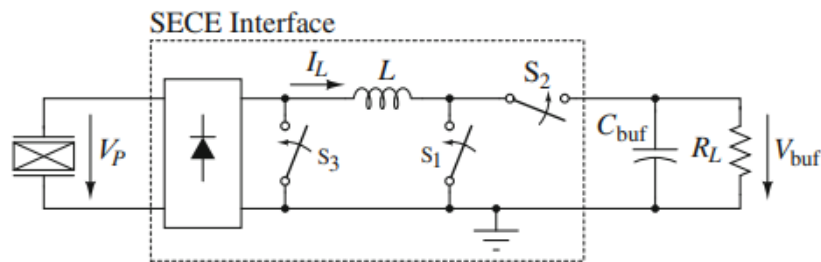


Figura 50 PEH con interfaz SECE y una carga. [4]

En la Figura 51 se muestran las diferentes formas de onda de la tensión V_p , el desplazamiento de la masa z , la corriente por el inductor I_L y las señales de control de los interruptores. Nótese que V_p no presenta una forma sinusoidal, sino que está distorsionada y segmentada en tramos debida a la interrupción abrupta de la carga sobre el recolector cada medio ciclo y al hecho de que la masa de referencia está ubicada en el lado opuesto del circuito, lo que invierte la polaridad. Como resultado V_p sigue la evolución senoidal de $z(t)$ alcanzando máximos justo antes de que se active la transferencia de carga hacia el inductor.

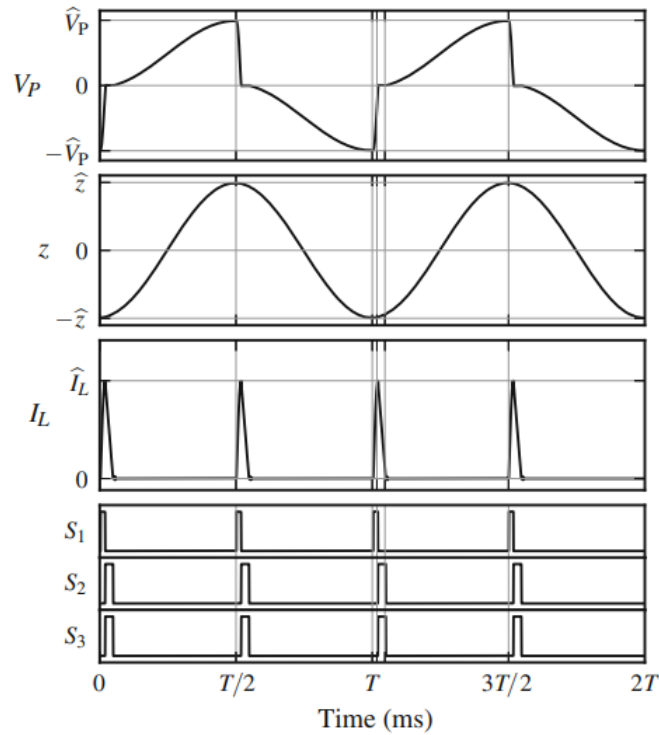


Figura 51 Formas de onda típicas de voltaje de salida del PEH V_p , el movimiento de la masa, la corriente a través de la bobina, I_L y las señales de control de los interruptores. [4]

Como se puede observar, el sistema SECE opera únicamente en determinados instantes definidos por las señales de control S_1 , S_2 y S_3 , donde la potencia es extraída del PEH. Los instantes están definidos por el máximo y mínimo desplazamiento de la masa que están en fase con el voltaje máximo y mínimo entre los extremos del PEH. En los intervalos en los que no se extrae potencia, el SECE deja al PEH en circuito abierto, bloqueando el paso de corriente.

Cuando $|V_p|$ es máximo, la energía acumulada en la capacitancia C_p del piezoeléctrico también es máxima, por lo que en ese instante la energía es transferida de forma instantánea a la inductancia a través del interruptor S_1 , resultando en una caída rápida de la tensión V_p . Cuando V_p cruza el valor de $0V$, el interruptor S_1 es puesto en corte y S_2 y S_3 son activados, liberando la energía acumulada en la inductancia hacia el condensador de almacenamiento C_{buf} . Después de que el traspaso de energía se ha completado, la interfaz del SECE es apagada, poniendo S_2 y S_3 en corte, aplicando una impedancia infinita entre los extremos del piezoeléctrico.

Tomando el modelo SECE como ideal y por tanto este circuito de interfaz no presentaría pérdidas, la corriente durante gran parte del tiempo sería nula y por tanto del modelo matemático de la Ecuación 13 e integrando con $I = 0$ se obtendría la expresión de la amplitud para la amplitud de la tensión de salida del PEH:

$$\begin{cases} F_e = k_p \cdot z + \Gamma \cdot V_p \\ I = \Gamma \cdot \dot{z} - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases} \rightarrow \hat{V}_p = \frac{2\Gamma}{C_p} \hat{z}$$

Ecuación 34

La energía almacenada en la capacidad del piezoeléctrico sería extraída completamente una vez por cada semiperiodo de excitación, por lo que la potencia extraída puede ser calculada con:

$$P_{SECE} = \frac{\frac{1}{2}C_p \hat{V}_p^2}{\frac{T}{2}} = \frac{2\Gamma\omega}{\pi C_p} \hat{z}^2$$

Ecuación 35

El valor óptimo para el factor de acoplamiento electromecánico viene definido por la expresión:

$$\Gamma_{SECE,opt}^2 = \frac{\pi d \omega C_p}{4}$$

Ecuación 36

Capítulo 4.4. COMPARACIÓN ENTRE CARGA RESISTIVA, RECTIFICADOR DE PUENTE Y SECE.

Capítulo 4.4.1. Influencia del factor de acople electromecánico Γ .

En este capítulo se realiza un resumen de las diferencias entre los tres circuitos de interfaz estudiados anteriormente. En la Figura 52, Figura 53 y Figura 54 se observan las potencias recolectadas normalizadas referidas a la máxima potencia obtenible según la Ecuación 11.

