

Dispositivos de obtención de energía a partir de vibraciones ambientales

Trabajo Fin de Grado - Física

Por: Marina López Seoane



Universidad de Oviedo

Facultad de Ciencias

Julio 2020

Oviedo

Tutor: Carlos Quirós Fernández

Resumen

La recolección de energía, conocida en inglés como *energy harvesting*, engloba el conjunto de procesos en los que energía útil se captura del medio ambiente y se transforma en electricidad, principalmente. El objetivo general de este trabajo es discutir los métodos de recolección de energía más usuales, centrándonos en los dispositivos que aprovechan vibraciones ambientales. Estudiaremos con mayor detalle las técnicas de recolección electromagnética, que son especialmente importantes para suministrar energía a sistemas electromecánicos autoalimentados. Indicaremos los principales problemas que surgen a la hora de diseñar estos dispositivos, las técnicas utilizadas para solventarlos, y ejemplos prácticos de los mismos. Por último, introduciremos un diseño sencillo de recolector de energía electromagnético, basado en vibraciones contenidas en un plano, y analizaremos efectos de escala en el rendimiento del dispositivo.

Palabras clave *Energy harvesting*, Recolección de energía, Vibraciones ambientales, conversión de energía, electromagnético, MEMS.

Índice general

1. Modelos principales de recolección de energía	1
1.1. Introducción	1
1.2. Materiales termoeléctricos	2
1.2.1. Introducción y descripción general	2
1.2.2. La figura de mérito ZT	3
1.2.3. Aplicaciones	5
1.3. Fotovoltaicos	7
1.3.1. Introducción y descripción general	7
1.3.2. Fundamento teórico.	7
1.3.3. Diseño básico de una célula fotovoltaica	10
1.3.4. Células solares con perovskita	10
1.3.5. Generador de energía solar termoeléctrica	12
1.3.6. Aplicaciones	12
1.4. Recolectores de energía a partir de vibraciones	13
1.4.1. Recolectores de energía mecánica	13
1.4.2. MEMS	14
1.4.3. Aplicaciones	14
2. Recolección de energía a partir de vibraciones ambientales	16
2.1. Descripción general	16
2.2. Modelo genérico	17
2.3. Piezoeléctrico	19
2.3.1. Modelo teórico	19
2.3.2. Diseños y dispositivos	22
2.4. Electromagnético	24
2.4.1. Diseño y dispositivos	26
2.5. Electrostático	28
2.5.1. Diseño y dispositivos	30
2.6. Triboeléctrico	32
2.6.1. Diseño y dispositivos	33
3. Integración de dispositivos electromagnéticos de recolección de energía vibracional en sistemas MEMS	36
3.1. Introducción	36
3.2. Criterios de optimización	37
3.2.1. Reducción de la frecuencia de resonancia.	37
3.2.2. Aumento de la banda de frecuencias de vibración.	43

3.2.3. Compatibilidad con sistemas <i>MEMS</i>	48
4. Análisis cuantitativo de un recolector de energía de vibraciones plano	53
4.1. Introducción	53
4.2. Principio operativo	53
4.3. Modelo teórico	55
4.4. Resultados	59
4.4.1. Dispositivo básico	59
4.4.2. Efectos de reducción de escala	61
4.5. Conclusiones	68
5. Conclusiones	69
Referencias	70

Capítulo 1

Modelos principales de recolección de energía

1.1. Introducción

El estudio de la recolección de energía es un tema cuya importancia aumenta día a día. Los procesos de recolección de energía son los encargados de capturar energía desde fuentes medioambientales y convertirla en electricidad, o en una forma de energía utilizable. La necesidad de nuevas fuentes de energía sostenibles potencia el descubrimiento y estudio de nuevos materiales y el diseño de dispositivos recolectores de energía.

La recolección de energía es un campo muy amplio: abarca desde energía solar y termoeléctrica, que son conocidas, hasta otras menos populares como la recolección mecánica o electromagnética. A lo largo del trabajo nos vamos a centrar en aquellos dispositivos de menor escala, para que puedan ser integrados en sistemas microelectromecánicos sin alterar sus dimensiones.

En este capítulo introduciremos los principales tipos de recolección de energía. Nos centraremos en sus principales características físicas y sus posibles aplicaciones, ignorando su coste de producción y la manera de almacenar la energía producida.

1.2. Materiales termoelectricos

1.2.1. Introducción y descripción general

Hoy en día, la mayor parte de la energía producida en la sociedad se pierde en forma de energía térmica o calor. Esto ocurre principalmente en la generación de energía eléctrica y durante su transporte. Por ejemplo, de la energía eléctrica que se consume en un domicilio habitual, un 60 % se pierde como residuo calorífico durante su producción y entre un 8 y 15 % se pierde en el cableado eléctrico durante su transporte[1]. De forma similar, el 40 % de la energía producida en un coche se malgasta en residuos térmicos y un 30 % se utiliza para enfriar el motor, perdiendo así un 70 % de la energía producida. Así, los materiales y dispositivos termoelectricos pueden ser parte de la solución para conseguir un planeta más sostenible.

Otra de las razones para estudiar dispositivos con materiales termoelectricos es que presentan la ventaja de no tener partes móviles, lo que los hace más silenciosos y facilita su mantenimiento a largo plazo. Además, son sencillos de reescalar a menores tamaños, lo que permite integrarlos en otros dispositivos, como relojes, transmisores, etc.

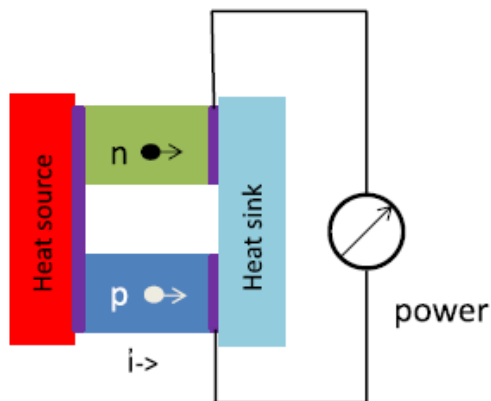


Figura 1.2.1: Modelo simple de un dispositivo termoelectrico[2]

El efecto termoelectrico convierte energía térmica en energía eléctrica, a través del *efecto Seebeck*, o viceversa, por el *efecto Peltier*. El modelo más habitual en este tipo de dispositivos es el descrito en la figura 1.2.1. Dos semiconductores, uno de tipo *p* y otro tipo *n* están conectados a una fuente y a un pozo de calor simultáneamente. Otra representación del modelo utilizado se puede observar en la figura 1.2.2

En un material termoelectrico hay electrones o huecos libres que pueden transportar carga y calor. El potencial eléctrico producido por una diferencia de temperatura se llama el efecto Seebeck. Si el semiconductor estudiado es de tipo *p*, cargas positivas (huecos) se acumularán en el extremo frío del conductor,

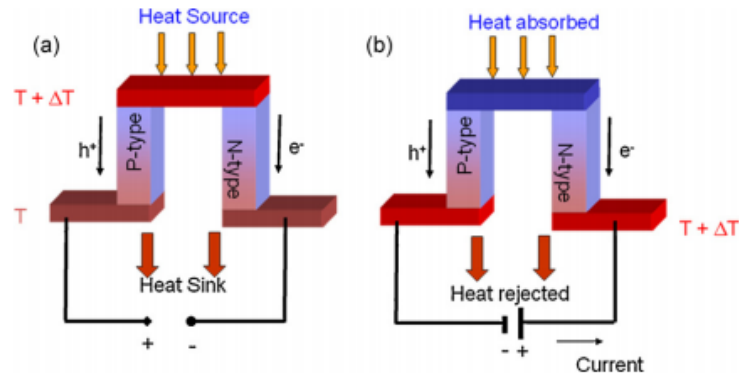


Figura 1.2.2: Otra representación del modelo de un dispositivo termoeléctrico.[3]

creando un potencial eléctrico positivo. Análogamente, en un semiconductor de tipo n , se acumulan cargas libres negativas (electrones) en el extremo frío. Así, aplicando una diferencia de calor sobre los semiconductores aparece un potencial eléctrico entre ellos, que podemos aprovechar como fuente de energía eléctrica. El efecto inverso, que genera una diferencia de temperaturas a partir de un potencial eléctrico, se conoce como efecto Peltier.

1.2.2. La figura de mérito ZT

La caracterización más usual de los materiales termoeléctricos es su figura de mérito ZT [4], que fue propuesta por Altenkirch en 1909. Este producto, que es adimensional, se define como sigue:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T$$

donde T es la temperatura, S es el coeficiente de Seebeck del material, σ su conductividad eléctrica y κ su conductividad térmica. Esta última se puede dividir en dos sumandos: $\kappa = \kappa_e + \kappa_L$, siendo κ_e la conductividad térmica relativa a los electrones del material y κ_L relativa a la red (fonones).

El producto ZT se utiliza habitualmente para caracterizar los diferentes materiales termoeléctricos. A mayor ZT , más eficiente resulta el material utilizado, por lo que el objetivo principal del diseño y estudio de estos materiales es maximizar dicha figura de mérito. En materiales empleados habitualmente (Bi_2Te_3 , $PbTe$, $SiGe$,...), $ZT \leq 1$ a temperatura ambiente [5], lo que equivale a una eficiencia en torno al 10%. Hoy en día se pueden obtener valores de ZT mayores que la unidad, e incluso cercanos a 2 [6].

La relación entre la figura de mérito y la eficiencia del dispositivo es [1]:

$$\eta(\%) = 100 * \left(\frac{T_H - T_C}{T_H} * \frac{\sqrt{1 + Z\langle T \rangle} - 1}{\sqrt{1 + Z\langle T \rangle} + T_H/T_C} \right)$$

donde η es la eficiencia y T_H y T_C son las temperaturas de la fuente y del pozo de calor, respectivamente. En la figura 1.2.3 se puede observar el valor de esta figura de mérito para varios materiales estudiados.

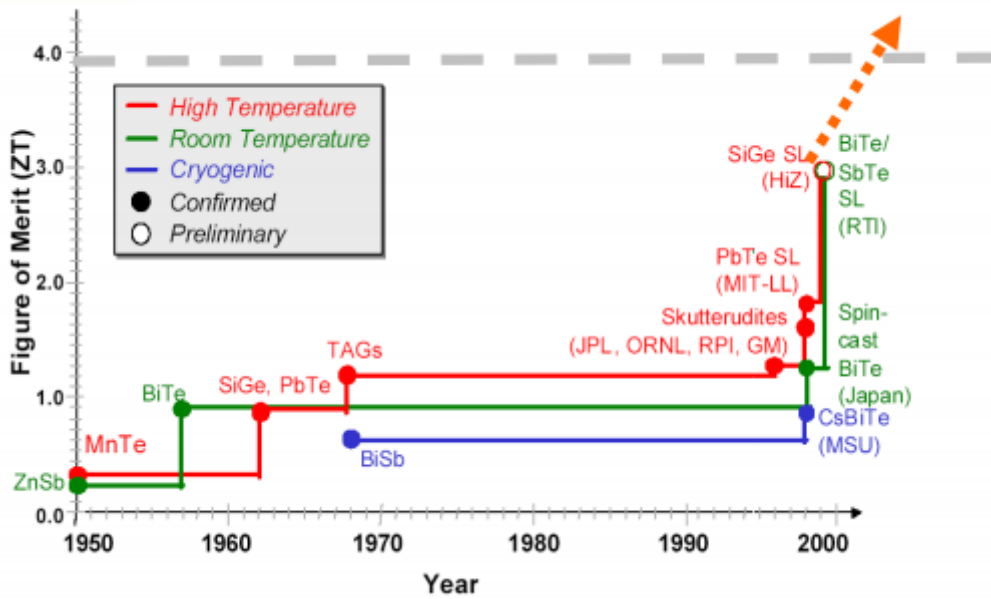


Figura 1.2.3: Figura de mérito para distintos materiales [7]

Para mejorar la eficiencia del dispositivo, por tanto, debemos maximizar el valor de la figura de mérito ZT [8]. Esto se puede conseguir aumentando el valor de la conductividad eléctrica, reduciendo la conductividad térmica o incrementando el coeficiente de Seebeck $S = \frac{\Delta V}{\Delta T}$. No obstante, existe un obstáculo que nos complica la optimización de la figura de mérito: el hecho de que los coeficientes S , k y σ están relacionados entre sí (a través de la concentración de portadores), y resulta imposible modificar alguno de ellos sin afectar al resto. Para tratar de solventar este problema, las técnicas más utilizadas durante el estudio de materiales con alto ZT son la búsqueda de nuevos materiales con estructura de bandas compleja, con el objetivo de aumentar S sin afectar a σ o κ ; y el trabajo con nanoestructuras, que de forma general tienen un valor alto de S y una conductividad térmica baja[1].

Debe notarse que a la hora de intentar minimizar la conductividad térmica del material, κ , nos referimos a minimizar el factor equivalente a la conductividad de la red κ_L . La contribución

electrónica a la conductividad térmica, κ_e se considera proporcional a la conductividad eléctrica σ , y por tanto su variación no es útil a la hora de maximizar el factor de mérito ZT [3].

En la siguiente figura (1.2.4) podemos apreciar los materiales que se utilizan más habitualmente para el diseño y producción de estos dispositivos, así como la abundancia de los elementos que los componen.

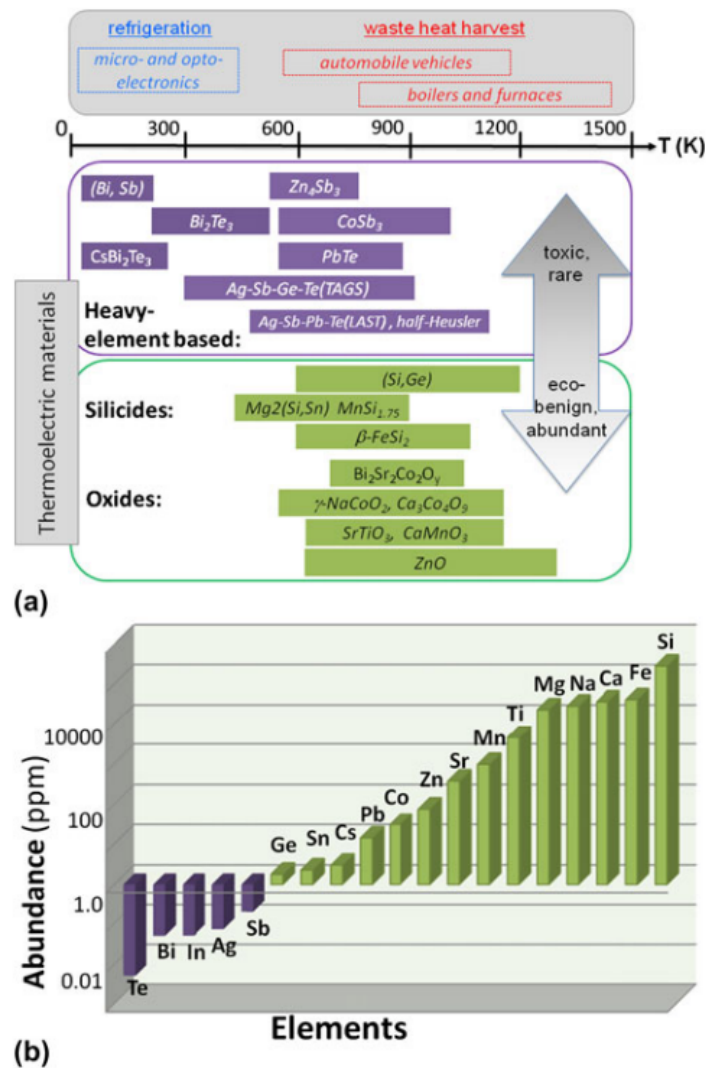


Figura 1.2.4: Materiales utilizados para la producción de dispositivos termoeléctricos [9].

1.2.3. Aplicaciones

Actualmente, el diseño de dispositivos termoeléctricos no es el medio de recolección de energía más habitual en la industria, pero existen ejemplos de su utilización a distintas escalas.

La aplicación más común de este tipo de dispositivos es la reutilización de energía en vehículos con motores de combustible fósil [10]. Se sitúan los dispositivos en distintos puntos del vehículo (principalmente radiador y tubo de escape) para aprovechar la energía térmica residual [11, 12]. Si se consigue reciclar adecuadamente esta energía, el consumo de combustible fósil del vehículo disminuye, ya que se elimina la necesidad de mantener la batería, luces, etc. a partir de la energía generada por la combustión del motor. Se estima que si la industria de este tipo de materiales sigue evolucionando, en un futuro cercano se reducirá hasta en un 10 % el consumo de combustibles fósiles en vehículos que utilicen generadores de energía termoelectrica.

Si aprovechamos el efecto Peltier, los dispositivos termoelectricos pueden utilizarse a modo de refrigeradores en un amplio espectro de casos: para enfriar dispositivos electronicos [13], en neveras [14, 15], y aire acondicionado [16, 17, 18], entre otros. Tienen la cualidad de ser simples, seguros, y en general fáciles de integrar y transportar [19]. No obstante, su diseño y producción todavía tienen un coste bastante elevado.

Incluso los dispositivos con baja producción de voltaje son utilizados en el mercado actual. Empresas como Seiko los introducen en sus relojes para evitar el uso de pilas [20]. Sin embargo, este tipo de diseños tienen una eficiencia bastante baja, usualmente menor que 0.5 % [19].

Una aplicación interesante de los dispositivos termoelectricos es su integración en sistemas espaciales. Es especialmente importante encontrar una fuente de energía independiente del Sol, continua, y duradera (al menos 7-10 años) para poder suministrar energía a vehículos de exploración extraterrestre. Se han realizado estudios de materiales con una figura de mérito entre 0.92 y 1.48 [21] que se han considerado como posibles fuentes de energía auxiliares para misiones de exploración planetaria de la NASA [22]. La utilización de recolectores de energía termoelectrica en aeronaves comerciales también ha sido estudiada por empresas como Boeing [23], lo que permitiría una reducción en el consumo de combustible fósil en los viajes aéreos. Esto tendría el potencial de reducir las emisiones globales de dióxido de carbono en hasta un 0.03 % [24].

En esta sección hemos introducido los dispositivos de recolección termoelectrica y sus posibles aplicaciones. A medida que avanza el estudio en materiales con mayor figura de mérito ZT , estos recolectores ganan una mayor importancia en el ámbito de la recuperación de energía. Estos dispositivos se pueden integrar con otros modelos de recolección de energía, como se verá en las secciones siguientes.

1.3. Fotovoltaicos

1.3.1. Introducción y descripción general

La energía solar es la fuente de energía sostenible más abundante a la que tiene acceso el ser humano. La energía anual que recibe nuestro planeta desde el Sol es de aproximadamente 120 000 TW . El consumo de energía humano es de aproximadamente 15 TW , por lo que la necesidad de energía de nuestro planeta podría cubrirse utilizando tan solo fuentes de energía solares [25]. A pesar de su abundancia, la energía útil producida a partir de radiaciones solares constituye menos de un 1 % de la energía consumida [26].

Se presentan una serie de problemas a la hora de recoger esta energía y convertirla en energía útil y disponible para consumo humano. Por ejemplo, la cantidad de radiación solar que se percibe en un punto del planeta depende fuertemente de su posición geográfica. En cualquier caso, pese a que la eficiencia de los paneles fotovoltaicos no es elevada [24], con una discontinuidad de producción debida a los ciclos día/noche, en los últimos años se ha producido un descenso notable de los costes de fabricación de paneles que convierten a este tipo de energía en un elemento clave en la reducción de emisiones de efecto invernadero.

Llamamos *fotovoltaico* a un material o dispositivo capaz de convertir la energía contenida en fotones de luz a voltaje o corriente eléctrica. Un fotón con longitud de onda suficientemente corta y suficiente energía puede causar que uno de los electrones en el material fotovoltaico se separe del átomo que lo contenía, y a través de un campo eléctrico podemos movilizar esos electrones para crear una corriente.

La primera aparición de materiales fotovoltaicos en la historia fue en 1839, cuando Edmund Becquerel fue capaz de crear un potencial eléctrico en un electrodo metálico al iluminarlo. Las primeras células fotovoltaicas, de Selenio, se construyeron en 1976, con una eficiencia de entre 1 y 2 %. Hoy en día los materiales fotovoltaicos pueden conseguir eficiencias significativamente mayores, como podemos observar en la figura 1.3.1 [27].

1.3.2. Fundamento teórico.

Los materiales utilizados para los dispositivos fotovoltaicos son semiconductores. El material más utilizado históricamente es Si cristalino, pero también son habituales el germanio, boro o fósforo. Existen células que utilizan una combinación de elementos, como el arsénico y

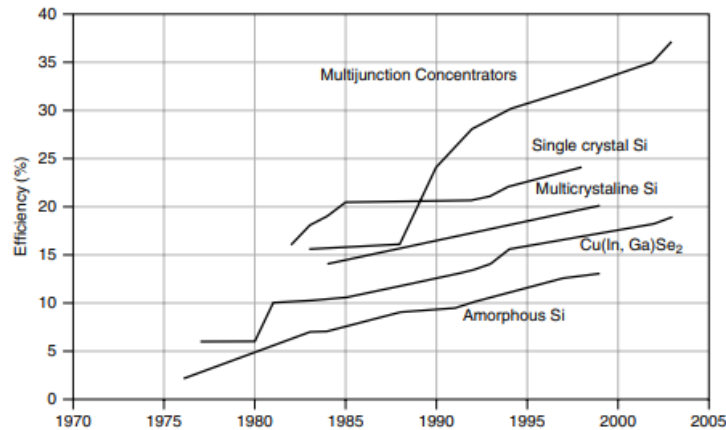


Figura 1.3.1: Eficiencia de la conversión de energía solar para distintos materiales [27].

galio, o el cadmio y telurio.

Los materiales semiconductores poseen una banda llamada *banda de conducción*, que está vacía cuando la temperatura es 0 K . Se llama así porque los electrones que se encuentran en ella son los que contribuyen a la corriente eléctrica. Se llama *Gap* a la diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda llena más cercana, conocida como banda de valencia. La energía del gap es la energía necesaria para que un electrón salte desde la banda de valencia a la banda de conducción. Si a un electrón se le proporciona dicha energía se libera de la fuerza electrostática que lo une a su núcleo para colocarse en la banda de conducción.

La energía proporcionada al electrón para saltar entre bandas puede estar dada por un fotón a través del efecto fotoeléctrico. Dado un fotón con longitud de onda λ , su energía es:

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde h es la constante de Planck y c la velocidad de la luz en el vacío.

En la siguiente tabla presentamos las energías del Gap para distintos materiales fotovoltaicos, con las correspondientes longitudes de onda de los fotones necesarias para excitar sus electrones:

	Si	GaAs	CdTe	InP
Energía Gap (eV)	1.12	1.42	1.5	1.35
Longitud de onda (μm)	1.11	0.87	0.83	0.92

Si estudiamos, por ejemplo, una célula fotovoltaica de silicio, aquellos fotones con una longitud de onda mayor a $1.11\ \mu m$ no poseen la energía suficiente para excitar al electrón, y

su energía sólo sirve para calentar la célula. Cada fotón sólo puede excitar un electrón, por lo que aquellos fotones con longitud de onda menor a $1.11 \mu\text{m}$ tendrán energía suficiente para excitar un electrón, pero se perderá la energía restante. Se representa la pérdida de energía en la figura 1.3.2.

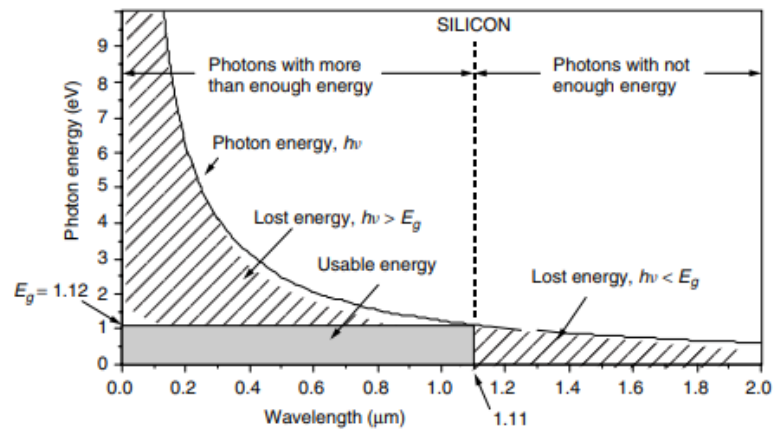


Figura 1.3.2: Energía perdida para las distintas longitudes de onda de los fotones en células de silicio [27].

Por tanto, el espectro de radiación solar afecta a la posible eficiencia de las células fotovoltaicas. En la figura 1.3.3 se representa la energía útil en una situación en la que suponemos que el Sol se encuentra a 42° sobre el horizonte, posición que se considera estándar en los estudios sobre estos dispositivos.

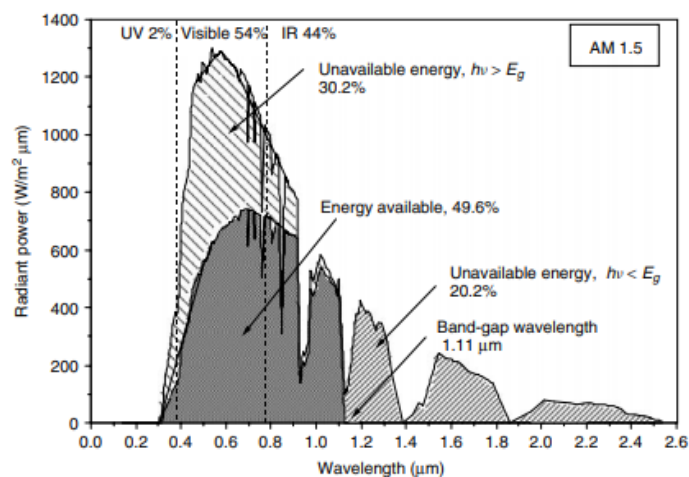


Figura 1.3.3: Espectro de longitudes de onda de radiación solar y energías útiles en células de silicio [27].

Hemos visto entonces que la eficiencia de la célula depende de la energía del gap del material utilizado. En materiales con una baja energía del gap tenemos mayor corriente de

electrones con menor voltaje, mientras que en materiales con mayor energía del gap aparece mayor voltaje pero menor corriente eléctrica. Como identificamos la potencia eléctrica P como el producto de la corriente y el voltaje, necesitamos utilizar materiales que se encuentren en un punto intermedio, usualmente entre 1.2 y 1.8 eV.

1.3.3. Diseño básico de una célula fotovoltaica

Para que se cree una corriente, necesitamos que los electrones estén en movimiento, lo que se consigue a partir de un campo eléctrico. En una célula fotovoltaica básica, esto lo conseguimos a partir de un diodo $p-n$.

Supongamos que iluminamos un diodo $p-n$ con luz solar. Al absorber fotones, se forman pares electrón-hueco. Si estos pares están cerca de la unión entre los dos tipos de semiconductor, el campo eléctrico enviará los huecos hacia el lado de tipo p , y los electrones al tipo n , por lo que se crea un potencial eléctrico sobre el diodo.

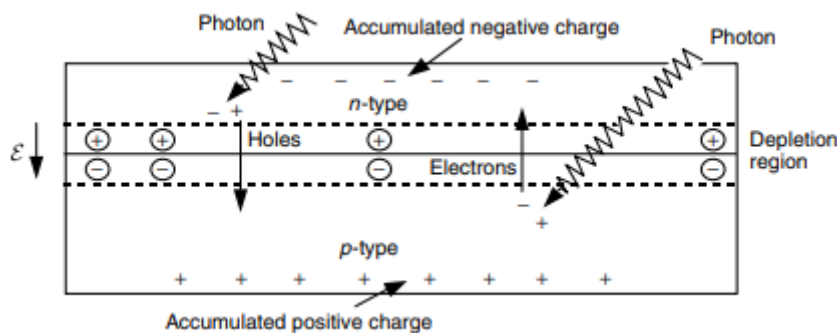


Figura 1.3.4: Luz incidente sobre un diodo $p-n$ [27].

En estos apartados hemos explicado el mecanismo básico tras la construcción más habitual de dispositivos de recolección de energía fotovoltaicos. Los dispositivos de este tipo han dominado el campo de recolección de energía solar durante años, debido a la simplicidad del diseño y a la disponibilidad de materiales. Sin embargo, nuevos diseños para las células fotovoltaicas basados, por ejemplo, en polímeros, pueden presentar una mayor eficiencia y ventajas frente a las células utilizadas hasta el momento.

1.3.4. Células solares con perovskita

En los últimos se han estudiado algunos materiales tipo perovskita que aumentan significativamente la eficiencia de las células solares, además de presentar un coste de

producción muy bajo [28]. Algunos recolectores basados en este tipo de compuestos han conseguido eficiencias de conversión de un 25.2 % [29].

Los materiales tipo perovskita tienen formulación ABX_3 , donde X es un anión y A y B son cationes de tamaños diferentes. Su estructura cristalina se puede ver en la figura 1.3.5. Los compuestos utilizados habitualmente en células fotovoltaicas de perovskita son haluros metal-orgánicos. En dichos compuestos, el catión A representado en 1.3.5 es el ión CH_3NH_3 , el catión pequeño B puede ser Pb o Sn y el anión X suele ser de Cl , Br o I .

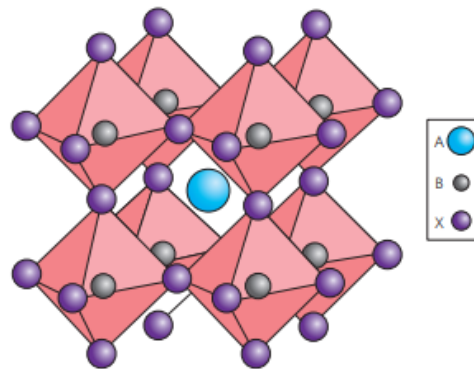


Figura 1.3.5: Estructura cristalina de los materiales tipo perovskita [30].

Hay dos tipos principales de células solares que emplean estos materiales, representadas en la figura 1.3.6: nanoestructura mesoscópica y estructura plana. El segundo caso presenta una eficiencia de conversión menor que el primero. Los resultados experimentales de los estudios realizados sobre los dos tipos de células muestran como la tasa de recombinación de la nanoestructura mesoscópica es mayor, lo que puede ser un factor importante en la eficiencia del dispositivo [31].

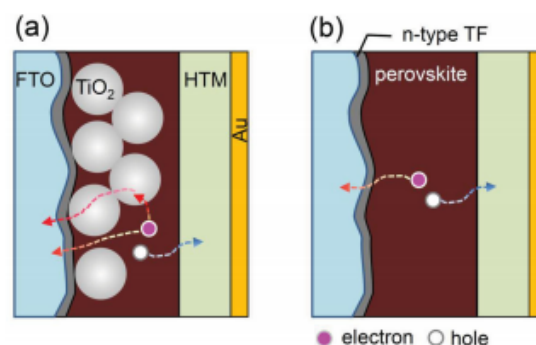


Figura 1.3.6: Célula fotovoltaica con perovskita mesoscópica (a) y célula plana sin la capa mesoscópica de TiO_2 (b) [28].

1.3.5. Generador de energía solar termoeléctrica

Un punto importante a considerar es la combinación de distintas técnicas de recolección de energía para maximizar el rendimiento y eficiencia de los dispositivos. Presentamos un modelo sencillo para la recolección de energía térmica solar a partir de un dispositivo termoeléctrico, pero también se han estudiado dispositivos que recogen la energía térmica solar mediante procesos termiónicos o magneto-hidrodinámicos [32].

Podemos ver el modelo básico para un dispositivo solar-termoeléctrico en la figura 1.3.7. Esta estructura permite la conversión de la radiación con longitudes de onda óptimas a través de la lámina fotovoltaica, y permite la recolección de energía térmica de la radiación que no puede ser aprovechada por la placa fotovoltaica.

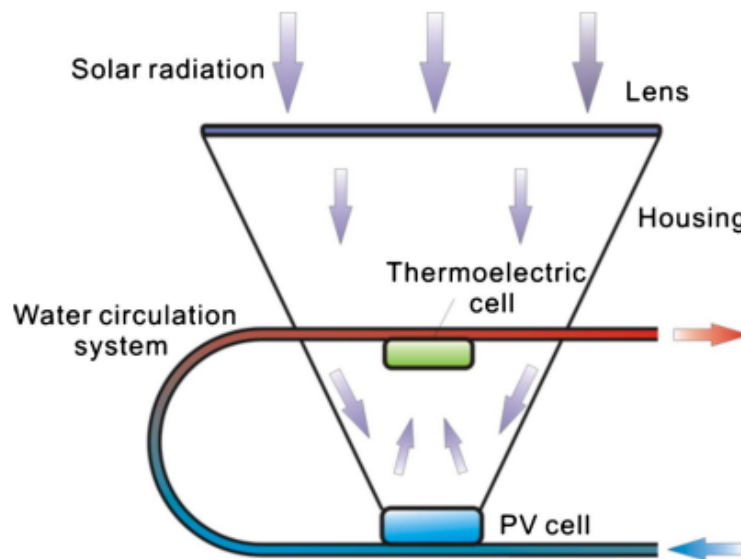


Figura 1.3.7: Estructura recolectora de energía combinada solar-termoeléctrica [32].

1.3.6. Aplicaciones

Las placas fotovoltaicas son uno de los métodos de obtención de energía limpia más utilizados. Podemos encontrar dispositivos de recolección de energía solar en objetos cotidianos. Los más comunes son, por ejemplo, calculadoras o placas de pequeñas dimensiones colocadas en señalizaciones de tráfico o parquímetros. También es común encontrar placas recolectoras de energía fotovoltaica en los tejados de edificios residenciales, para minimizar el consumo de energía eléctrica de los domicilios [33]. Cada día es más habitual, también, encontrar *parques*

fotovoltaicos, encargados de generar electricidad a partir de radiación solar a mayor escala.

Los dispositivos solares termoeléctricos también tienen una gama amplia de aplicaciones. Algunos se han usado para la recolección de radiación solar en el espacio [34]. La combinación de la recolección de energía solar para convertirla en electricidad y energía térmica es muy habitual en domicilios y edificios residenciales [35, 36]. Este tipo de tecnologías son interesantes porque proveen una manera de integrar las energías limpias en nuestras vidas. Los dispositivos solares termoeléctricos introducidos por Maneewan *et al.* en [36, 35] tienen un bajo coste, y teniendo en cuenta la disminución en el consumo de energía eléctrica, su coste se compensa por el ahorro de consumo en menos de 5 años. Otro posible uso para este tipo de dispositivos es su incorporación en refrigeradores, como estudian Khattab y El Shenawy en [37].

1.4. Recolectores de energía a partir de vibraciones

En las últimas décadas, se han realizado numerosos estudios sobre la energía vibracional y los métodos disponibles para su recolección [38]. El movimiento humano, las olas o vibraciones ambientales son fuentes de energía capaces de producir electricidad o suministrar potencia a dispositivos o sensores autoalimentados [39]. Sin embargo, algunos de los diseños de recolectores de energía vibracional no tienen la eficiencia necesaria en la conversión de energía mecánica a electricidad, ya sea debido a la baja frecuencia o la arbitrariedad de las vibraciones ambientales. A lo largo del trabajo introduciremos una serie de diseños para estos dispositivos, y estudiaremos su eficiencia y sus posibles aplicaciones.

1.4.1. Recolectores de energía mecánica

La energía mecánica está asociada con el movimiento y posición de los objetos. En general los dispositivos recolectores de energía mecánica la transforman en otros tipos de energía: eléctrica, magnética o térmica, entre otras.

Una fuente destacada de energía mecánica es la procedente de vibraciones. Hay distintos tipos de dispositivos para la obtención de energía mecánica a partir de vibraciones. Uno de los más habituales emplea materiales piezoeléctricos para generar electricidad. Otros modelos utilizados recolectan energía electrostática, electromagnética o triboeléctrica.

En el siguiente capítulo los estudiaremos más en detalle.

1.4.2. MEMS

Una característica importante de los dispositivos de recolección mecánica es su reducido tamaño, que permite introducirlos en los conocidos sistemas microelectromecánicos (*MEMS*). Estudiar dispositivos de recolección de energía de menor tamaño es importante ya que aumenta el ámbito de casos en los que puede ser aplicado.