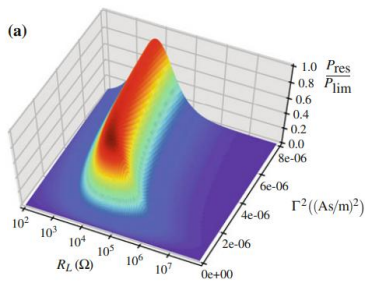


Figura 52 Potencia recolectada normalizada con resistencia como carga, asumiendo frecuencia de excitación como la frecuencia de resonancia. [4]

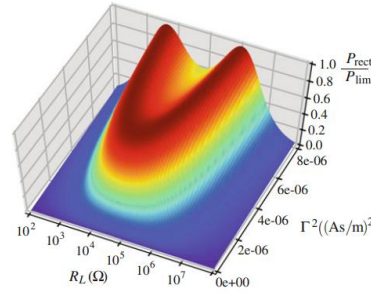


Figura 53 Potencia recolectada normalizada con rectificador y condensador como carga, asumiendo frecuencia de excitación como la frecuencia de resonancia. [4]

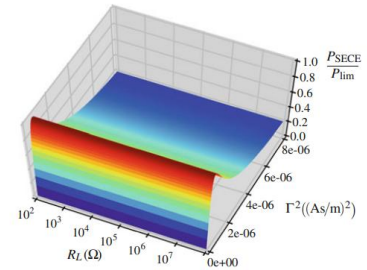


Figura 54 Potencia recolectada normalizada con SECE y condensador como carga, asumiendo frecuencia de excitación como la frecuencia de resonancia. [4]

En la Figura 52 se observa que solo un corto rango de valores de resistencias como carga permitiría obtener la máxima potencia del PEH, mientras que existe un gran rango de valores del factor de acoplamiento electromecánico Γ que permitiría aprovechar esta potencia máxima.

En la Figura 53 se consigue aumentar el rango de resistencias de carga que permitirían alcanzar un valor elevado de la potencia normalizada, manteniendo además el rango del factor de acoplamiento electromecánico Γ del caso anterior.

Por último, en la Figura 54, se consigue desacoplar el valor de la carga del sistema propuesto, por lo que para cualquier valor de R_L se podría obtener la potencia máxima. Sin embargo, este sistema estaría únicamente maximizado para el valor del factor de acoplamiento electromecánico Γ definido en la Ecuación 36.

Una mejor comparación del factor de acoplamiento electromecánico cuadrado Γ^2 para los diferentes circuitos de interfaz se observa en las gráficas de la Figura 55.

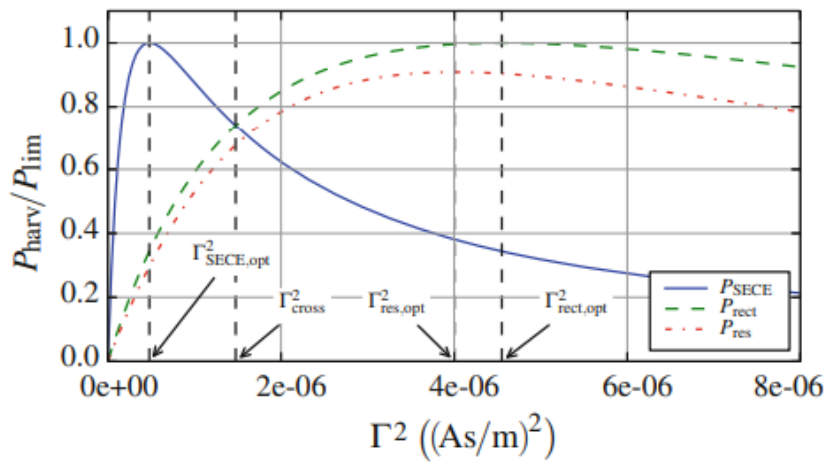


Figura 55 Comparación de la potencia recolectada normalizada de los tres circuitos de interfaz propuestos en función del factor de acoplamiento electromecánico con $R_L = 10k\Omega$. [4]

Como primer dato a destacar de esta gráfica es que tanto el circuito de interfaz de carga SECE como el de rectificador-condensador alcanzan el valor máximo de potencia, como se esperaba tras el análisis de los capítulos anteriores, ya que existe al menos un par de valores de R_L y Γ^2 que optimizan el circuito. Por el contrario, para la carga puramente resistiva, no existe para este valor de $R_L = 10k\Omega$ un Γ^2 que optimice al máximo su potencia.

Además, debe tenerse en cuenta que normalmente un mayor Γ^2 implica una mejor conversión de energía mecánica en eléctrica. Sin embargo, cuando Γ^2 es excesivamente alto, el sistema sufre un aumento significativo del amortiguamiento eléctrico. Esto amplifica la fuerza de retroalimentación sobre el recolector causando que el desplazamiento de la masa \hat{z} disminuya conforme al sistema de la Ecuación 14, reduciendo la cantidad de energía mecánica disponible para ser convertida.

La cuestión ahora radica en por qué el factor de acoplamiento electromecánico cuadrado óptimo es tan bajo en el SECE en comparación con el de los otros circuitos de interfaz. En el SECE, el desplazamiento de la masa del piezoeléctrico \hat{z} se ve más afectado por la fuerza de amortiguamiento generada por el producto de $\Gamma \cdot V_p$ tal y como se describe en el sistema de ecuaciones de la Ecuación 12:

$$\begin{cases} F = k_p \cdot \varepsilon + \Gamma \cdot V_p \\ I = \Gamma \cdot \dot{\varepsilon} - C_p \cdot \dot{V}_p \end{cases}$$

Como el SECE genera tensiones V_p más elevadas que en los otros circuitos de interfaz, la fuerza de retroalimentación también es mayor. Por ello, para evitar que el sistema se sobreamortigue y el desplazamiento \hat{z} disminuya es necesario operar con factores de acoplamiento electromecánico Γ menores.

Capítulo 4.4.2. Influencia de la frecuencia de resonancia.