Durante el estudio de los *MEMS*, se ha conseguido minimizar su tamaño. Su consumo disminuye a la vez que disminuyen sus dimensiones, pero las fuentes de energía disponibles suelen tener dimensiones mayores a las del sistema a estudiar, determinando el tamaño total del sistema. Aquí es donde el desarrollo y estudio de recolectores vibracionales cobra importancia: se puede reducir su tamaño y así minimizar el tamaño del sistema correspondiente.

En la mayoría de dispositivos se utilizan pilas como fuente de energía. Aparte de su impacto medioambiental y de que no se trata de una fuente de energía renovable, las pilas suponen una fracción significativa del tamaño y masa del sistema. Además, se necesita reemplazarlas o recargarlas cada cierto tiempo, lo que supone un problema en sistemas que utilizan un gran número de dispositivos, como las redes de sensores [40]. Una forma de evitar o complementar el uso de pilas es incorporar dispositivos recolectores de energía a los sistemas electromecánicos.

Se han estudiado una serie de fuentes de energía alternativas, como energía solar, eólica, térmica, acústica y vibracional [41]. De estas fuentes, las vibraciones ambientales presentan una característica importante: se puede encontrar energía vibracional prácticamente en todas partes, incluso en lugares remotos o de difícil acceso.

La maximización de la eficiencia de la conversión de energía en estos dispositivos se consigue de diferentes formas: reduciendo la frecuencia de resonancia, aumentando la banda de frecuencias de vibración de los dispositivos y mejorando su compatibilidad con los sistemas *MEMS*. Estudiaremos estos problemas y se introducirán una serie de ejemplos de estos dispositivos en el tercer capítulo de este trabajo.

1.4.3. Aplicaciones

Aparte de su integración en sistemas microelectromecánicos, existen diversas aplicaciones para los recolectores de energía a partir de vibraciones ambientales.

Una aplicación interesante de los mismos es su integración en prendas de ropa o accesorios,

para aprovechar la energía cinética creada por el movimiento del cuerpo humano [42]. Estos dispositivos se pueden integrar de distintas formas: desde mochilas recolectoras de energía[42, 43], a dispositivos que se colocan en prendas de ropa o zapatos para aprovechar el movimiento del cuerpo humano al caminar[44, 45]. Se pueden utilizar dispositivos de recolección electromagnética para aprovechar el movimiento de la cabeza, o como fuente de energía para, por ejemplo, implantes cocleares [46]. Dispositivos piezoeléctricos pueden aprovechar el movimiento humano en pulseras o rodilleras [47], pero también se ha estudiado su posible uso dentro del cuerpo humano, aprovechando los movimientos del corazón o el diafragma [48].

Otra de las utilidades más importantes para los dispositivos recolectores de energía mecánica es la generación de energía en vehículos. Se puede aprovechar tanto el movimiento del propio vehículo colocando el dispositivo en distintas partes de un coche [49]; o se pueden aprovechar las vibraciones producidas, por ejemplo, en las vías de un tren [50].

Hemos hecho un repaso general de algunos de los principales métodos de recolección de energía ambiental. Los dispositivos basados en el efecto termoeléctrico tienen una amplia variedad de aplicaciones, especialmente combinados con recolección fotovoltaica para aprovechar la radiación solar. El estudio de los dispositivos fotovoltaicos es cada vez más extenso. Nuevos diseños introducen nanomateriales y cambios en la recolección de la energía lumínica aumentando la eficiencia de la conversión. Los dispositivos de recolección de energía vibracionales, punto central de nuestro trabajo, utilizan una serie de técnicas de recolección, como los materiales piezoeléctricos o dispositivos electromagnéticos. En el siguiente capítulo los estudiamos con mayor detalle.

Capítulo 2

Recolección de energía a partir de vibraciones ambientales

Este capítulo se centrará en el estudio de los materiales y dispositivos utilizados para la recolección de energía a partir de vibraciones ambientales. Veremos un modelo general para el recolector vibracional y después dividiremos el capítulo en los 4 tipos principales de generadores: piezoeléctricos, electromagnéticos, electrostáticos y triboeléctricos.

2.1. Descripción general

Las tecnologías de recolección de energía vibracional han ganado importancia durante los últimos años. Fuentes de energía como el movimiento humano o las olas del mar podrían ser utilizadas para suministrar electricidad o cargar aparatos inalámbricos. Además, como ya hemos comentado, los recolectores de energía vibracional podrían sustituir a las pilas como fuente de energía para una serie de dispositivos, como pueden ser las redes de sensores.

El diseño de los dispositivos utilizados juega un rol importante en la eficiencia de la recolección de energía mecánica. Las estructuras diseñadas pueden aumentar la eficiencia de la conversión de energía, así como su compatibilidad con los sistemas microelectromecánicos. A pesar de existir cuatro modelos básicos de recolección, veremos que se han presentado una gran variedad de prototipos con diversas características, que influyen en la capacidad de recolección y conversión de la energía vibracional.

Una de los principales problemas que se presentan a la hora de diseñar generadores

electromecánicos es la baja eficiencia de la conversión. Usualmente se debe a que la frecuencia de resonancia del generador no coincide con la de las vibraciones ambientales, o a que la banda de frecuencias con la que funciona el generador es muy estrecha, y no puede cubrir las vibraciones con frecuencias arbitrarias de fuentes externas. En este capítulo presentamos una serie de ejemplos de dispositivos que intentan solventar dichos problemas, y los estudiaremos con mayor detalle en el capítulo 3.

2.2. Modelo genérico

En general, un dispositivo de recolección de energía vibracional puede ser modelado como un sistema masa-muelle como el de la figura 2.2.1 [51]. El sistema consta de una masa m y un muelle de constante k . Este modelo sólo es válido para situaciones en las que los términos de amortiguamiento y rigidez son lineales, donde el amortiguamiento mecánico es proporcional a la velocidad y su rigidez proporcional al desplazamiento. Consideramos el coeficiente de amortiguamiento $d_T = d_m + d_e$ siendo d_m y d_e la contribución mecánica y eléctrica al mismo.

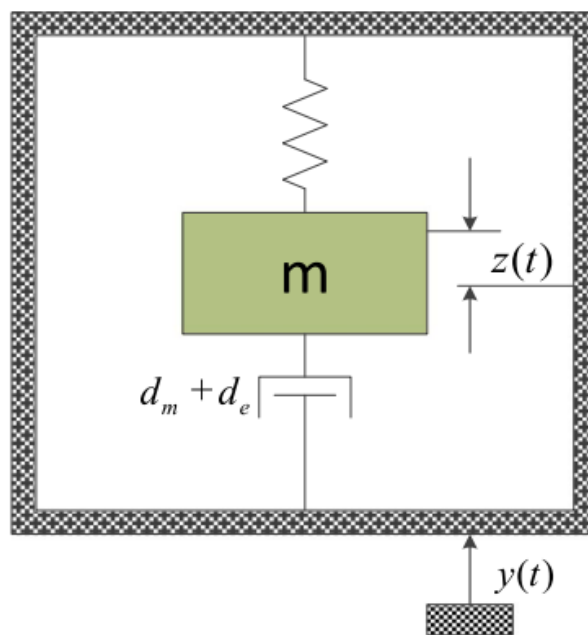


Figura 2.2.1: Modelo básico para un recolector de energía mecánico [39].

Supongamos que el sistema está sometido a una vibración mecánica externa dada por la ecuación $y(t) = Y_0 \sin \omega t$, donde Y_0 es la amplitud de la excitación externa y ω la frecuencia.

La ecuación diferencial del sistema es la siguiente:

$$m\ddot{z}(t) + (d_m + d_e)\dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t)$$

Donde $z(t)$ e $y(t)$ representan el desplazamiento de la masa y el desplazamiento externo respectivamente, como podemos observar en el diagrama.

La solución a la ecuación diferencial es:

$$z(t) = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{(d_m+d_e)\omega}{m}\right)^2}} Y_0 \sin\left(\omega t - \tan^{-1}\left(\frac{d_T\omega}{k - \omega^2 m}\right)\right)$$

Si denotamos $\zeta = (\zeta_m + \zeta_e) = d_T/2m\omega_n$ al ratio de amortiguamiento total, la potencia eléctrica de salida viene dada por:

$$p_{out} = \frac{m\zeta_e Y_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta_T \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}$$

La energía máxima se obtiene cuando la frecuencia de excitación ω es igual a la frecuencia natural ω_n del sistema masa-muelle, con $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$. En este caso, la potencia obtenida es:

$$p_{out} = \frac{m\zeta_e Y_0^2 \omega_n^3}{4\zeta_T^2}$$

Según esta relación, cuando el dispositivo vibra en resonancia, la potencia de salida depende de la masa de la estructura, la amplitud de la vibración externa y el amortiguamiento del sistema. Dado que la frecuencia y amplitud de la vibración dependen de la fuente externa y no del diseño, si queremos maximizar la conversión debemos cambiar los parámetros de amortiguamiento del recolector [52]. Podemos observar en la figura 2.2.2 una gráfica en la que se representa la potencia de salida del recolector para varios coeficientes de amortiguamiento, suponiendo $d_m = d_e$.

Es inmediato ver que se cumple que la potencia máxima se obtiene cuando la frecuencia de vibración coincide con la frecuencia de resonancia del sistema. Dado que las frecuencias de las vibraciones ambientales son generalmente bajas y arbitrarias, maximizar la salida es un trabajo complicado. Se discutirán posibles técnicas para diseñar dispositivos cuyas frecuencias de resonancia coincidan con las de las vibraciones en el tercer capítulo del trabajo.

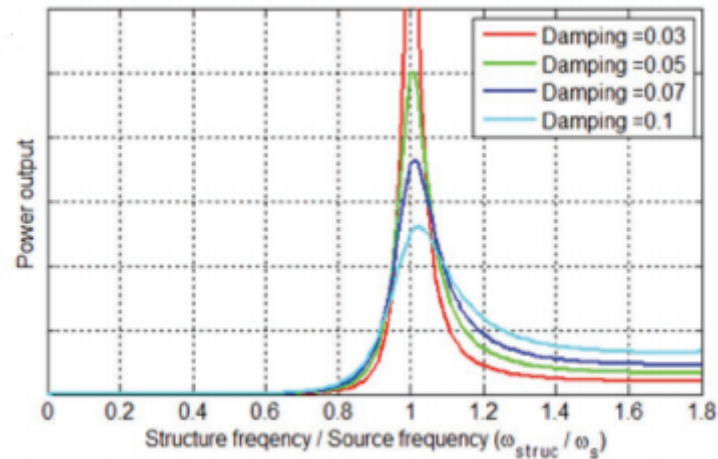


Figura 2.2.2: Potencia de salida genérica como función de la relación ω_n/ω para distintos coeficientes de amortiguamiento [53].

2.3. Piezoeléctrico

El modelo de recolección que utiliza materiales piezoeléctricos se ha convertido en uno de los más importantes, debido a la estructura simple del generador piezoeléctrico y su facilidad de incorporación en otros dispositivos. El transductor piezoeléctrico puede utilizarse para transformar la tensión mecánica en carga eléctrica, lo que se conoce como *efecto piezoeléctrico directo*. La tensión está causada habitualmente por vibraciones ambientales alrededor del dispositivo recolector. Por otro lado, también existe el *efecto piezoeléctrico inverso*, que convierte energía eléctrica en tensión mecánica.

2.3.1. Modelo teórico

Los materiales piezoeléctricos son un subconjunto de los materiales conocidos como ferroeléctricos, que, debido a su estructura molecular y tipos de enlace, contienen dipolos eléctricos, creando una separación de carga local cuando se aplica una presión o tensión mecánica [54].

Podemos observar un modelo sencillo de un transductor piezoeléctrico en la figura 2.3.1. En principio la polarización del material piezoeléctrico se alinea con el eje z , como se puede observar en el diagrama.

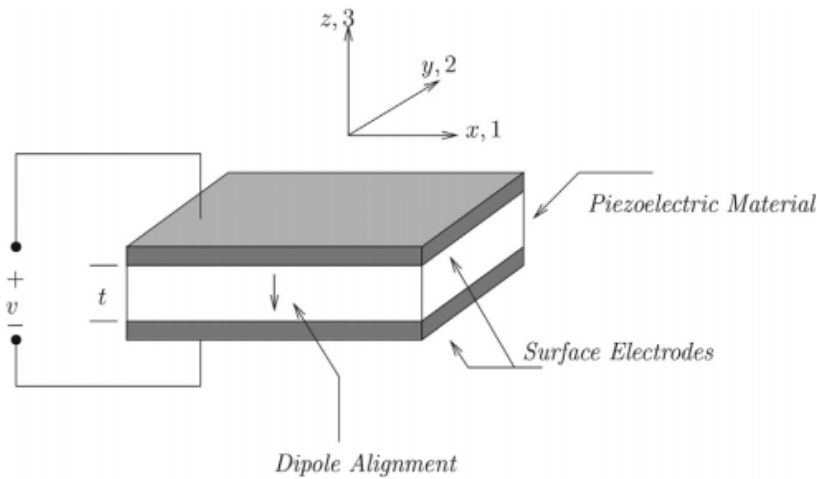


Figura 2.3.1: Modelo básico de recolector de energía piezoeléctrico [39].

La carga total sobre el dispositivo es una combinación de la carga mecánica debida a las vibraciones ambientales y la carga causada por el voltaje aplicado al transductor. Las ecuaciones que describen las propiedades eléctricas y mecánicas de un material piezoeléctrico son:

$$\{T\} = [c^E]\{S\} - [e]\{E\}$$

$$\{D\} = [e]\{S\} + [\epsilon^S]\{E\}$$

donde $[c^E]$ es la matriz de coeficientes elásticos evaluada bajo la actuación un campo eléctrico constante; $\{S\}$ es el vector de carga mecánica; $[e]$ es la matriz de constantes de carga piezoeléctricas; $\{E\}$ es el vector que define el campo eléctrico; $[\epsilon^S]$ es la matriz dieléctrica constante bajo tensión constante; $\{T\}$ es el vector de tensión mecánica; y $\{D\}$ es el vector de desplazamiento eléctrico. La primera ecuación representa el efecto piezoeléctrico inverso, mientras que la segunda representa el efecto piezoeléctrico directo.

Dado el modelo descrito anteriormente hay dos modos principales de acoplamiento para el transductor, como podemos ver en la figura 2.3.2.

- En el *modo 33* las cargas se acumulan en la superficie del electrodo cuando la fuerza tensora o compresora se aplica en la dirección de polarización.
- En el *modo 31* la carga se acumula en el electrodo cuando la fuerza aplicada es perpendicular a la dirección de polarización.

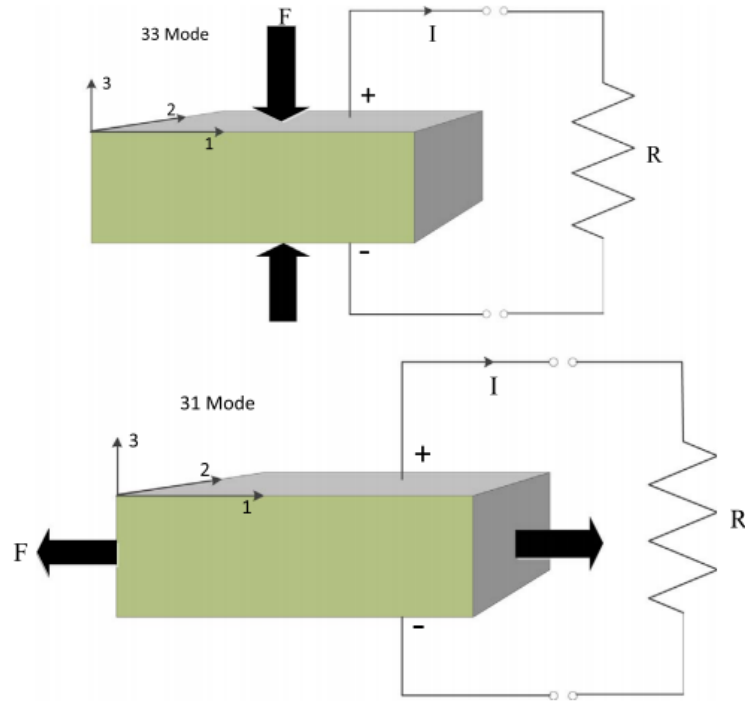


Figura 2.3.2: Modos de acoplamiento según la polarización del material piezoeléctrico [55].

Generalmente el factor de acoplamiento electromecánico, que indica la efectividad de la conversión del material piezoeléctrico, es mayor para el *modo 33* que para el *modo 31* [56]. Sin embargo, al analizar y comparar experimentalmente los dos modelos, se ha visto que el caso donde se aplica la tensión perpendicularmente a la dirección de polarización puede presentar ventajas para fuentes de baja presión, mientras que el *modo 33* es más útil cuando trabajamos con dispositivos de mayor volumen [55].

Si estudiamos, por ejemplo, las ecuaciones que definen el movimiento de la primera de las opciones, obtenemos lo siguiente [57]:

$$m\ddot{z}(t) + d_m\dot{z}(t) + kz(t) - \theta v(t) = m\ddot{y}(t)$$

$$\theta\dot{z}(t) + C_P\dot{v}(t) + \frac{1}{R_l}v(t) = 0$$

Donde C_P representa la capacitancia del material piezoeléctrico, θ es el acoplamiento electromecánico, R_l la carga resistiva y la fuerza mecánica se modela como proporcional al voltaje del material, $v(t)$. La energía eléctrica que se puede extraer en este caso es:

$$P_{out} = \frac{m\zeta_m\alpha\kappa^2\Omega^2\omega^4}{\omega_n\{[1 - (1 + 2\zeta_m\alpha)\Omega^2]^2 + [(2\zeta_m + (1 + \kappa^2)\alpha)\Omega - \alpha\Omega^3]^2\}}$$

donde $\alpha = \omega_n C_P R_l$ representa la constante de tiempo adimensional y $\kappa^2 = \theta^2 / (k C_P)$ es el coeficiente de acoplamiento electromecánico, también adimensional.

2.3.2. Diseños y dispositivos

Los objetivos principales durante el diseño de dispositivos de recolección piezoeléctricos son los mismos que el resto de recolectores vibracionales: reducir la frecuencia de resonancia para que coincida con la frecuencia de las vibraciones externas, aumentar el rango de frecuencias aprovechables, y aumentar su compatibilidad con los sistemas microelectromecánicos.

El diseño más empleado para los recolectores piezoeléctricos es el basado en la geometría de un voladizo, ya que dada una fuerza externa, se ha demostrado que es el que produce la mayor carga piezoeléctrica media [58]. Sin embargo, este tipo de dispositivos presenta un problema geométrico, ya que solo funcionan bien cuando operan en una única dirección. Una solución a este problema la propuso Li *et al.* [59], a partir de una estructura birresonante al acoplar dos voladizos de fluoruro de polivinilideno (PVDF) con frecuencias de resonancia diferentes. Esta estructura se puede ver en la figura 2.3.3.

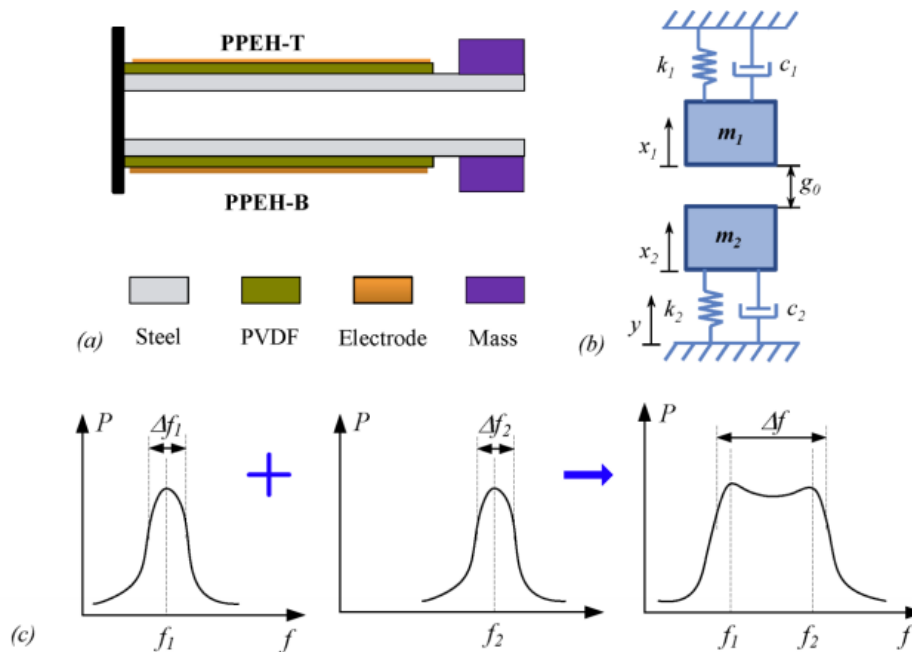


Figura 2.3.3: Diagrama esquemático de la estructura birresonante (a), análisis teórico del sistema mecánico (b) y potencia generada en función de la frecuencia para dispositivos con un único voladizo (izquierda, medio) y dispositivo con dos voladizos birresonantes (derecha) (c) [59]

Además de los diseños de recolectores con voladizos, se han propuesto otros diseños de dispositivos piezoeléctricos. Un ejemplo es el representado en la figura 2.3.4 [60]. Este dispositivo recolecta energía a partir de vibraciones inducidas por un flujo de agua. El dispositivo tiene una potencia de salida de $2.2\mu W$ a frecuencias de $26Hz$.

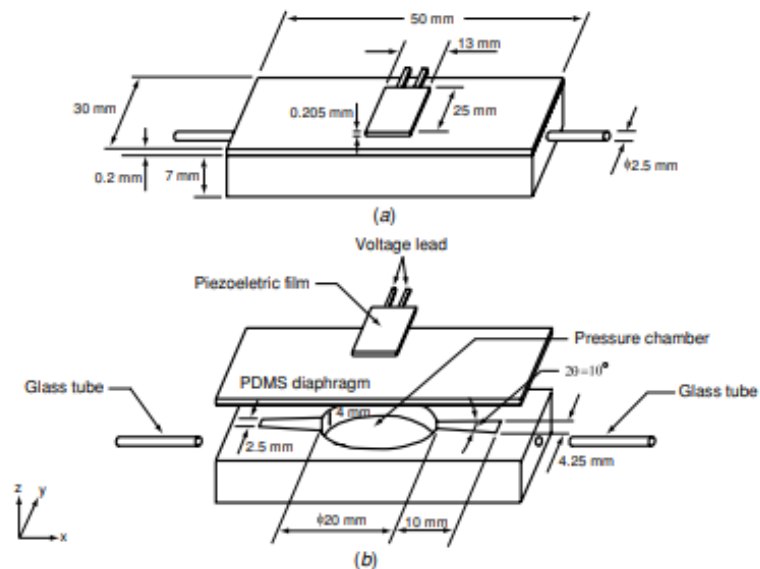


Figura 2.3.4: Diagrama del dispositivo (a) y sus componentes (b) [60].

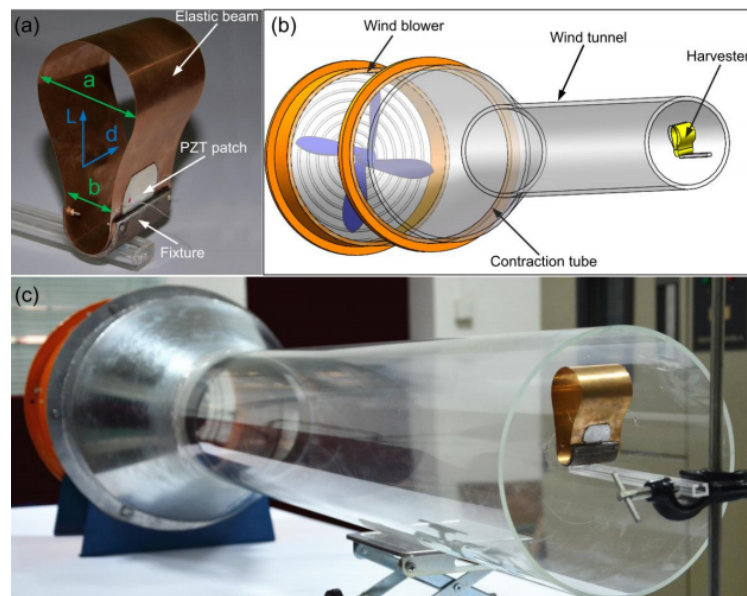


Figura 2.3.5: Recolector y dispositivo experimental: Fotografía del recolector (a), diagrama esquemático del diseño (b) y fotografía del dispositivo completo (c) [61]

Otro ejemplo es el presentado por Zhao *et al.* [61], reproducido en 2.3.5. Este dispositivo con forma de arco está diseñado para recolectar energía eólica procedente de distintas

direcciones. Produce una potencia eléctrica de $1.73mW$ para corrientes de aire de $17m/s$.

Por último, una de las maneras de incrementar la eficiencia de los recolectores piezoeléctricos es aumentar la concentración de estrés mecánico en uno de los elementos piezoeléctricos. Por ejemplo, en la figura 2.3.6 se puede ver un dispositivo diseñado para incrementar la carga piezoeléctrica durante vibraciones de baja frecuencia [62]. El objetivo de la estructura es conseguir focalizar la carga mecánica en una de las partes del dispositivo, en lugar de estar distribuida a lo largo de todo el voladizo.

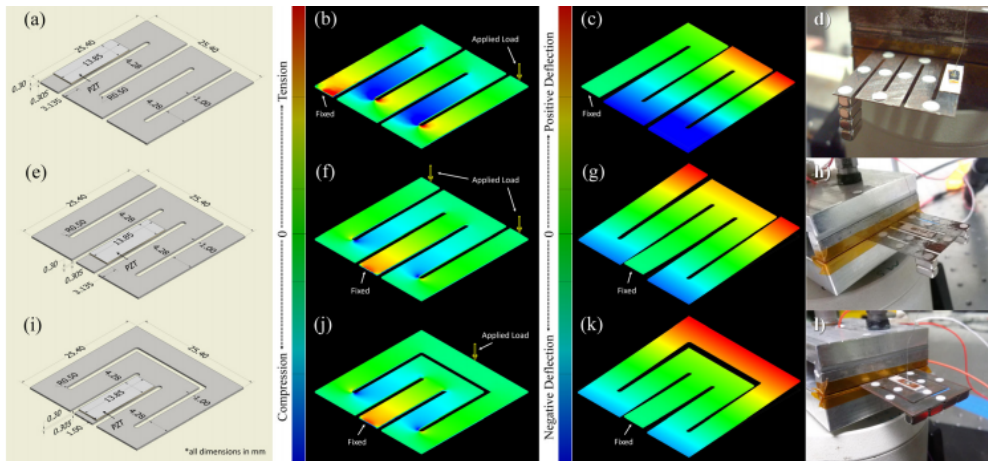


Figura 2.3.6: Esquema del recolector (*a, e, i*), análisis por elementos finitos de la tensión sobre los distintos dispositivos (*b, c, f, g, j, k*) y dispositivo experimental utilizado en [62] (*d, h, l*)

2.4. Electromagnético

En la figura 2.4.1 podemos ver un diagrama de un modelo con un grado de libertad de un recolector de energía electromagnético a partir de vibraciones. La vibración transmitida por la excitación de la base provoca un movimiento translacional del imán respecto a la bobina. Esta oscilación cambia el flujo magnético dentro de la bobina, y el voltaje producido dentro de la bobina puede describirse a partir de la ley de Faraday:

$$\epsilon_v = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Donde ϵ_v es el voltaje inducido y Φ_B es el flujo magnético.

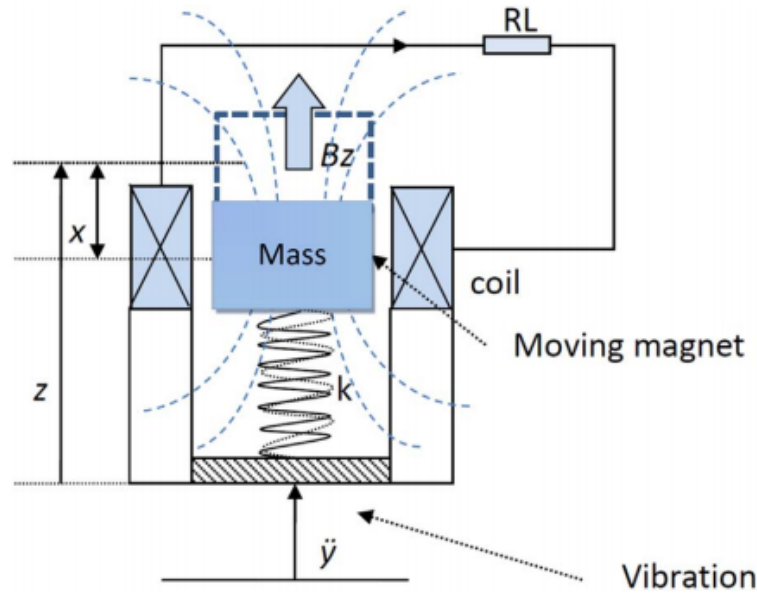


Figura 2.4.1: Un ejemplo de recolector de energía electromagnético [63].

En el caso simple de un imán moviéndose perpendicularmente a la bobina, el máximo de voltaje que se puede producir en el circuito es [64]:

$$V_{oc} = NBl \frac{dx}{dt}$$

donde N es el número de vueltas de la bobina, B es la inducción magnética, l es la longitud de una vuelta y x es el desplazamiento relativo entre el imán y la bobina. Es inmediato ver que la amplitud del voltaje es proporcional a la velocidad de dicho desplazamiento.

Si ignoramos la fuerza de la gravedad sobre el circuito y la resistencia interna, las ecuaciones del movimiento para este modelo son:

$$m\ddot{z} + d\dot{z} + kz = -\alpha V_L - m\ddot{y}$$

$$\dot{V}_L + \omega_C V_L = \delta_C \omega_c \dot{z}$$

donde $\alpha = B_z l / R_L$ es el factor de acoplamiento eléctrico, V_L es el voltaje resultante a través de la carga resistiva, d representa el amortiguamiento mecánico, $\delta_c = B_z l$ es el factor de conversión, $\omega_c = R_L / L_e$ es la frecuencia de corte característica y $L_e = \mu_0 N^2 \pi R^2 / h_b$ es la autoinductancia de la bobina. La primera ecuación describe la dinámica de la masa en movimiento, y la segunda describe la conversión electromecánica.

2.4.1. Diseño y dispositivos

A pesar de no poseer una literatura tan completa como los materiales piezoeléctricos, se ha diseñado una amplia variedad de generadores electromagnéticos, algunos de los cuales se presentan en esta sección. Vamos a presentar una serie de ejemplos de diseños. En el siguiente capítulo nos centraremos en este tipo de recolección e introduciremos un número más amplio de casos prácticos del mismo.

Un ejemplo de este tipo de recolector es el presentado por Zhu y su equipo [65]. Se puede observar un diagrama del mismo en la figura 2.4.2. El microgenerador puede ajustar su frecuencia de resonancia para que sea compatible con las vibraciones externas. Las frecuencias con las que la conversión es mayor se encuentran entre 67.6 y 98 Hz .

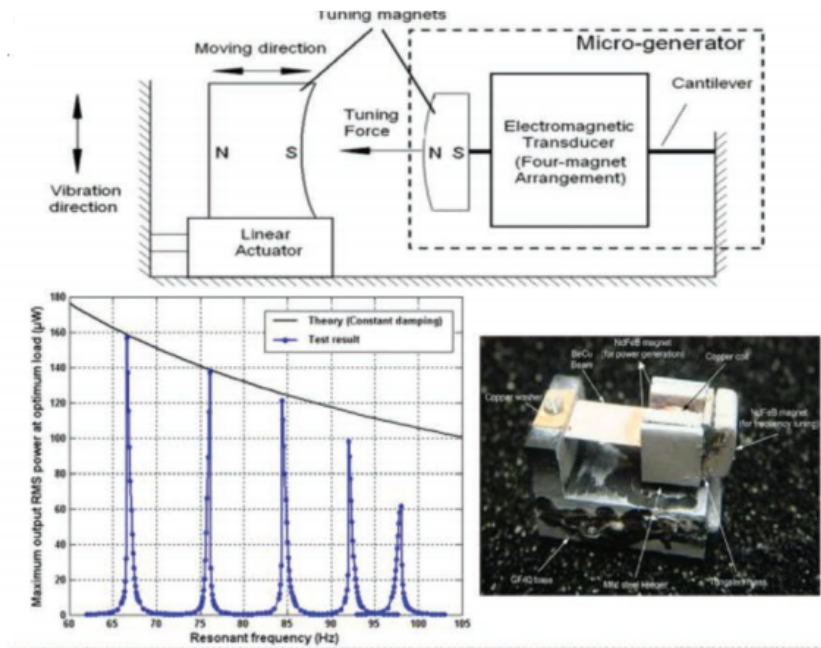


Figura 2.4.2: Esquema y resultados de un micro-generador con ajuste de frecuencia [65]

Una manera de aumentar el voltaje de salida es introducir más de un imán en la estructura del generador, como hizo Marin *et al.* [66] en el recolector representado en 2.4.3. Se observa una mejora del 23% en la conversión. El volumen del dispositivo apenas aumenta.

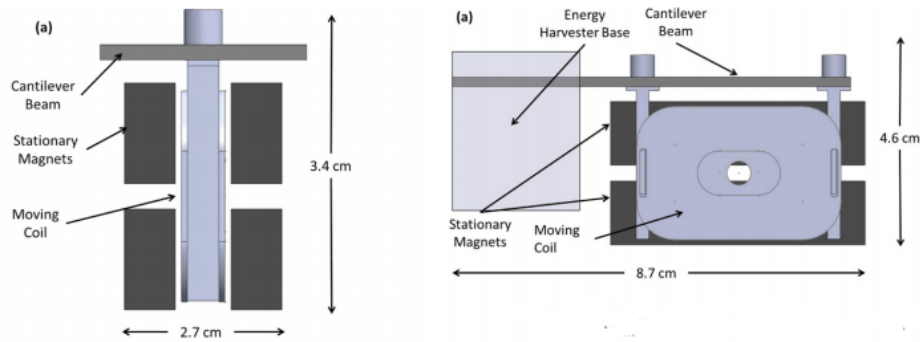


Figura 2.4.3: Diagrama del dispositivo con una única célula (a) y con doble célula (b) utilizado en [66]

Otro ejemplo de diseño en el que se prima maximizar la salida es el visto en la figura 2.4.4 [67]. Dicho recolector utiliza un imán que se mueve libremente dentro de unos límites en el interior de la estructura. Se colocan dos resortes en los extremos para reducir la pérdida de energía, y la potencia proviene del movimiento del imán y de los impactos del mismo contra la montura. La potencia de salida de este dispositivo es 10 veces mayor que la del modelo básico de recolector electromagnético a frecuencias de 10Hz .

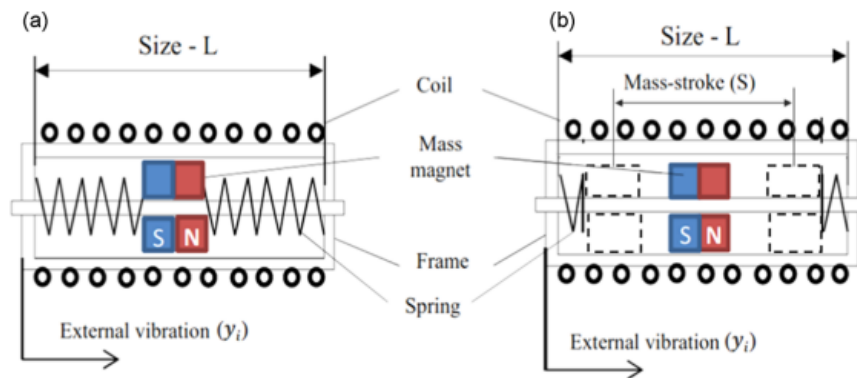


Figura 2.4.4: Diseño convencional de recolector electromagnético (a) frente al diseño esquemático (b) del recolector utilizado en [67]

El último caso presentado en esta sección es un dispositivo diseñado y fabricado a partir de procesos *MEMS* [68]. Veremos en el siguiente capítulo más ejemplos de este tipo de recolector. En este caso, como podemos ver en 2.4.5, la bobina utilizada se ha fabricado con microtecnologías, minimizando el volumen del aparato.