En las siguientes gráficas se observa una comparativa entre la potencia recolectada normalizada para los diferentes circuitos de interfaz. En la Figura 56a se muestra el caso en el que la frecuencia de excitación coincide con la de resonancia, mientras que en la Figura 56b no.

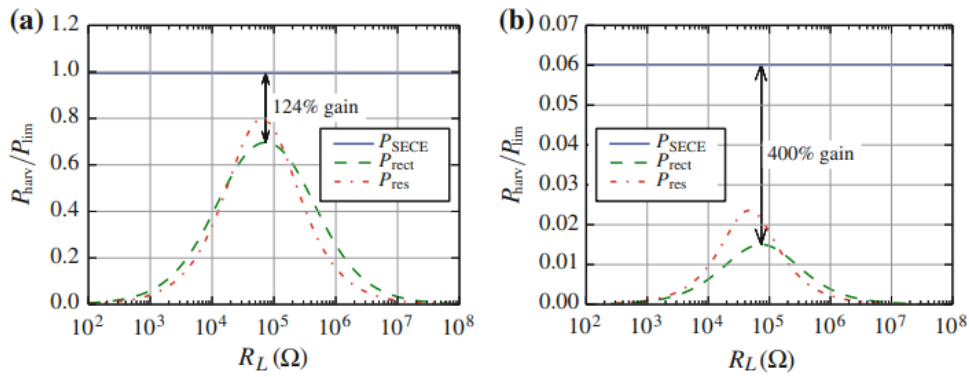


Figura 56 Potencia recolectada normalizada para SECE, rectificador-condensador y resistencia como carga para a) frecuencia de resonancia y b) fuera de la frecuencia de resonancia. $\Gamma^2 = 0.56 \cdot 10^{-6} \left(\frac{As}{m}\right)^2$, $\hat{z} = 45 \mu m$. [4]

A la frecuencia de resonancia la potencia extraída por la interfaz SECE es casi tan alta como la máxima extraíble, siendo capaz de obtener una potencia un 124% mayor que la interfaz del rectificador. Por el contrario, cuando el PEH se excita fuera de la frecuencia de resonancia, la potencia extraída en las tres interfaces cae considerablemente. En este caso la interfaz SECE mejora la potencia extraída en un 400% con respecto al rectificador.

De este modo, la ganancia que puede ofrecer el SECE frente al rectificador depende directamente de la fuerza de retroalimentación, la cual está determinada por el producto $\Gamma \cdot \hat{V}_p$. Cuando el sistema es excitado en resonancia, la amplitud del voltaje piezoeléctrico V_p es elevada, lo que provoca una fuerza de retroalimentación más intensa, reduciendo el desplazamiento de la masa. Dado que el SECE amortigua el sistema más que el rectificador, la potencia extraída solo puede incrementarse levemente, especialmente para valores altos del factor de acoplamiento. En cambio, bajo excitación fuera de resonancia, el voltaje V_p es menor, y por tanto también lo es la retroalimentación, lo que permite al SECE recolectar más potencia relativa que otras interfaces en ese régimen. [4]



Capítulo 5. NODO SENSOR DE PARÁMETROS DE INTERÉS PARA LA APLICACIÓN PROPUESTA.

Tradicionalmente, la producción agrícola se ha basado en la experiencia y la intuición del agricultor, con una escasa incorporación de tecnología. Sin embargo, con el avance de las tecnologías aplicadas al ámbito agrícola, el uso de sensores para medir el estado de los cultivos se ha convertido en una herramienta clave para mejorar tanto el rendimiento como la calidad de la producción. La detección temprana de condiciones adversas o impropias en el entorno de cultivo puede ser determinante para optimizar recursos, prevenir enfermedades y maximizar la eficiencia del sistema.

Entre las variables de mayor interés se encuentran parámetros ambientales como la temperatura, la humedad relativa (del aire y del suelo) y la intensidad lumínica, los cuales influyen directamente en procesos fisiológicos de las plantas como la fotosíntesis y la transpiración. Asimismo, parámetros relacionados con el estado de salud de las plantas como la altura, el área de la hoja, y los niveles de clorofila y nitrógeno en las hojas, permiten evaluar la salud del cultivo. También se consideran factores como la acidez del suelo, que puede verse alterada por un exceso de fertilizantes y derivar en una mayor disponibilidad de metales pesados, generando potencial contaminación de los productos.

Dado que la idea final de este proyecto consiste en implementar un sistema autosuficiente energéticamente en un futuro, se plantea la utilización de sensores de bajo consumo que podrían ser integrados en un nodo sensor energéticamente autosuficiente basado en recolección piezoeléctrica. Entre las magnitudes a medir se desarrollarán aplicaciones concretas que midan la humedad, temperatura y luminosidad.

Capítulo 5.1. SENSOR DE HUMEDAD RELATIVA AIRE Y TEMPERATURA.

Como posible sensor para medir tanto la temperatura como la humedad relativa del aire, se propone el modelo SHTC3, un sensor digital optimizado para aplicaciones de batería diseñado para tener un pequeño tamaño y consumo. Este tipo de sensor es ideal para entornos agrícolas como invernaderos debido a bajo consumo y amplio rango de funcionamiento. Además, su resistencia a ambientes húmedos y su encapsulado cerrado lo hacen muy adecuado para funcionar en este tipo de entornos sin necesidad de recubrimientos adicionales.

Este dispositivo se basa en un sensor de tipo capacitivo para medir la humedad y un sensor de temperatura que usa el bandgap de los semiconductores que lo componen. En concreto este tipo de sensores permiten obtener la temperatura a raíz del cambio de tensión umbral en la unión de un diodo con esta magnitud.

En cuanto a sus características principales se encuentran una precisión de $\pm 2\%HR$ $\pm 0.2^{\circ}C$ con un consumo de operación de $430 \mu A$ durante la medición y $0.3 \mu A$ en el modo *Sleep* o de bajo consumo, lo que si se alimenta este sensor con una tensión típica

de 3,3V se obtienen consumos de 1,42mW y 1μW respectivamente. Su reducido consumo lo convierte en un candidato ideal para sistemas alimentados mediante PEH.

Los rangos de medida de este chip son de 0 a 100% de RH (humedad relativa) y para la temperatura un rango de −40°C a 125°C. Las tensiones que soporta este dispositivo varían entre 1.62V y 3.6V. Esta tensión de alimentación ofrece la flexibilidad necesaria para integrarlo directamente con microcontroladores de bajo consumo.

La comunicación con el sensor SHTC3 se basa en protocolo I^2C con velocidades de hasta 1MHz. Esta comunicación permite que el encapsulado y por tanto el sensor sean menor tamaño, constando solo de cuatro terminales como se observa en la Figura 57, dónde además se plantea la comunicación mediante este bus con un microcontrolador. [7]

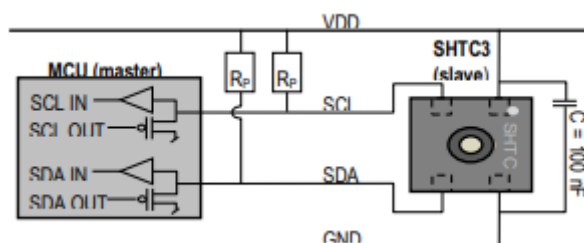


Figura 57 Circuito típico de aplicación para el SHTC3 con resistencias de pull-up y un condeador de desacoplo. [7]

Capítulo 5.2. SENSOR HUMEDAD SUELO.

La humedad del suelo es una de las variables ambientales más relevantes en entornos agrícolas, especialmente en invernaderos donde la gestión del riego es crítica. Este parámetro podría medirse usando el sensor SKU SEN0193. Se trata de un sensor de hidratación o humedad del suelo que usa un sensor de tipo capacitivo resistente a la corrosión, apto para instalaciones en medios con alta humedad.



Figura 58 Sensor de humedad del suelo SKU SEN0193. Dimensiones y vista superior de la PCB. [8]

Este dispositivo mide la humedad volumétrica del suelo a través de variaciones en su capacidad eléctrica. Entre sus características eléctricas la tensión de alimentación del dispositivo puede estar en un rango de 3.3V a 5.5V y mediante una salida analógica se obtiene un nivel de humedad proporcional al valor leído en un microcontrolador.

Como desventaja, el consumo de este tipo de sensores se encuentra en torno a 5mA, un valor bastante elevado como para su simple implementación en un sistema de bajas

prestaciones energéticas. Para reducir el consumo, se plantea controlar la alimentación del sensor mediante un MOSFET gobernado por un GPIO del microcontrolador, activándolo solo durante las mediciones. [8]

El funcionamiento de este sensor se basa en una señal de 1.5MHz con un ciclo de servicio de aproximadamente el 50% generada por un TLC555 que es filtrada por un filtro RC, donde la capacitancia depende de la humedad del suelo. Este condensador está formado por pistas coplanares en la PCB que permiten filtrar las altas frecuencias de salida del 555. En la Figura 59 se observa el circuito que forma este sensor, contando con un detector de valor máximo formado por un diodo, un condensador y una resistencia.

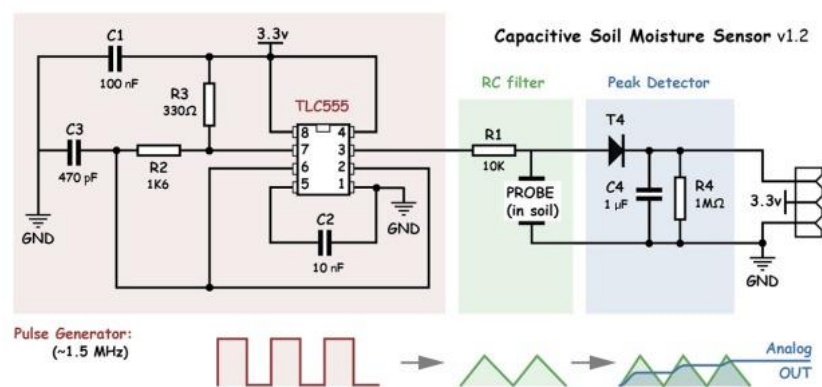


Figura 59 Esquema eléctrico del sensor SKU SEN0193. [9]

La tensión de salida analógica en función de la capacidad del suelo del circuito anterior vendrá dada por la Ecuación 37. Si esta ecuación se representa para una tensión de alimentación de 3.3V y en un rango de 50pF a 800pF que corresponderían a las capacidades típicas del suelo seco o saturado respectivamente, se obtiene la gráfica de la Figura 60. Si bien esta gráfica se trata de una aproximación y será necesario realizar una calibración del sensor una vez instalado sobre el sustrato, así como disponer de un ADC con una resolución de al menos 10bits.

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{\sqrt{1 + (2\pi fRC)^2}} = \frac{V_{in}}{\sqrt{1 + 8.88 \cdot 10^{21} \cdot C^2}}$$

Ecuación 37

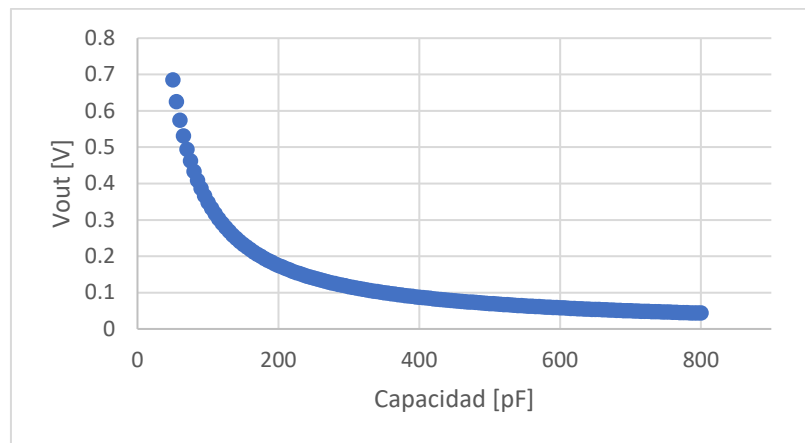


Figura 60 Representación de la variación de tensión del sensor SKU SEN0193 con la capacidad del suelo.