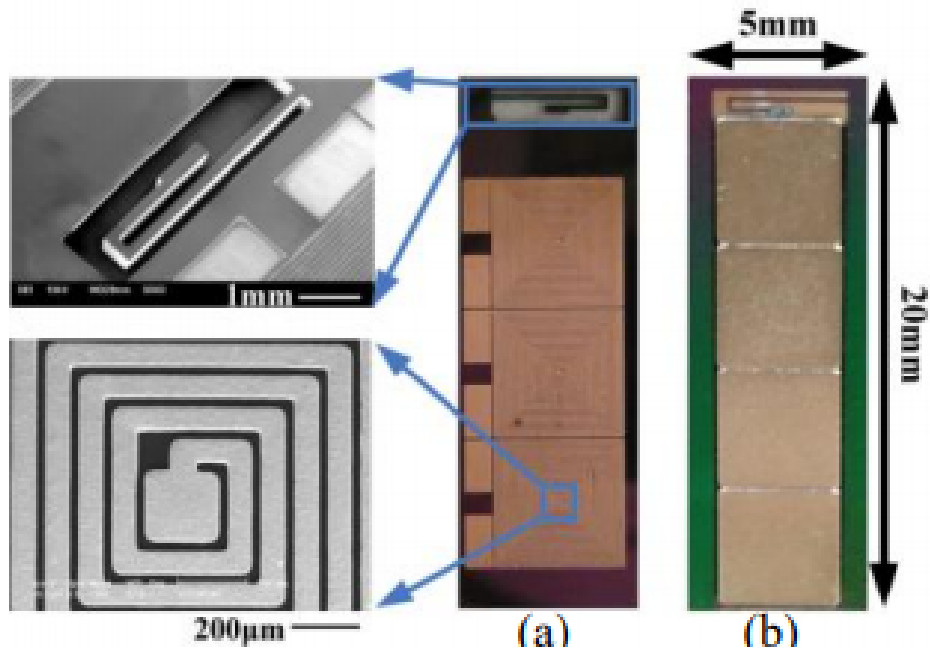


Figura 2.4.5: Imagen frontal (a) y trasera (b) del recolector introducido en [68]

Hasta el momento, los dispositivos de recolección electromagnética se han utilizado en sistemas de mayor escala. Sin embargo, nuevos procesos de fabricación e integración *MEMS* permiten implementar este tipo de recuperación de energía en sistemas microelectromecánicos. La simplicidad de la conversión de energía y diversidad de diseños para el dispositivo recolector hace que este tipo de recuperación sea una de las más prometedoras. En el siguiente capítulo estudiaremos más a fondo cómo mejorar la compatibilidad de estos dispositivos con los sistemas *MEMS*.

2.5. Electrostático

El principio básico para la recolección de energía electrostática es la Ley de Coulomb. Los recolectores electrostáticos aprovechan una variación en la capacitancia de condensadores de placas paralelas, generalmente aisladas por aire, vacío o un aislante. Recordemos la definición de capacitancia:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Donde Q es la carga y V el voltaje del dispositivo estudiado. En el caso de un condensador

de placas paralelas, su capacitancia viene dada por:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_s}$$

Donde ϵ_0 es la permitividad dieléctrica del vacío, ϵ_r la permitividad dieléctrica del material utilizado entre las placas del condensador, A el área de las placas y d_s la distancia entre ellas.

En general se pueden presentar dos configuraciones para la recolección de energía electrostática: basadas en voltaje o carga constante.

Para mantener la carga sobre el condensador constante, la variación de capacitancia hará que la energía almacenada en dicho condensador sea de la forma:

$$E = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}Q^2/C$$

En sistemas con voltaje constante, para poder variar dicha energía, debemos ejercer una fuerza opuesta a la fuerza electrostática entre las placas del condensador, dada por

$$F_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r AV^2}{2d_s^2}$$

En sistemas con carga constante, dicha fuerza es:

$$F_e = \frac{Q^2 d}{2\epsilon_0 \epsilon_r A}$$

En la figura 2.5.1 se muestra un circuito simplificado como generador electrostático, suponiendo carga constante. En este circuito, el máximo de energía potencial que puede ser extraído es

$$E = \frac{V_{in}^2 (C_{max} - C_{min})(C_{max} + C_{par})}{(C_{min} + C_{par})2}$$

y

$$E = \frac{1}{2}V_{in}V_{max}(C_{max} - C_{min})$$

Donde C_{max} es la capacitancia máxima y C_{min} la capacitancia mínima de la estructura y V_{max} el voltaje máximo que puede atravesar un interruptor. C_{par} es la capacitancia parásita del sistema.

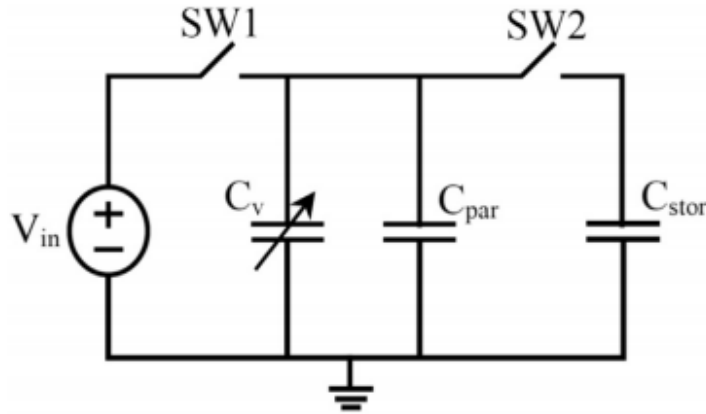


Figura 2.5.1: Modelo básico para un recolector de energía electrostático [69].

La potencia generada en el sistema, basándonos en una excitación externa como la presentada en el modelo general de este capítulo, es:

$$P_e(\omega) = \frac{1}{2} d_e \frac{m^2 \omega^6 Y_0^2}{(k - m\omega^2)^2 + (d_e + d_m)^2 \omega^2}$$

Si se consigue igualar la frecuencia de la excitación externa a la frecuencia resonante del sistema de conversión, la potencia de salida es dada por:

$$P_e(\omega) = \frac{1}{2} \frac{d_e}{(d_e + d_m)} m^2 \omega^4 Y_0^2$$

Donde el coeficiente de amortiguamiento eléctrico d_e y mecánico d_m están determinados por el generador electrostático, y distintos prototipos de recolectores pueden tener distintos coeficientes.

2.5.1. Diseño y dispositivos

A continuación presentamos una serie de ejemplos de la puesta en práctica de la recolección electrostática.

Un ejemplo de recolector electrostático se puede observar en la figura 2.5.2. El dispositivo, cuyo diseño se basa en los sistemas *MEMS*, puede generar $61nW$ de potencia con vibraciones externas de $250Hz$ [70].

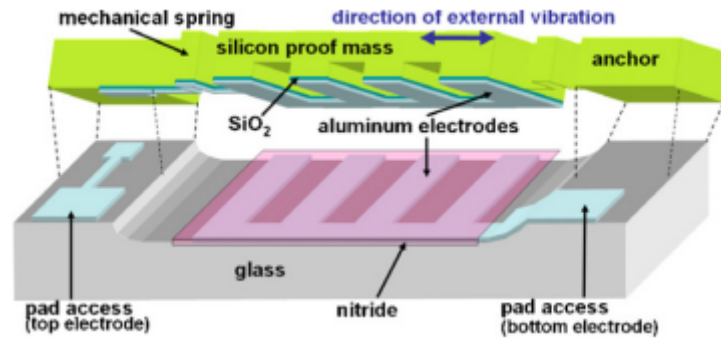


Figura 2.5.2: Diagrama tridimensional esquemático del recolector presentado en [70].

Como hemos visto, en general, uno de los objetivos a la hora de diseñar nuevos métodos de recolección es la disminución de la frecuencia de resonancia del dispositivo para que sea similar a las frecuencias recolectadas. Un ejemplo de vibraciones pueden ser los movimientos humanos, con frecuencia menor a $10Hz$. Un dispositivo diseñado para recolectar este tipo de movimientos es el representado en la figura 2.5.3 [71]. La potencia obtenida por el generador son $40\mu W$ con vibraciones de $2Hz$. Sin embargo, se necesita mejorar el diseño, ya que se han encontrado pérdidas de energía por colisiones dentro del aparato.

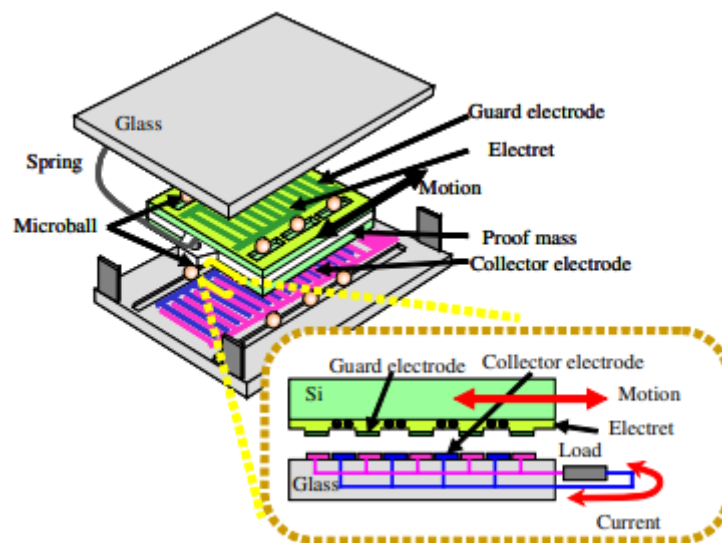


Figura 2.5.3: Diagrama de la estructura del generador electrostático presentado en [71].

Aunque sea habitual encontrar fuentes de vibración de baja frecuencia, también se diseñan recolectores capaces de aprovechar vibraciones de más de $1kHz$. Podemos observar un diagrama de un ejemplo de este tipo de generador en la figura 2.5.4. La potencia generada es de $3.5\mu W$ para frecuencias entre $1300 - 1480Hz$ [72].

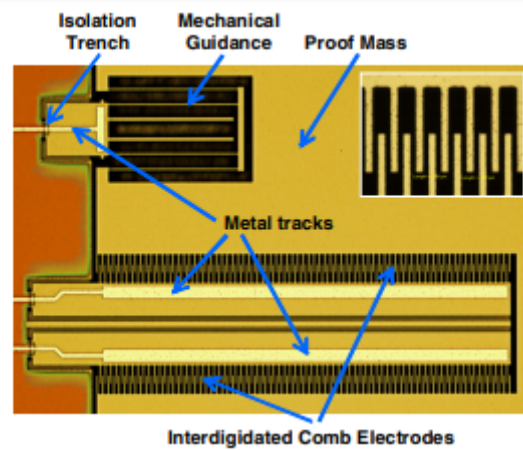


Figura 2.5.4: Vista de primer plano microscópica del transductor electrostático. La figura en la parte superior derecha representa un detalle del electrodo en forma de peine [72].

Un ejemplo de dispositivo con un rango de frecuencias amplio, y que trabaja con frecuencias pequeñas es el representado en 2.5.5. El dispositivo puede generar $4.95\mu W$ cuando la vibración externa es de $136Hz$, pero trabaja adecuadamente con frecuencias en $160 \pm 12.5Hz$ [73].

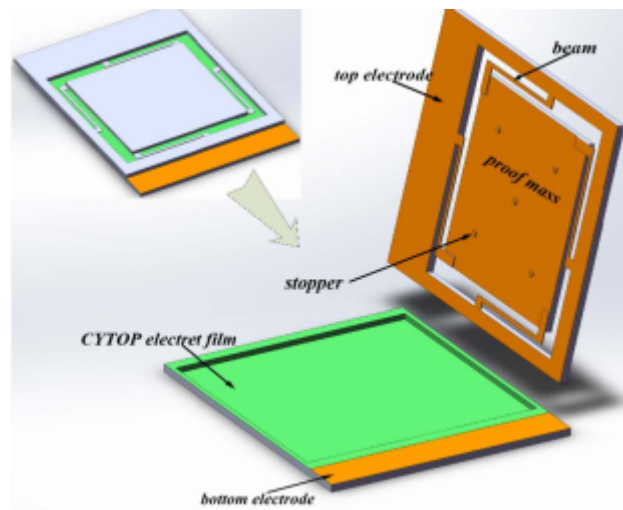


Figura 2.5.5: Diagrama tridimensional esquemático del recolector electrostático presentado en [73]

2.6. Triboeléctrico

El efecto triboeléctrico ocurre cuando se crean y acumulan cargas opuestas en la superficie de dos objetos en contacto. A pesar de ocurrir habitualmente en nuestro día a día, no se utilizó este efecto como método de recolección de energía hasta 2012 [74]. El principio fundamental del generador se basa en la migración de cargas eléctricas entre las superficies de los dos

materiales. Cuando dos materiales están en contacto, algunas cargas pueden transferirse para equilibrar su potencial electroquímico. Al separarse los materiales, la carga eléctrica puede volver o no al material inicial, creando así una diferencia de potencial entre las superficies. Se crea una corriente de electrones entre las superficies para equiparar el potencial. Dicha corriente puede expresarse a través de la siguiente expresión:

$$I = C \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial t}$$

Donde V es el voltaje a través del electrodo, C es la capacitancia del sistema y t es el tiempo. El primer término de la ecuación describe el cambio de potencial de los electrodos debido a las cargas inducidas electrostáticamente y el segundo es la variación de la capacitancia.

Los generadores triboeléctricos suelen tener 4 modos, como se puede observar en la figura 2.6.1, que son: contacto-separación, deslizamiento, autónomo y electrodo único.

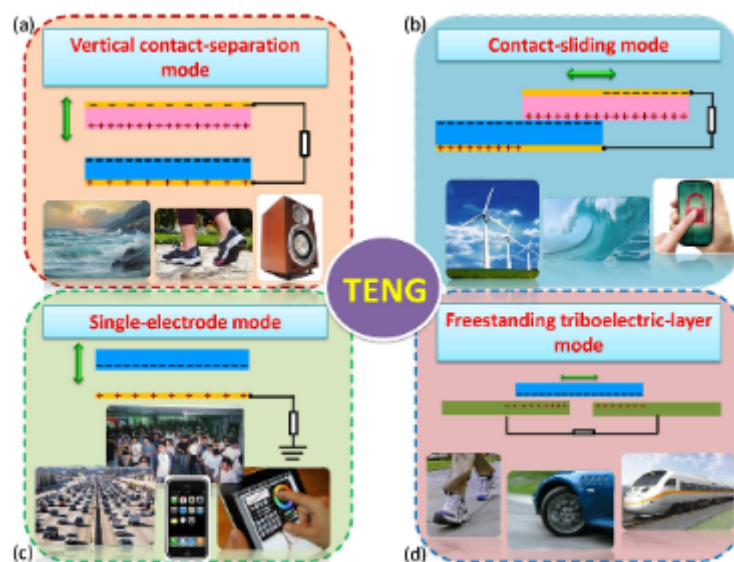


Figura 2.6.1: Modos de vibración de los dispositivos triboeléctricos [75].

2.6.1. Diseño y dispositivos

A continuación y como finalización del capítulo, presentamos una serie de ejemplos prácticos de recolectores triboeléctricos.

Un ejemplo de utilización de recolectores triboeléctricos es en teclados de ordenador, como en [76]. Este recolector, presentado en forma de funda para cada tecla, utiliza las pulsaciones

al escribir como fuente de energía. Se puede observar una ilustración del diseño del material y funcionamiento en 2.6.2

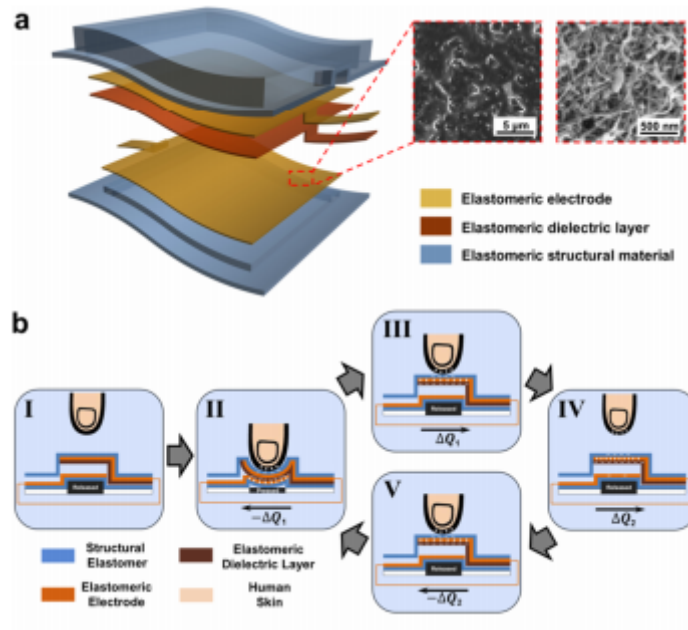


Figura 2.6.2: Representación esquemática de los materiales utilizados en el recolector (a) y principio operativo del mismo (b) [76].

Otro ejemplo de la utilización de un recolector triboeléctrico en teclados informáticos se presentó en [77]. Dicho generador sirve como fuente de energía para una secuencia de LEDs que iluminan el propio teclado. Se puede observar una ilustración de su diseño y principio operacional en la figura 2.6.3

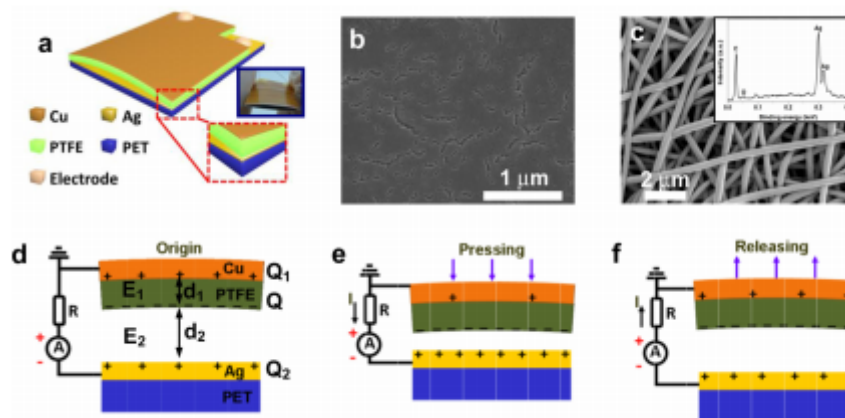


Figura 2.6.3: Diagrama esquemático del nanogenerador triboeléctrico (a), imágenes de los materiales utilizados (b), (c), y principio operativo (d – f) [77].