Capítulo 5.3. SENSOR DE LUMINOSIDAD.

Como posible sensor para medir la luminosidad en el entorno agrícola del invernadero, se propone el modelo VEML7700, un sensor de luz ambiental digital de alta sensibilidad. Este sensor está especialmente diseñado para aplicaciones que requieren una medida precisa de la iluminación bajo condiciones variables. Se trata de un sensor con comunicación I²C que está encapsulado en un tamaño compacto de 6.8x2.35x3.0mm, como se muestra en la Figura 61.

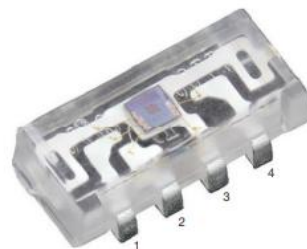


Figura 61 Sensor VEML7700. [10]

Su salida es lineal con respecto a la iluminancia (cantidad de luz que incide sobre una superficie) y está calibrada en lux, lo que facilita su uso en sistemas agrícolas donde el seguimiento del ciclo de luz es fundamental.

El consumo en operación del VEML7700 es de tan solo 170 μ A, y menos de 1 μ A en modo de espera. Con un rango de tensión de alimentación de 2.5 V hasta 3.6 V, puede integrarse sin problemas en sistemas IoT de bajo consumo. La Figura 62 se representa el esquema típico de conexión de este sensor con resistencias de pull-up.

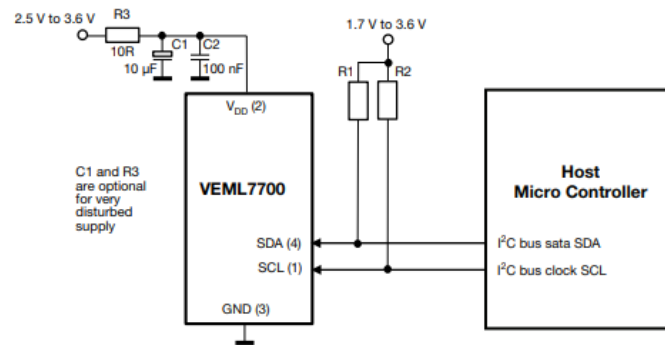


Figura 62 Esquema de conexión del VEML7700. [10]

Capítulo 5.4. SENSOR DE CONSUMO (OPCIONAL).

Para monitorizar el consumo energético del sistema o de alguno de los bloques en concreto se propone el uso del INA226, un sensor de corriente, tensión y potencia de alta precisión y bajo consumo energético, 330µA en uso y 10µA en reposo. Este sensor proporciona una salida digital por el bus de comunicación I²C que permitirá estimar el consumo acumulado del sistema, monitorizar las fuentes de energía etc. En la Figura 63 se observa el esquema eléctrico de este sensor, el cual necesita una resistencia tipo *Shunt* para poder medir la corriente y por tanto potencia que consuma el dispositivo IoT.

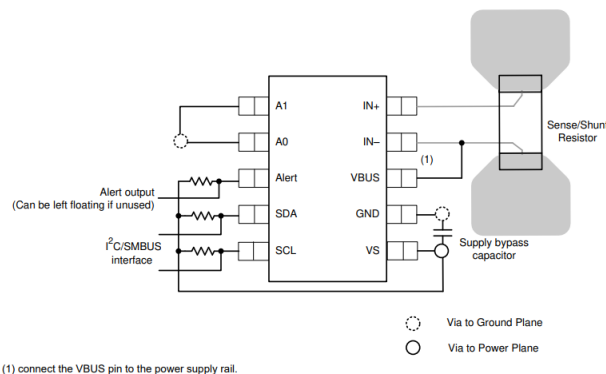


Figura 63 Circuito eléctrico y layout recomendable para el INA226. [11]

Este sensor es un sensor opcional que serviría en este prototipo para monitorizar la eficiencia del PEH así como el nivel de carga de una posible batería o supercondensador que almacenara la energía recolectada de forma temporal para su uso en el dispositivo. En caso de que no se quisiera monitorizar estos valores se podría eliminar el circuito integrado de la placa de circuito impreso para eliminar su parte de consumo.

Este sensor además podría permitir controlar la cantidad de energía recolectada por el PEH intercambiando la resistencia Shunt que se emplea para medir con un *jumper* o interruptor de tres vías en la PCB del dispositivo.

Capítulo 5.5. MICROCONTROLADOR.

Como posible microcontrolador para este sistema se plantea el uso del ESP32-S3 ya que es una de las opciones más versátiles y eficientes para proyectos de IoT además de que se cuenta con cierta familiaridad con esta familia de dispositivos gracias a proyectos anteriores. Este microcontrolador integra conectividad WiFi y Bluetooth 5 Low Energy, lo que facilitará integrar todas las funciones necesarias sin requerir módulos externos.

El ESP32-S3 ofrece diferentes modos de consumo, que van desde tan solo 5 μ A en modo hibernación a 240mA en modo activo durante transmisiones WiFi. Dado que el consumo en la transmisión de datos es elevado, para un primer posible prototipo IoT se podría emplear el protocolo de comunicación BLE, con un consumo reducido de aproximadamente 20mA, siendo más compatible con la energía disponible en los sistemas PEH.

Si se emplea la placa de desarrollo ESP32-S3 Mini de la Figura 64 no será necesario implementar un DC-DC de 3.3V pues esta placa integra este componente.

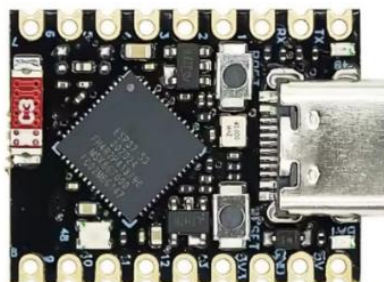


Figura 64 ESP32-S3 mini.