Por último, un ejemplo interesante de generador triboeléctrico es el presentado por Jiang *et al.* en [78]. El generador utiliza materiales biodegradables, por lo que se puede utilizar en

implantes o marcapasos. Además, el voltaje conseguido con este recolector es alto, 55 V. Se representa la estructura de capas del generador en la figura 2.6.4

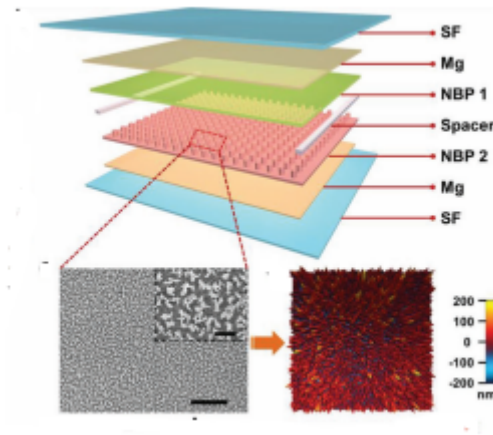


Figura 2.6.4: Diagrama esquemático de la estructura del generador presentado en [78].

En este capítulo hemos estudiado las principales técnicas de recolección de energía a partir de vibraciones ambientales. Hemos presentado los ejemplos prácticos que consideramos más significativos, pero existen un gran número de dispositivos que utilizan este tipo de obtención de energía. En el siguiente capítulo estudiaremos algunos diseños con más detalle.

Capítulo 3

Integración de dispositivos electromagnéticos de recolección de energía vibracional en sistemas MEMS

En este capítulo nos vamos a centrar en la integración de dispositivos electromagnéticos de recolección de energía vibracional en sistemas microelectromecánicos, o *MEMS*.

3.1. Introducción

Los recolectores estudiados en esa sección son los recolectores electromagnéticos, introducidos en el capítulo anterior.

El objetivo principal del estudio es encontrar la manera de optimizar el generador de energía y su integración en los sistemas microelectromecánicos. Una manera de evaluar los recolectores es a partir de su densidad de energía, es decir, la energía obtenida por unidad de volumen. Por tanto, el diseño de los dispositivos debería tener como objetivos minimizar su tamaño y maximizar la conversión de energía mecánica a eléctrica.

Los dispositivos piezoeléctricos presentan una densidad de energía alta, por lo que podríamos estudiar su implementación en dispositivos de pequeño tamaño. Sin embargo, el material utilizado influye significativamente en el rendimiento del recolector. Nuevos diseños podrían aumentar la eficiencia de la conversión, pero la mayoría de estudios realizados se basan en la búsqueda de nuevos compuestos y materiales con propiedades piezoeléctricas

mejores.

Los dispositivos triboeléctricos son muy recientes, y todavía no se han desarrollado lo suficiente como para realizar un estudio sobre su compatibilidad con estos sistemas. Los recolectores electrostáticos necesitan una fuente de energía externa así que sus aplicaciones son más limitadas.

Por último, los dispositivos electromagnéticos presentan una resistencia interna pequeña, lo que lleva a una corriente de salida mayor. Además, la frecuencia natural del sistema y el factor de amortiguamiento pueden ajustarse al variar distintos parámetros del dispositivo, y no dependen directamente de los materiales utilizados. Por tanto, nos vamos a centrar en este tipo de dispositivo durante el resto del capítulo, ya que es el que presenta más ventajas a la hora de integrarse en *MEMS*.

3.2. Criterios de optimización

Se estudian, principalmente, 3 posibilidades para la optimización de los dispositivos de recolección electromagnéticos: reducir su frecuencia de resonancia, aumentar la banda de frecuencias de vibración y mejorar su compatibilidad con los sistemas *MEMS*.

3.2.1. Reducción de la frecuencia de resonancia.

Podemos encontrar vibraciones de baja frecuencia en electrodomésticos, objetos cotidianos y en construcciones y edificios. En general, este tipo de vibraciones tiene un modo fundamental de menos de 100 Hz , y aceleraciones máximas entre $0.5 - 5\text{ m/s}^2$. Algunos sistemas necesitan recolectores de energía de vibraciones con frecuencia muy baja, incluso menor a 20 Hz . Esto implica que el recolector debe mantener un volumen pequeño, debe trabajar con una frecuencia de resonancia baja, y debe generar suficiente potencia eléctrica. Si la frecuencia de resonancia es demasiado alta, el recolector no podrá aprovechar las vibraciones ambientales de baja frecuencia, por lo que disminuirá su efectividad. Por tanto, reducir la frecuencia de resonancia del dispositivo es uno de los objetivos de los investigadores para mejorar estos recolectores.

El primer recolector de energía electromagnética con dimensiones en torno a los mm fue diseñado en 1997 por Shearwood y Yates [79]. Como podemos ver en la figura 3.2.1, el

dispositivo está formado por un imán de *SmCo* y una bobina plana de oro, sobre un sustrato de *GaAs(001)* sobre el que se crea una cavidad en la que oscila el imán.

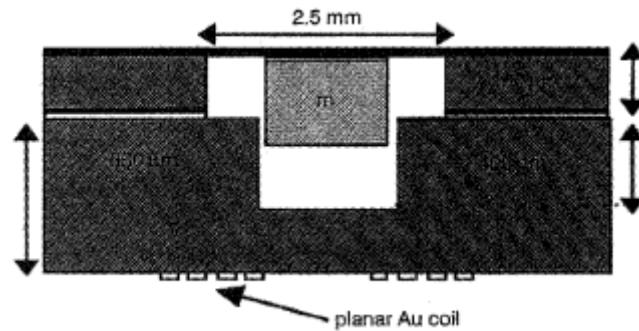


Figura 3.2.1: Diagrama del recolector presentado en [79].

Experimentalmente se obtiene una potencia de $3 \mu W$ con una frecuencia de resonancia de $4.4 kHz$. El volumen del dispositivo son aproximadamente $17.5 mm^3$, por lo que la densidad de potencia es de $17.14 \mu W/cm^3$. La frecuencia de resonancia del recolector es demasiado alta para poder obtener una eficiencia óptima. Sin embargo, este dispositivo es un caso interesante de estudio ya que fue el primero en diseñarse con unas dimensiones tan pequeñas.

En el año 2000, la Universidad de Hong Kong presentó un prototipo de recolector de energía electromagnético [80]. El dispositivo consta de una bobina de cobre en forma de espiral plana, y un imán permanente. El imán se conecta a la bobina, que se encuentra en una estructura fija, a partir de una serie de muelles fabricados con tecnologías láser para minimizar su tamaño. Se puede apreciar una imagen ampliada del prototipo del muelle en la figura 3.2.2.

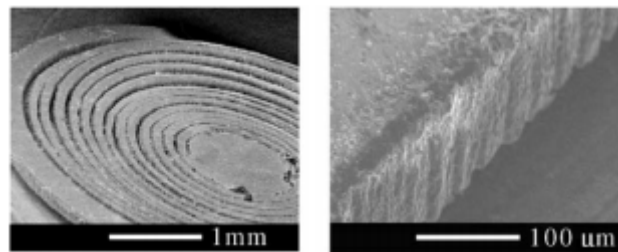


Figura 3.2.2: Prototipo de la estructura del muelle de *Cu* presentado en [80].

El dispositivo inicial podía generar $10 \mu W$ a $2V$ con una frecuencia de excitación de $64 Hz$. Su volumen total es de $1 cm^3$. Un prototipo posterior, de 2002, conseguía una potencia de salida máxima de $830 \mu W$ con frecuencias entre $60 - 110 Hz$. En 2003 integraron un circuito

de administración de energía en el recolector, y cambiaron las dimensiones del mismo para que fuesen iguales a las de una pila AA estándar.

En 2007, Beeby *et al.* diseñaron un dispositivo recolector de energía electromagnético basado en un *micro-voladizo* [81]. Un prototipo del recolector se puede observar en la figura 3.2.3. Cuatro imanes de $NdFeB$ están pegados al extremo suelto de la plataforma. También se le añaden 2 bloques de tungsteno al extremo de la plataforma, para aumentar la amplitud de vibración de la misma.

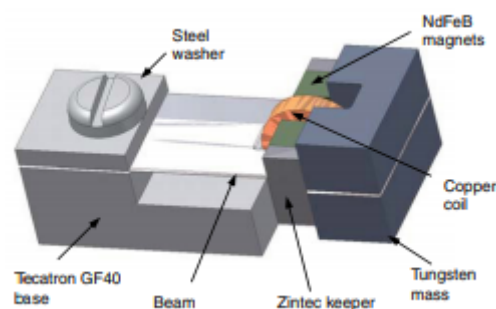


Figura 3.2.3: Prototipo de recolector con micro-voladizo presentado en [81].

El recolector genera una potencia de $46\mu W$ con una carga resistiva de $4k\Omega$ cuando la frecuencia de oscilación es $52 Hz$. El volumen del dispositivo es de $0.15 cm^3$, por lo que su densidad de potencia es $307\mu W/cm^3$. La posición de la masa adicional y el imán hacen que la frecuencia del dispositivo decrezca. El desplazamiento relativo entre el campo magnético y la bobina se aumenta, por lo que la potencia de salida aumenta. Aún así, los requisitos de precisión durante el ensamblaje manual dificultan su integración práctica.

En 2010, Dallago *et al.* diseñaron un recolector de energía electromagnético con forma de cilindro vertical, como se puede apreciar en la figura 3.2.4 [82]. Consiste de 4 imanes, dos fijos y dos oscilantes en el interior del tubo. La bobina rodea la estructura cilíndrica.

El voltaje máximo que produce esta estructura es de $2.25V$ con una potencia de $6\mu W$ con frecuencia de resonancia de $10.4 Hz$. La frecuencia de resonancia es muy baja, y el voltaje producido es bastante alto comparado con los otros diseños estudiados. No obstante, el proceso de fabricación del dispositivo es complejo. El largo del generador son $56 mm$, por lo que es grande comparado con el tamaño usual de los dispositivos *MEMS*. Aún así,

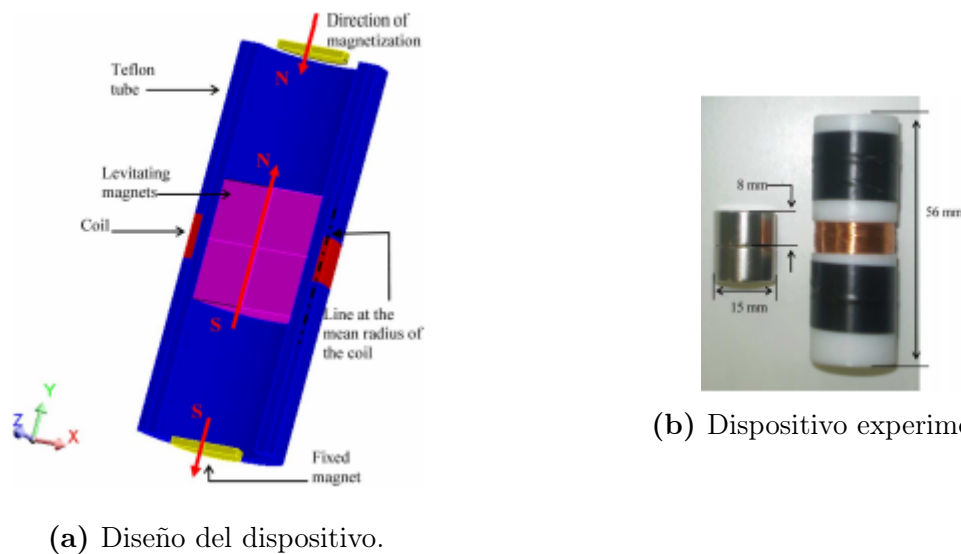


Figura 3.2.4: Diseño y dispositivo experimental del recolector presentado en [82]

comparado con los dispositivos electromagnéticos tradicionales, es relativamente pequeño, y los valores del voltaje y potencia de salida hacen que merezca la pena su estudio.

En 2010, Sari *et al.* produjeron un prototipo de convertidor de frecuencia [83]. El dispositivo puede convertir la frecuencia de la excitación externa en la frecuencia de resonancia del propio componente, aumentando significativamente la eficiencia de la conversión. En la figura 3.2.5 se puede apreciar la estructura del recolector.

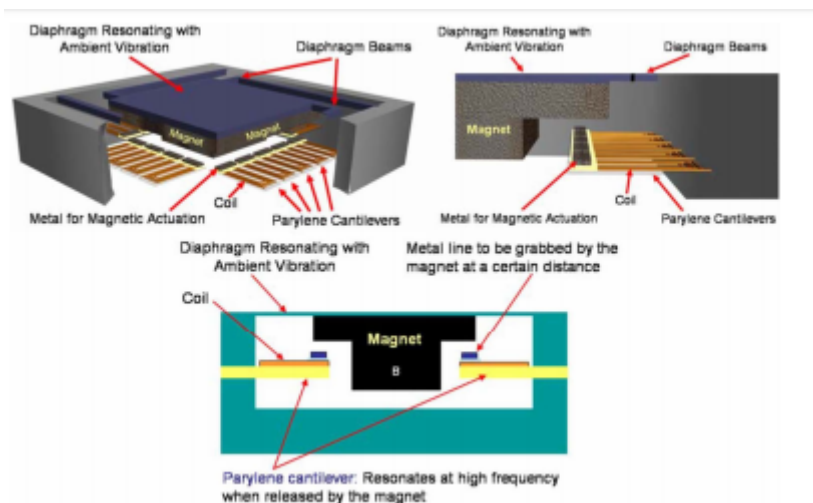


Figura 3.2.5: Estructura del dispositivo presentado en [83].

El dispositivo puede generar un voltaje de 0.25 mV y una potencia de 0.25 nW utilizando vibraciones con frecuencias entre $70 - 150 \text{ Hz}$. Su volumen es de 0.15 cm^3 , por lo que su

densidad de potencia es $3.3 * 10^{-2} \mu W/cm^3$. El diseño del dispositivo es novedoso, y su principio de funcionamiento es simple.

En 2010, la *Middle East Technical University* presentó un recolector de energía electromagnético con una masa inercial no magnética [84]. Esto ayuda a reducir la frecuencia de resonancia del dispositivo y a incrementar su potencia de salida. Podemos ver la estructura y el prototipo de masa inercial utilizado en la figura 3.2.6. Ulucsan *et al.* [84] muestran en su estudio cómo cuando aumenta la masa del imán, disminuye la frecuencia de resonancia del dispositivo.

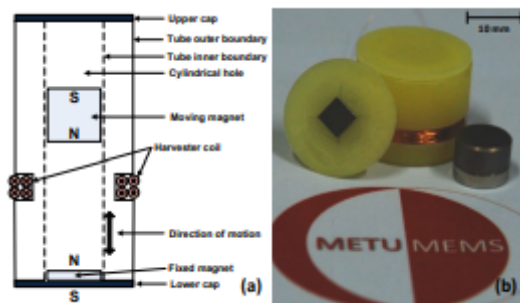


Figura 3.2.6: Estructura del recolector (a) y prototipo de masa inercial (b) presentados en [84].

El dispositivo genera una potencia de $110 \mu W$ con una frecuencia de resonancia de $15 Hz$. Su volumen son $6 cm^3$, por lo que la densidad de potencia es $18 \mu W/cm^3$. Comparado con los sistemas con una masa única, el uso de una masa magnética y otra adicional reduce la frecuencia de resonancia y aumenta la potencia de salida a frecuencias bajas, aunque el volumen del recolector es bastante mayor al resto de los estudiados.

En 2015, Palagummi *et al.* diseñaron un sistema vertical monoestable de levitación diamagnética para la recolección de energía [85]. La levitación del imán elimina la pérdida de energía sufrida por la fricción. Un esquema del dispositivo experimental se puede ver en la figura 3.2.7. Al producirse vibraciones internas, el imán levitante oscila, produciendo un cambio de flujo magnético sobre las bobinas, lo que crea una corriente eléctrica.

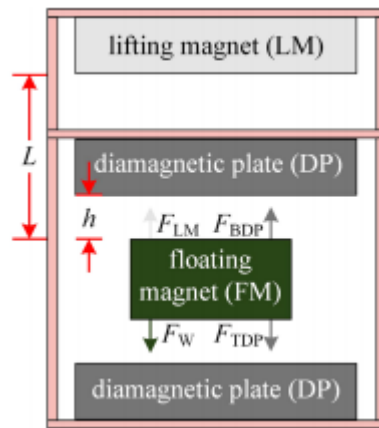


Figura 3.2.7: Diagrama del recolector presentado en [85].

El dispositivo es capaz de generar una potencia de $1.72 \mu W$ con una frecuencia de resonancia de $2.1 Hz$. La frecuencia es extremadamente baja comparada con las frecuencias de resonancia de los otros dispositivos presentados, y la levitación puede minimizar el efecto del rozamiento. No obstante, el dispositivo tiene un volumen mayor a los estudiados, y es difícil de integrar en los sistemas *MEMS*.

En 2016, Seo *et al.* diseñaron un recolector electromagnético con frecuencia de resonancia baja [86]. Un diagrama del dispositivo se puede ver en la figura 3.2.8.

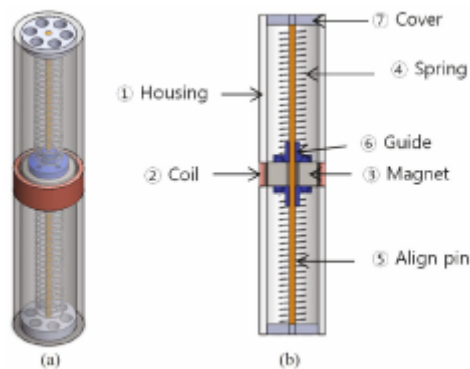


Figura 3.2.8: Diagrama del recolector presentado en [86].