Capítulo 5.6. GESTOR DE CARGA.

Para este primer diseño, se podría emplear una batería de iones de litio como almacenamiento temporal de la energía recolectada, lo que permite garantizar el funcionamiento del sistema y monitorizar el consumo como la energía captada mediante el INA226.

Aunque la recolección de energía se ha planteado con un circuito de interfaz simple, basado en un puente rectificador Schottky y un condensador de filtrado (descritos en el Capítulo 4.2), es necesario un sistema que eleve y regule esta energía para la carga de la batería.

Como posible componente para la gestión de carga, se propone el BQ25570 (Figura 65), un gestor de carga optimizado para fuentes de baja potencia como PEH, capaz de operar con potencias en el rango de μ W a mW. Este dispositivo integra un convertidor DC-DC boost de alta eficiencia y lógica de carga para baterías Li-Ion/Li-Po, siendo ampliamente utilizado en aplicaciones de redes de sensores inalámbricos (WSN). [12]

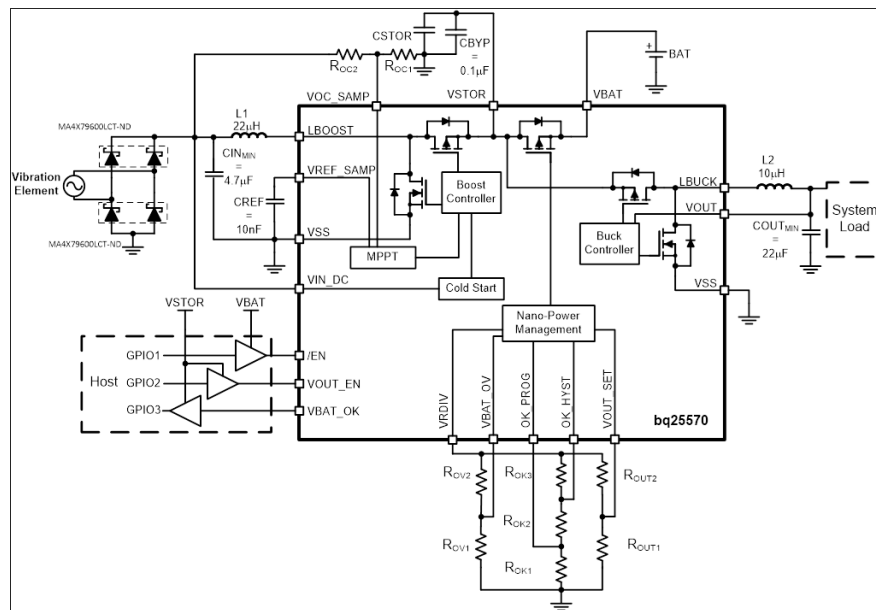


Figura 65 Esquema eléctrico típico del BQ25570 para un PEH. [12]

Capítulo 5.7. RECOLECTOR PIEZOELÉCTRICO.

Por último, como posible generador piezoeléctrico se han evaluado diferentes dispositivos de la gama Volture de la marca Piezo.com (antiguamente Midé Technology) entre los que se encuentran diferentes modelos de dimensiones y prestaciones como los de la Figura 66.

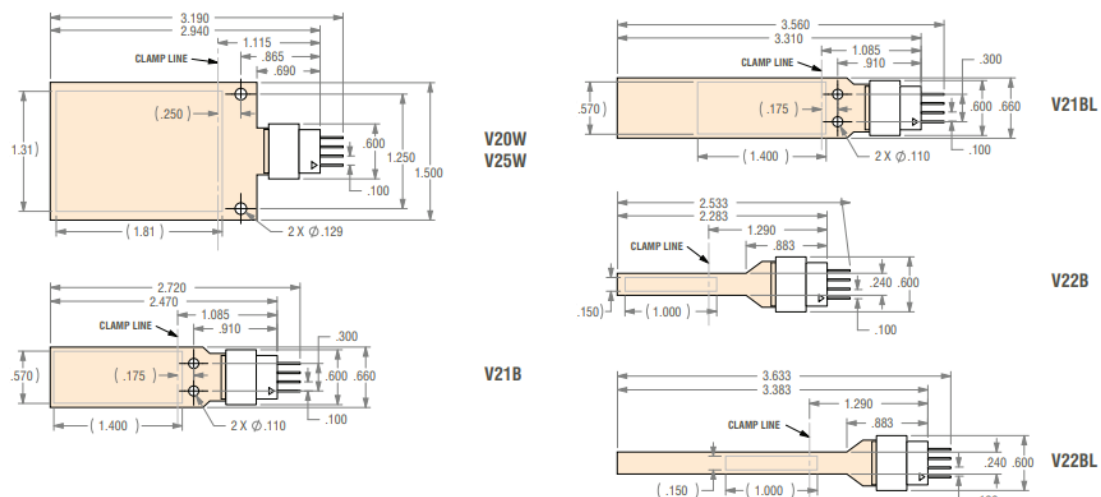


Figura 66 Modelos de recolectores piezoeléctricos de Volture (Piezo o antigua Midé). [13]

Estos modelos permiten la conexión en serie y en paralelo gracias a que están compuestos por dos obleas piezoeléctricas aisladas, en función de la conexión de sus cuatro terminales, tal y como muestra la Figura 67. La conexión en paralelo resulta especialmente adecuada para aplicaciones de recolección de energía ya que permiten proporcionar mayor corriente de salida.

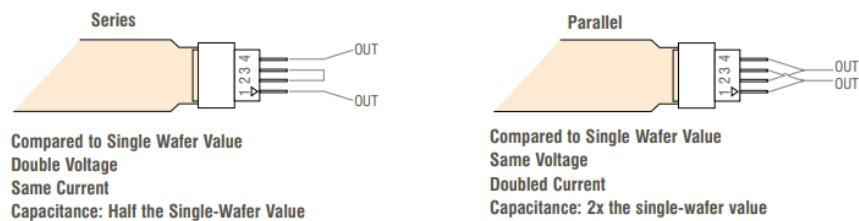


Figura 67 Conexión en serie o paralelo de los modelos de Vulture. [13]

Estos dispositivos presentan una estructura tipo cantilever que permiten obtener energía a partir de vibraciones mecánicas. La frecuencia de resonancia de los recolectores puede ser modificada acoplando pequeñas masas para que coincida con la frecuencia de la fuente de energía, permitiendo recolectar la máxima energía posible.

El modelo en concreto propuesto es el V22B, pues con una masa de 2g se consigue una frecuencia de resonancia de 80Hz, con una potencia máxima de 0.59mW a un voltaje de aproximadamente 8V, tal y como muestra la Figura 68. Estas frecuencias podrían ser fáciles de encontrar en entornos agrícolas, ya sean producidas por la maquinaria, por el sistema del riego, por el viento o por vibraciones transmitidas a través de la estructura. Además su tamaño compacto y baja capacidad permiten generar altas tensiones con una baja deformación del piezoeléctrico (menos de 1mm) en un encapsulado diseñado para resistir ambientes agresivos y condiciones de alta humedad como las que se presentan en aplicaciones agrícolas.

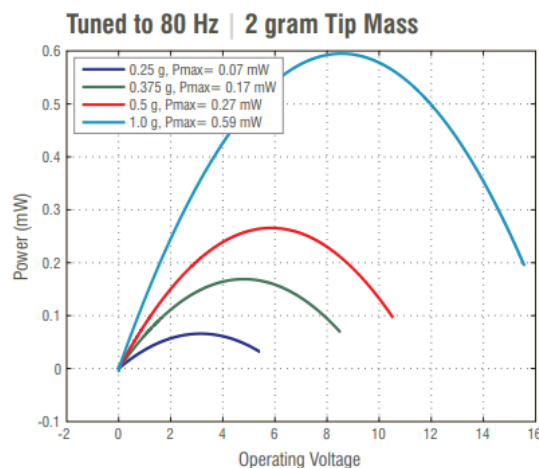


Figura 68 Rendimiento típico del modelo V22B a 80Hz. [13]

Además del modelo plantado, en el mercado se encuentran otros recolectores piezoeléctricos de tecnología más avanzada, tanto en prestaciones como en integración mecánica y eléctrica. Dentro del propio catálogo de Piezo.com, destacan dispositivos más recientes como el modelo S128-J1FR-1808YB, diseñado para aplicaciones industriales y con una mayor densidad de potencia. No obstante, para ilustrar esta posible aplicación se ha tomado como referencia el modelo V22B, dada su extensa documentación técnica, facilidad de integración en prototipos de investigación, y adecuación a las condiciones típicas de entornos agrícolas.



Capítulo 6. DISEÑO FINAL DEL SISTEMA, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

Este Trabajo de Fin de Máster ha abordado el estudio y diseño de un sistema autónomo basado en recolección de energía piezoeléctrica para su aplicación en sensores IoT de bajo consumo, orientado a monitorización de parámetros clave en entornos agrícolas mediante un nodo sensor.

A lo largo del proyecto se ha realizado un análisis detallado del principio piezoeléctrico, los modelos de funcionamiento de los recolectores de energía y las distintas configuraciones estructurales y materiales aplicables en este tipo de sistemas. Asimismo, se han estudiado y propuesto varios circuitos de interfaz que permitirían desacoplar la carga del generador de energía y obtener rendimientos superiores en función de la frecuencia de excitación. Además, se ha planteado una posible arquitectura de bajo consumo que permita su integración en un sistema energéticamente autónomo.

Como resultado del análisis funcional de los componentes desarrollados en los capítulos anteriores, se ha realizado la integración de un sistema completo capaz de recolectar energía, alimentar sensores y transmitir datos mediante el microcontrolador ESP32-S3. El esquema eléctrico mostrado en la Figura 69 recoge la arquitectura general del sistema propuesto. Este diseño representa una propuesta funcional para futuros desarrollos experimentales, en los que se podrá validar su rendimiento en condiciones reales de entorno agrícola.

Como resultado de este trabajo, se ha definido un diseño preliminar que combina un recolector piezoeléctrico optimizado con sensores para la monitorización de variables ambientales clave, junto con un microcontrolador de bajo consumo y un sistema de gestión de energía.

Entre las principales conclusiones se destacan:

- Se ha demostrado la viabilidad de emplear la recolección de energía piezoeléctrica en entornos agrícolas, aprovechando vibraciones ambientales propias de invernaderos o sistemas de riego.
- Se ha visto la importancia del ajuste de la frecuencia de resonancia del PEH a las características del entorno para maximizar la eficiencia energética.
- Se evidencia la necesidad de emplear circuitos de interfaz avanzados para mejorar la transferencia de energía en condiciones de baja frecuencia y amplitud limitada, permitiendo desacoplar la carga del generador.
- Se destaca la relevancia de una cuidadosa selección de sensores y arquitecturas IoT que minimicen el consumo energético, permitiendo su operación en escenarios de energía limitada.