El dispositivo puede generar un máximo de potencia de $0.432 mW$ con una frecuencia de $2.1 Hz$ y una carga resistiva de $9 k\Omega$. La frecuencia de vibración es baja, pero el proceso de fabricación del dispositivo es complejo, y el volumen es demasiado grande para integrarse en sistemas *MEMS*.

Hemos visto 8 diseños diferentes para la reducción de la frecuencia de resonancia de los dispositivos de recolección de energía vibracionales. Como se puede observar, en los trabajos más recientes, la frecuencia de las oscilaciones que se pueden aprovechar es menor. Sin embargo, para frecuencias muy bajas, los dispositivos estudiados tienen un volumen demasiado grande. Podemos ver un resumen de sus características principales en la siguiente tabla:

Referencia	Año	Frecuencia Hz	Volumen cm^3	Voltaje mV	Potencia μW	Dens. de Pot. $\mu W/cm^3$
Shearwood <i>et al.</i> [79]	1997	4.4k	$1.75 * 10^{-2}$		0.3	17.14
Ching <i>et al.</i> [80]	2002	110	1	$4.4 * 10^3$	830	830
Beeby <i>et al.</i> [81]	2007	52	0.15	428	46	307
Dallago <i>et al.</i> [82]	2010	10.4	9.9	$2.25 * 10^3$	$6 * 10^3$	606.06
Sari <i>et al.</i> [83]	2010	70-150	0.15	11.4	$5 * 10^{-3}$	$3.3 * 10^{-2}$
METU [84]	2015	15	6	$1.61 * 10^3$	110	18
Palagummi <i>et al.</i> [85]	2015	2.1			1.72	
Seo J <i>et al.</i> [86]	2016	2.1	30.5	$6.5 * 10^3$	432	14.16

Cuadro 3.2.1: Resumen de las características de los dispositivos estudiados en esta sección

3.2.2. Aumento de la banda de frecuencias de vibración.

En sistemas lineales con una sola frecuencia de resonancia, cuando la vibración externa se aleja de dicha frecuencia natural, la conversión del dispositivo se ve gravemente afectada.

Si la frecuencia de vibración se desvía de la frecuencia de resonancia del dispositivo, la potencia generada disminuye rápidamente. Es inviable predecir la frecuencia de vibración de fuentes arbitrarias. Incluso vibraciones conocidas pueden variar dentro de un rango de frecuencias. Por tanto, es necesario desarrollar recolectores con más de una frecuencia de resonancia, o que trabajen con un rango de frecuencias, para mejorar la eficiencia de conversión de vibraciones aleatorias en energía eléctrica.

Se han propuesto una serie de soluciones para solventar este problema. Se puede aumentar el número de modos de vibración del recolector para intentar que una de sus frecuencias de resonancia coincida con la frecuencia de vibración externa. Otra técnica utilizada es la eliminación completa del muelle en el dispositivo, para que la vibración sea libre. Si se agrupan recolectores en serie con parámetros ligeramente distintos, el sistema será capaz de recolectar oscilaciones con cada una de las frecuencias de resonancia de los recolectores

involucrados.

En 2008, Yang *et al.* diseñaron un recolector electromagnético basado en un voladizo con extremos fijos y 3 conjuntos de imanes y bobinas [87]. Se puede observar un diagrama del dispositivo en la figura 3.2.9. La estructura tiene 3 frecuencias de resonancia. Cuando la vibración externa es cercana a dichas frecuencias, el voladizo tendrá un mayor desplazamiento.

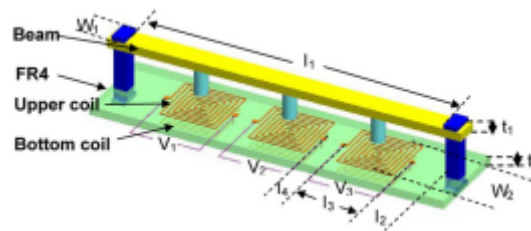


Figura 3.2.9: Dibujo esquemático del recolector presentado en [87].

Las frecuencias de resonancia de los 3 primeros modos de vibración son 369 Hz , 938 Hz y 1184 Hz , respectivamente. La potencia generada es $0.6\ \mu\text{W}$ y $3.2\ \mu\text{W}$ para los dos primeros modos. La eficiencia dentro del rango se aumenta, pero la potencia de salida todavía debe mejorarse, y el proceso de fabricación es complejo.

En 2008, Sari *et al.* diseñaron una matriz de 35 voladizos oscilantes, con frecuencias de resonancia diferentes[88]. El incremento de tamaño para cada voladizo es suficientemente pequeño como para que el dispositivo pueda cubrir un rango de frecuencias grande, con picos de potencia en frecuencias cercanas pero distintas. Se puede observar la estructura en la figura 3.2.10.

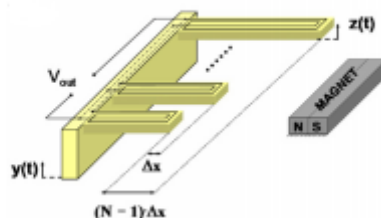


Figura 3.2.10: Dibujo esquemático del recolector presentado en [88].

El dispositivo puede generar una potencia de $0.4\ \mu\text{W}$ y voltaje de valor 10 mV en el rango de frecuencias $4.2 - 5\text{ kHz}$. El diseño tiene un volumen de 1.4 cm^3 . El recolector

utiliza una serie de voladizos con distintas longitudes, y por tanto distintas frecuencias de resonancia, aumentando así la banda de frecuencias aprovechables. Sin embargo, los procesos de fabricación pueden limitar el incremento mínimo entre los distintos elementos de la serie. Además, las frecuencias son elevadas comparadas con los otros generadores de la sección.

En 2010, Yang *et al.* diseñaron un recolector de energía no resonante [89]. Como se puede observar en la figura 3.2.11, un imán se mueve libremente en el interior de una serie de capas de bobina.

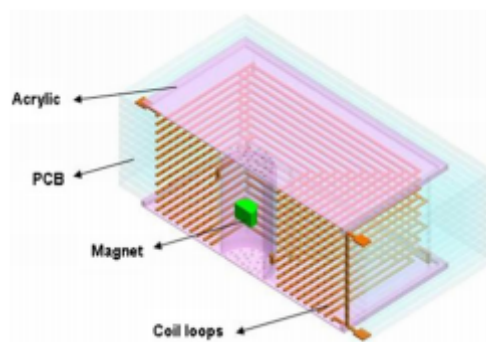


Figura 3.2.11: Sección transversal del recolector presentado en [89].

El dispositivo puede generar una potencia de $0.4 \mu W$ y un voltaje de $9 mV$ a partir de vibraciones ambientales en el rango de $40 - 80 Hz$. El volumen del recolector es $2.7 cm^3$. Al contrario que en el modelo básico de recolector electromagnético, no hay un muelle que una el imán a la estructura, haciendo efectivas todas las frecuencias en el rango de trabajo. Sin embargo, la potencia de salida todavía debe aumentar.

En 2014, Han *et al.* diseñaron un recolector cúbico para la recolección de energía vibratoria tridimensional [90]. En la figura 3.2.12 se puede observar la estructura del dispositivo, formado por una serie de bobinas planas que se doblan para formar un cubo, y un imán que se mueve libremente en el interior.

El dispositivo genera una potencia máxima de $0.75 \mu W$ y un voltaje de $3.28 mV$ cuando la frecuencia es $26.87 Hz$, pero la banda de frecuencias en la que el dispositivo funciona adecuadamente es $20 - 100 Hz$. Comparado con la estructura tradicional, la ventaja principal de este dispositivo es el ser capaz de transformar vibraciones en todas las direcciones. Si la vibración externa es irregular, la eficiencia de conversión del recolector es mayor que las de

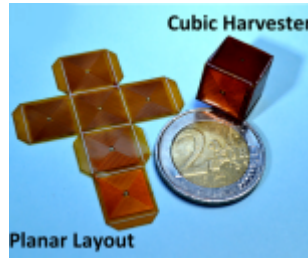


Figura 3.2.12: Estructura del recolector cúbico presentado en [90].

los generadores unidimensionales. No obstante, la potencia de salida es relativamente baja.

En 2015, Liu *et al.* presentaron un dispositivo integrado que estaba formado por 3 estructuras multimodales muelle-masa sobre un chip *MEMS* [91]. El recolector consta de 3 sistemas de vibración, como se puede ver en la figura 3.2.13. Los 3 primeros modos de vibración de cada recolector están alineados con las direcciones de los ejes.

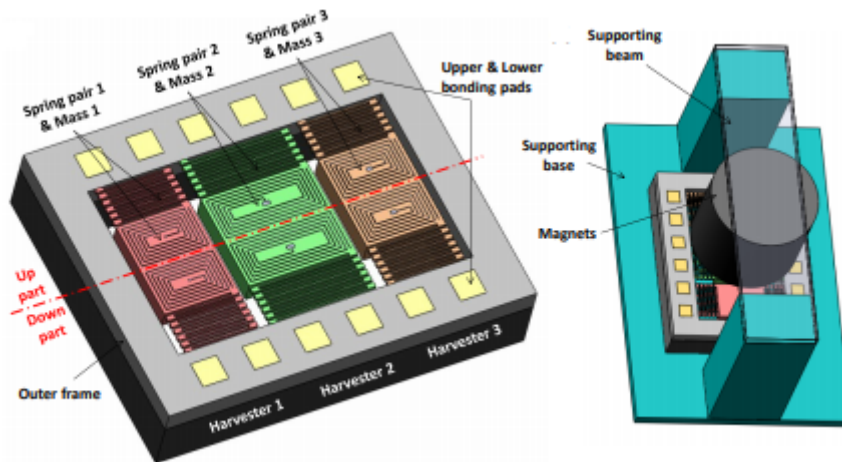


Figura 3.2.13: Recolector y microchip *MEMS* presentados en [91].

La potencia de salida varía entre 0.303×10^{-6} y $16.012 \times 10^{-6} \mu W$ y el voltaje entre 0.01 y 0.13 *mV*, para frecuencias entre 189 y 662 *Hz*. A pesar de que se aumenta el rango de frecuencias, el voltaje y potencia obtenidos son menores que los estudiados hasta el momento. El dispositivo tiene una densidad de potencia baja, ya que tiene demasiados modos de vibración, lo que hace aumentar su volumen.

En 2016, Tao *et al.* diseñaron y fabricaron un recolector multimodal con una estructura de 2 grados de libertad [92]. Dicha estructura está compuesta por un subsistema primario para la generación de potencia y un subsistema secundario para el ajuste de frecuencias. Una

representación esquemática del recolector se puede ver en la figura 3.2.14. Como se puede ver, una masa primaria está suspendida por los muelles interiores en forma de espiral para ajustar las frecuencias. Un imán está colocado en el centro de la estructura. Cuando aparece una vibración externa, la masa y la bobina vibran y se genera un voltaje en la bobina, mientras que el imán se mantiene fijo.

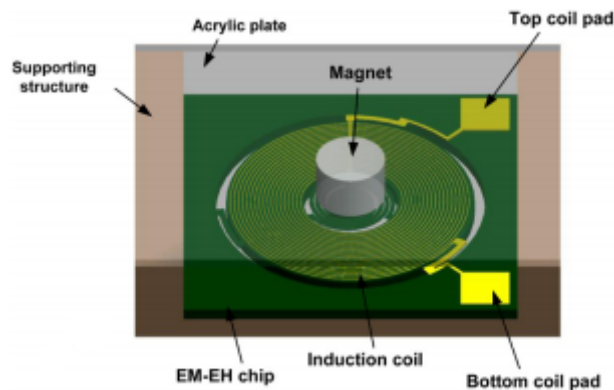


Figura 3.2.14: Estructura esquemática del dispositivo presentado en [92].

Este dispositivo puede generar una potencia máxima de $0.96nW$. Para vibraciones con frecuencias de 326 Hz y 391 Hz se obtienen 3.6 mV y 6.5 mV como voltaje de salida, respectivamente. El volumen del recolector son 0.29 cm^3 , y sus dimensiones $14.5\text{ mm} \times 14.5\text{ mm} \times 430\text{ }\mu\text{m}$. Para el desarrollo del recolector hacen falta tecnologías *MEMS* muy precisas, lo que limita su aplicación práctica.

En 2016, Roy *et al.* introdujeron dos diseños de recolectores con estructuras no lineales [93]. El primero es monoestable y el segundo biestable. Ambas estructuras se pueden ver en la figura 3.2.15.

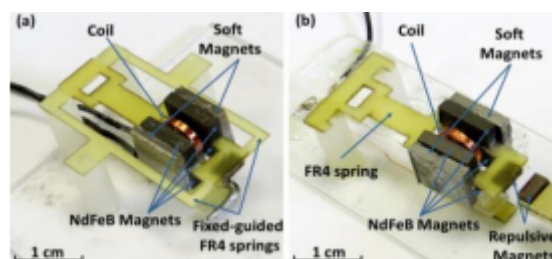


Figura 3.2.15: Recolectores introducidos en [93].

En el modelo monoestable se puede obtener una densidad de potencia de $184.2\text{ }\mu\text{W}/\text{cm}^3$ con una vibración de 55.4 Hz . En el recolector biestable se obtiene una densidad de potencia

de $52.8 \mu W/cm^3$ con vibraciones de $29.5 Hz$. Comparado con recolectores lineales, el rango de frecuencias se extiende de una manera efectiva.

Hemos introducido 7 modelos de recolectores de energía que aumentan el rango de vibraciones aprovechadas en la recolección. Dado que las vibraciones usualmente tienen frecuencias arbitrarias, es importante el estudio y diseño de dispositivos que trabajen con un rango amplio de frecuencias. Sin embargo, si los comparamos con los dispositivos estudiados en la sección anterior, la potencia y voltaje de salida son significativamente menores, y el diseño y producción de los dispositivos son más complejos.

En la siguiente tabla se presentan las principales características de los dispositivos estudiados en esta sección.

Referencia	Año	Frecuencia Hz	Volumen cm^3	Voltaje mV	Potencia μW	Dens. de Pot. $\mu W/cm^3$
Yang <i>et al.</i> [87]	2008	369, 938 y 1184	3.4	0.088 y 0.009	0.6 y 3.2	0.176 y 0.941
Sari <i>et al.</i> [88]	2008	4.2k - 5k	1.4	10	0.4	0.286
Yang <i>et al.</i> [89]	2010	40 - 80	2.7	9	0.4	0.148
Han <i>et al.</i> [90]	2014	20 - 100	1	3.82	0.75	0.75
Liu <i>et al.</i> [91]	2015	189 - 662	0.032	0.13	$16.012 * 10^{-6}$	$0.5 * 10^{-6}$
Tao <i>et al.</i> [92]	2016	326 y 391	0.29	3.6 y 6.5	$9.6 * 10^{-4}$	$3.3 * 10^{-3}$
Roy <i>et al.</i> [93]	2016	55.4 y 29.5	5.8		$1.07 * 10^3$ y $0.306 * 10^3$	184.2 y 52.8

Cuadro 3.2.2: Resumen de las características de los dispositivos estudiados en esta sección

3.2.3. Compatibilidad con sistemas *MEMS*

La estructura y geometría del recolector también juega un papel importante en el diseño de los dispositivos. En este apartado vamos a introducir una serie de ejemplos de dispositivos cuyo diseño tiene como objetivo su compatibilidad con los sistemas *MEMS*.

La fabricación del generador a partir de tecnologías *MEMS* ayuda a aumentar la compatibilidad del dispositivo con este tipo de sistemas. Tradicionalmente la estructura se fabricaba con técnicas micromecánicas con ensamblaje manual del imán. Esto lleva a limitaciones en la reducción de las dimensiones del mismo, y por tanto no sería compatible

con sistemas de menor escala. El siguiente paso que se dio fue el procesado del muelle, bobinas y estructuras con técnicas *MEMS*, con inserción manual del imán en el recolector. Este método puede ser un compromiso entre los métodos más tradicionales y el diseño completo del dispositivo con tecnologías *MEMS*, ya que la preparación de los imanes por las mismas es complejo. La inducción magnética de los imanes producidos de esta manera es baja.

En los últimos años, con el desarrollo de la galvanotecnia magnética, algunos estudios han intentado integrar imanes en el recolector utilizando procesos *MEMS*, lo que minimiza las dimensiones de la estructura y aumenta considerablemente su compatibilidad con sistemas microelectromecánicos.

En 2006, Pan *et al.* diseñaron un recolector micro-electromagnético [94] fabricado a partir de dos láminas de vidrio y dos láminas de silicio, como se puede ver en la figura 3.2.16. Sobre las láminas de silicio se colocan una bobina de cobre, en la que se induce una corriente por el movimiento de un imán permanente de *FePt*.

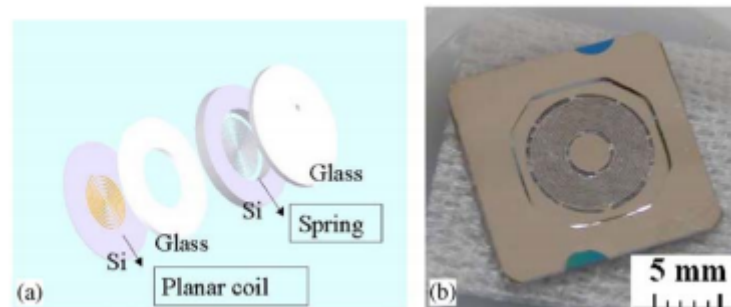


Figura 3.2.16: Diagrama del dispositivo (a) y recolector experimental (b) presentado en [94].

La potencia máxima generada por este dispositivo son $100 \mu W$ con voltaje $40 mV$ con frecuencia de vibración de $60 Hz$. El volumen total del dispositivo son $0.45 cm^3$. El recolector está elaborado completamente a partir de técnicas *MEMS*, y es compatible con sistemas *MEMS*, pero su procesamiento es complicado.

En 2009, Wang *et al.* diseñaron un recolector microelectromagnético con forma de sandwich [95]. Como se puede observar en la figura 3.2.17, el dispositivo consta de un muelle plano de cobre, un imán permanente y dos capas de bobinas de cobre. Tanto las bobinas como el muelle están fabricadas con técnicas *MEMS*.