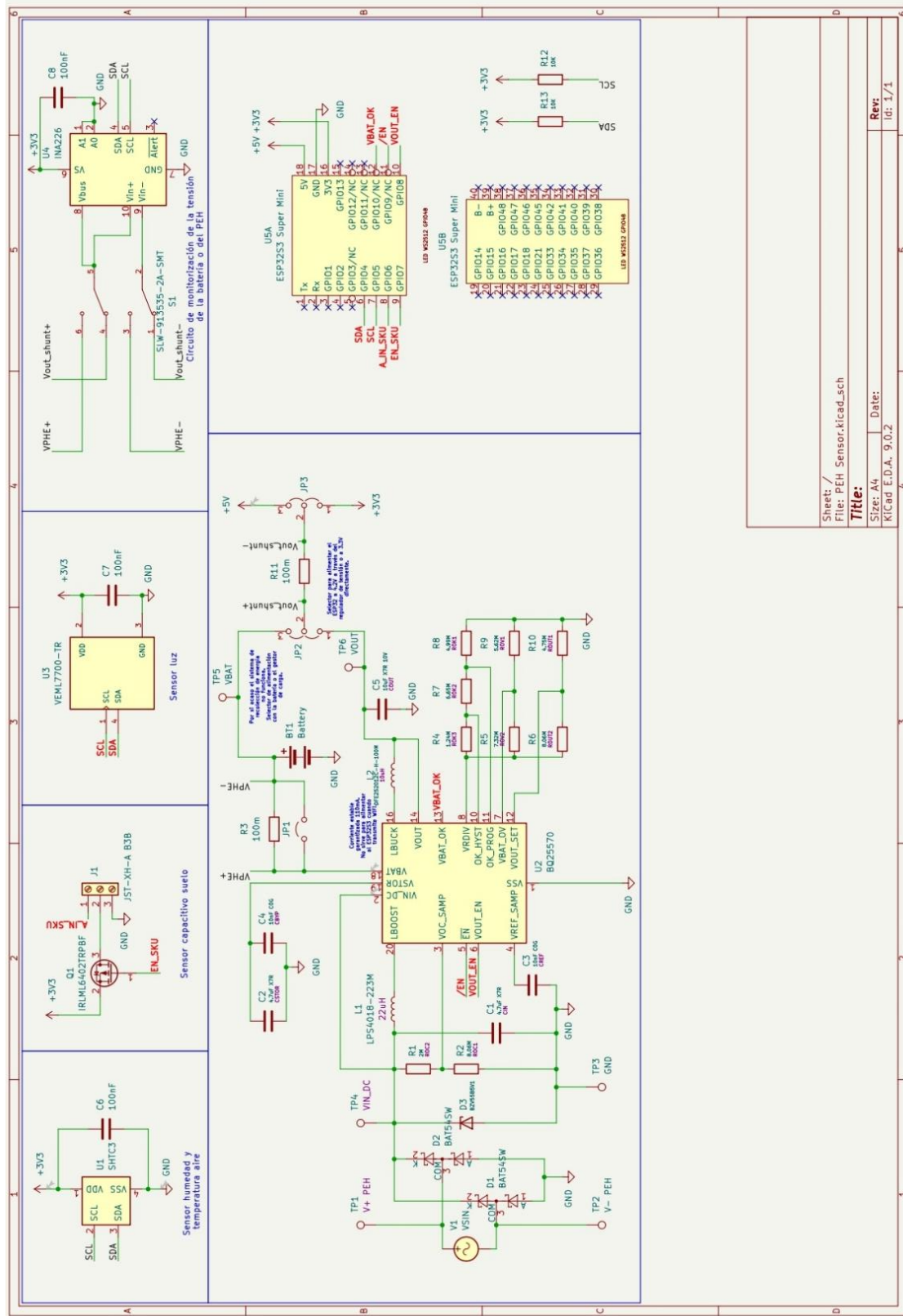


Figura 69 Esquema eléctrico propuesto.



Como líneas futuras de trabajo se plantea la implementación práctica del sistema diseñado, la fabricación de un prototipo y su validación experimental en condiciones reales, con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema y optimizar su diseño. Asimismo, se contempla la posibilidad de explorar configuraciones alternativas de recolectores y circuitos de acoplamiento, así como su integración en redes de sensores distribuidas para aplicaciones avanzadas de agricultura inteligente.



Máster en Semiconductores y Tecnologías Electrónicas
Sergio Carrasco Hernández





Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Qiongfeng Shi, Huicong Liu, Energy Harvesters and Self-Powered Sensors for Smart Electronics, MDPI, 2024.
- [2] Z. Y. C. L. Bin Yang, Flexible Piezoelectric Energy Harvesters and Sensors, Wiley-VCH GmbH, 2022.
- [3] Y. Yun, W. Sheng y Z. Zhang, Advanced Sensing and Robotics Technologies in Smart Agriculture, Springer, 2024.
- [4] Thorsten Hehn, Yiannos Manoli, CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters, Springer, 2014.
- [5] Shanky Saxena, Ritu Sharma, B. D. Pant, Design and Development of MEMS based Guided Beam Type Piezoelectric Energy Harvester, Springer, 2021.
- [6] D. J. I. Alper Erturk, Piezoelectric Energy Harvesting, Wiley, 2011.
- [7] SENSIRION, «SHT3,» [En línea]. Available: <https://sensirion.com/products/catalog/SHTC3>. [Último acceso: 28 Mayo 2025].
- [8] DFROBOT, «Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0193,» [En línea]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193#. [Último acceso: 28 mayo 2025].
- [9] «The Cave Pearl Project. Hacking a Capacitive Soil Moisture Sensor.,» [En línea]. Available: <https://thecavepearlproject.org/2020/10/27/hacking-a-capacitive-soil-moisture-sensor-for-frequency-output/>. [Último acceso: 29 Mayo 2025].
- [10] VISHAY, «VISHAY,» 24 noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.vishay.com/docs/84286/veml7700.pdf>. [Último acceso: 29 mayo 2025].
- [11] Texas Instrumets, «INA226,» juni 2011. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina226.pdf?ts=1748311878326&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FINA226%253FkeyMatch%253DINA226%2526tisearch%253Duniversal_search%2526usecase%253DGPN-ALT. [Último acceso: 29 mayo 2025].
- [12] Texas Instrumet, «bq25570 nano power boost charger and buck converter,» marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf?ts=1748527971456&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FBQ25570#page=22&zoom=100,0,264. [Último acceso: 30 mayo 2025].



- [13] Midé, «PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTERS,» 23 01 2013. [En línea]. Available:
<https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/416/Volture.pdf>.
[Último acceso: 05 junio 2025].

- [14] S. Saker, «Presentatio topic Study of Various Soil Moisture Sensors,» ResearchGate,
abril 2021. [En línea]. Available:
https://www.researchgate.net/publication/350950246_Presentation_topic_Study_of_Various_Soil_Moisture_Sensors. [Último acceso: 28 mayo 2025].