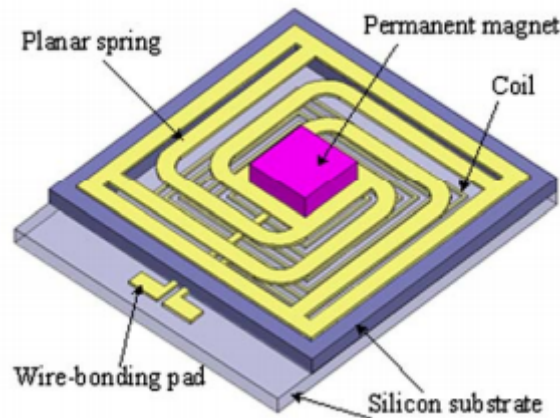


Figura 3.2.17: Estructura del recolector introducido en [95].

El prototipo puede generar un voltaje de 18 mV y potencia de $0.61\ \mu\text{W}$ con frecuencia de resonancia 55 Hz . El volumen total del dispositivo es de 0.13 cm^3 . El diseño planar reduce el volumen del recolector y mejora la compatibilidad con otros sistemas *MEMS*. Aún así, el montaje del imán requiere precisión alta y el voltaje y potencia de salida son bajos.

En 2013, Roundy *et al.* diseñaron un recolector planar utilizando un imán multipolar [38]. El dispositivo consta de una bobina de cobre impresa en una placa de circuito impreso y un imán multipolar, como podemos ver en la figura 3.2.18. Se pueden apilar varias placas de circuito impreso para conseguir un voltaje de salida mayor.

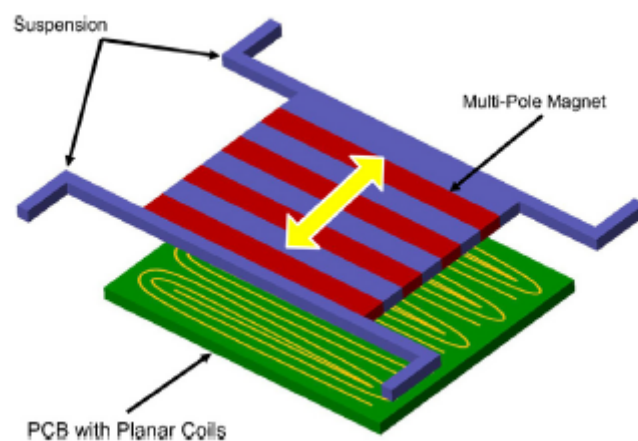


Figura 3.2.18: Diagrama del dispositivo utilizado en [38].

El dispositivo puede generar 1.1 mJ con frecuencia de resonancia de 260 Hz . Las dimensiones del mismo son $37\text{ mm} \times 37\text{ mm} \times 3\text{ mm}$. El voltaje máximo obtenido son 3 V ,

mucho mayor que el alcanzado con otros recolectores presentados en esta sección.

En 2014, Han *et al.* diseñaron el recolector representado en la figura 3.2.19 [96]. El imán está colocado sobre una placa oscilante, que está a su vez conectada a la base por el muelle. La bobina rodea la estructura oscilante.

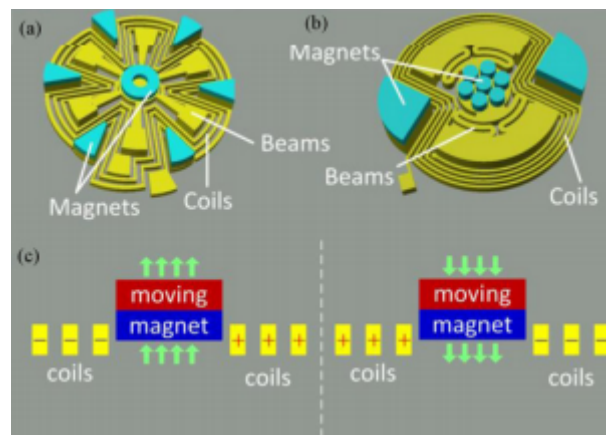


Figura 3.2.19: Principio operacional del recolector presentado en [96].

La potencia máxima de salida del dispositivo son $0.36nW$ y el voltaje máximo $7.5\mu V$ con una frecuencia de resonancia de $64Hz$. El volumen de este dispositivo es pequeño, tan solo $13.25mm^3$. Además, todo el proceso de fabricación del dispositivo es a través de tecnologías *MEMS*, al revés que la mayoría de los recolectores de este apartado, donde el ensamblado del imán es manual. Este hecho contribuye al escaso volumen del dispositivo. Además, es más fiable, compatible con sistemas microelectromecánicos y desaparece el problema de precisión del ensamblado. Sin embargo, todo esto no compensa los valores de salida de potencia y voltaje, que todavía necesitan ser mejorados.

En 2014, Han *et al.* diseñaron y fabricaron un recolector planar [97]. El dispositivo, representado en la figura 3.2.20, consta de una bobina fija, pilares de soporte, una placa de vibración y una cadena de imanes permanentes.

El dispositivo puede generar $0.98mV$ de voltaje y $11.2nW$ de potencia a frecuencias de $48Hz$. Su volumen son $67.5mm^3$. A pesar de que los valores de salida son menores que los vistos hasta ahora, la densidad de potencia es alta para las dimensiones del dispositivo, $0.16\mu W/cm^3$.

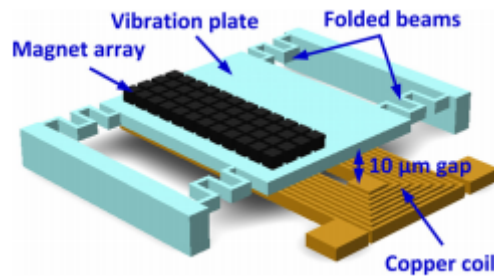


Figura 3.2.20: Diagrama del recolector presentado en [97]

Hemos visto 5 tipos de recolectores en esta sección. Están fabricados en su mayoría con tecnologías *MEMS*. La mayor dificultad para integrar estas técnicas es el ensamblaje del imán. El desarrollo de dispositivos con geometría planar evita las limitaciones de precisión durante la fabricación a la vez que reduce el volumen del dispositivo. Dispositivos con menores dimensiones tienen mayor densidad de potencia.

En la siguiente tabla se recogen las principales características de los dispositivos presentados en este capítulo.

Referencia	Año	Frecuencia <i>Hz</i>	Volumen <i>cm³</i>	Voltaje <i>mV</i>	Potencia <i>μW</i>	Dens. de Potencia <i>μW/cm³</i>
Pan <i>et al.</i>	2006	60	0.45	40	100	222.2
Wang <i>et al.</i>	2009	55	0.13	18	0.61	4.69
Roundy <i>et al.</i>	2013	260	4.11	3000		
Han <i>et al.</i>	2014	64	0.01325	$7.5 * 10^3$	$3.6 * 10^{-4}$	$2.72 * 10^{-2}$
Han <i>et al.</i>	2014	48	0.0675	0.98	$1.12 * 10^{-2}$	0.16

Cuadro 3.2.3: Resumen de las características de los dispositivos estudiados en esta sección

Capítulo 4

Análisis cuantitativo de un recolector de energía de vibraciones plano

Este capítulo va a discutir el diseño de un recolector de energía electromagnético optimizado para el caso de vibraciones contenidas en un plano.

4.1. Introducción

En los capítulos anteriores hemos explicado una serie de modelos de recolectores de energía a partir de vibraciones ambientales. El tercer capítulo se centraba especialmente en estudiar la compatibilidad de los distintos diseños con los sistemas *MEMS*. El objetivo de este capítulo es analizar un modelo particular, introducido por Roundy *et al.* en [38], basado en vibraciones planas, que fue diseñado con el fin de poder ser utilizado en sistemas microelectromecánicos. Estudiaremos sus características principales, posibles cambios en el modelo, y cómo afectarían éstos a la generación de energía eléctrica.

4.2. Principio operativo

Podemos observar un diagrama del generador en la figura 4.2.1. El dispositivo consta de tres partes: una placa de circuito en la que se imprime la bobina de cobre, una lámina magnética multipolar, y una serie de muelles que suspenden el imán sobre la bobina y mantienen una separación entre ellos. El generador sólo permite el movimiento de la lámina magnética en la dirección indicada en la figura.

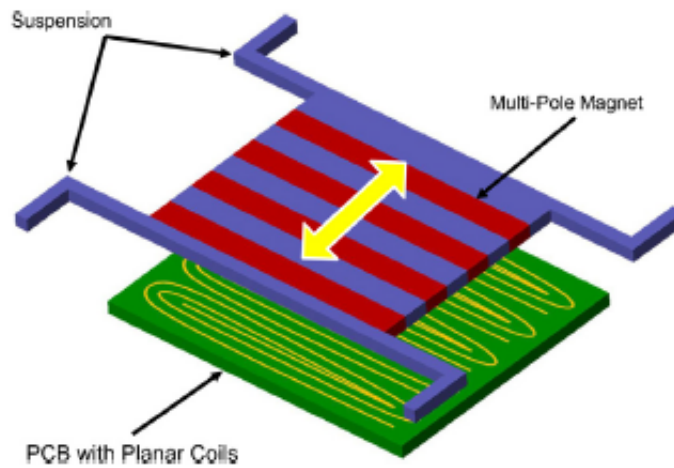


Figura 4.2.1: Diagrama del modelo de transductor electromagnético [38].

El circuito impreso utilizado se representa en la figura 4.2.2. Al tratarse de una lámina fina, podemos apilar varios circuitos en serie para conseguir un voltaje de salida mayor.

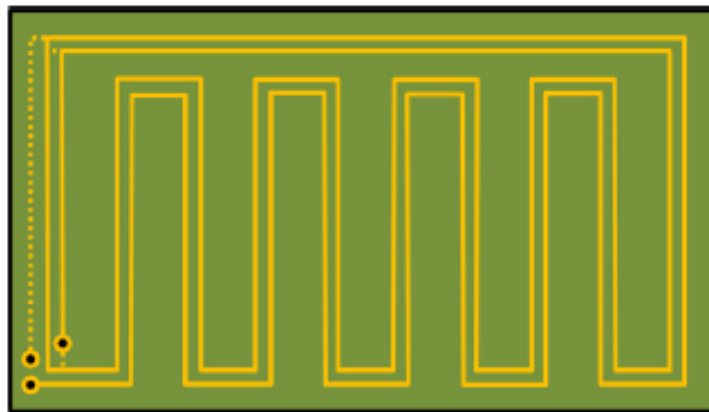


Figura 4.2.2: Representación del circuito impreso utilizado en el estudio. Las líneas discontinuas indican la presencia de cableado en la parte trasera de la pieza. [38]

La lámina magnética se puede observar en la figura 4.2.3. En la imagen se puede ver la estructura multipolar periódica del imán utilizado, que tiene la particularidad de que el sentido del campo magnético generado es perpendicular a la lámina y va alternando el signo cada 2 mm , dando lugar a una periodicidad de 4 mm . También se representa una foto del imán de NbFeB utilizado en [38].

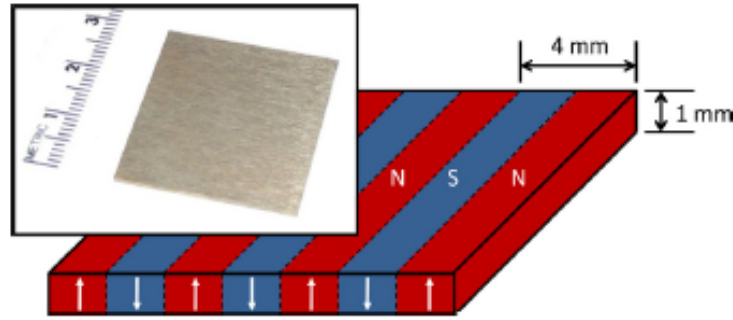


Figura 4.2.3: Representación de la placa magnética utilizada en el trabajo. Se indican las dimensiones y una foto de la placa utilizada en los prototipos experimentales [38].

La interacción entre la placa magnética con la bobina impresa se muestra en la figura 4.2.4. El flujo magnético que absorbe cada fracción de bobina es en la misma dirección, y por tanto el voltaje producido por cada parte del circuito está en fase y se puede sumar, siempre y cuando el periodo de la placa magnética coincidan con la periodicidad de las bobinas planas.

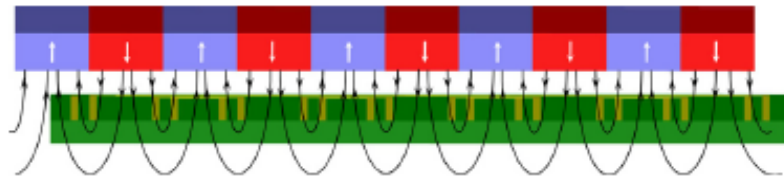


Figura 4.2.4: Interacción del flujo magnético con la bobina [38]

4.3. Modelo teórico

Al igual que el resto de recolectores electromagnéticos, la producción de voltaje de nuestro dispositivo se basa en la Ley de Faraday. Las ecuaciones que describen el modelo analítico son las siguientes:

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R + R_c}{L}i + \frac{1}{L}V_S \quad (4.3.1)$$

$$V_S = -\frac{d\Phi}{dt} = -N\frac{d}{dt}\left(\int \int \mathbf{B}d\mathbf{A}\right) \quad (4.3.2)$$

Donde

- i es la corriente que atraviesa el circuito

- R_C es la resistencia de la bobina
- R es la resistencia de carga
- L es la inductancia de la bobina
- V_S es el voltaje generado en el circuito
- Φ es el flujo magnético que atraviesa la bobina
- N es el número de vueltas de la bobina
- \mathbf{B} es la densidad de flujo magnético
- $d\mathbf{A}$ es el área circunscrita por la bobina

Supondremos que nuestro eje x es el de la dirección de oscilación, y es perpendicular a la superficie de la lámina y z está alineado con los polos de la placa magnética.

Además, vamos a suponer que en nuestro modelo el movimiento relativo entre los imanes y la bobina es sinusoidal.

Nos centraremos únicamente en el voltaje, corriente y potencia de salida del circuito. No conocemos las ecuaciones que modelan el campo magnético generado por un imán como el que estudiamos. Sin embargo, en una primera aproximación, podemos suponer que cada par N-S del imán se puede aproximar por dos dipolos magnéticos en sentidos opuestos.

El campo magnético \mathbf{B} producido por un dipolo es:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3\mathbf{r}(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})}{r^5} - \frac{\mathbf{m}}{r^3} \right]$$

Donde \mathbf{m} es el momento magnético del dipolo y \mathbf{r} la distancia al centro del mismo. En coordenadas esféricas,

$$B_r = \left(\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi} \right) \frac{2 \cos \theta}{r^3}$$

$$B_\theta = \left(\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi} \right) \frac{\sin \theta}{r^3}$$

$$B_\varphi = 0$$

El voltaje generado por el dispositivo depende de la variación de flujo magnético percibido por el circuito. Dicho flujo depende del producto de \mathbf{B} por el vector normal a la superficie

del circuito. Por tanto, sólo nos interesa la componente perpendicular a la superficie de la placa, es decir, la condición $\theta = 0$. En este caso, sólo estudiamos B_y , en la que sólo interfiere la componente radial del campo (el resto se anulan cuando $\theta = 0$), que es de la forma:

$$B_r(\theta = 0) = \left(\frac{\mu_0 \mathbf{m}}{4\pi}\right) \frac{2}{r^3} \quad (4.3.3)$$

Sobre la superficie de la placa magnética, dicho campo tendría la forma de una función escalón, que varía entre el valor máximo y mínimo del campo según la periodicidad del imán. No obstante, queremos estudiar el campo a una distancia $r > 0$ de la placa. Este campo ya no se rige por una función escalón, sino que se acerca a una función sinusoidal. En nuestro modelo, supondremos que la componente B_y de dicho campo es:

$$B_y(x) = B_{max} \sin\left(\frac{2\pi}{p}x\right)$$

Donde B_{max} es el valor máximo del campo a distancia y según la ecuación 4.3.3 y p es el periodo del imán. Dicha aproximación se estudia con mayor detalle en [38].

Podemos simplificar la ecuación del movimiento 4.3.2:

$$V_S = -\frac{d\Phi}{dt} = -Nl \left(\int_{x'_1}^{x'_2} B_y(x') dx' \right) \quad (4.3.4)$$

Supongamos que el imán oscila con un movimiento descrito por la ecuación $x(t)$ sobre el circuito impreso. Suponemos también que las líneas de cobre de la bobina están colocadas de manera que concuerde su periodo con el periodo del imán, y se encuentran en las posiciones d_1 y d_2 . Se representan estas variables en la figura 4.3.1.

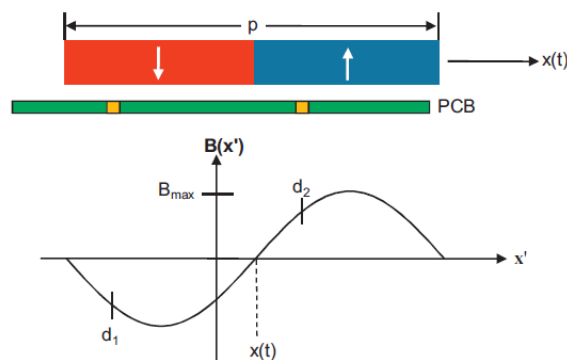


Figura 4.3.1: Definición gráfica de las variables utilizadas [38].

En este caso, el flujo magnético viene dado por:

$$\Phi = Nl \int_{d_1}^{d_2} B_y(x' - x(t)) dx'$$

Según como hemos definido las variables en la figura 4.3.1, podemos encontrar una ecuación para el flujo magnético Φ , de la forma:

$$\Phi = \frac{-NlB_{max}}{2\pi} \left\{ \left[\sin\left(\frac{2\pi d_2}{p}\right) - \sin\left(\frac{2\pi d_1}{p}\right) \right] \sin\left(\frac{2\pi}{p}x(t)\right) + \left[\cos\left(\frac{2\pi d_2}{p}\right) - \cos\left(\frac{2\pi d_1}{p}\right) \right] \cos\left(\frac{2\pi}{p}x(t)\right) \right\}$$

Y su derivada temporal:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -NlB_{max}p\dot{x} \left\{ \left[\sin\left(\frac{2\pi d_2}{p}\right) - \sin\left(\frac{2\pi d_1}{p}\right) \right] \cos\left(\frac{2\pi}{p}x(t)\right) - \left[\cos\left(\frac{2\pi d_2}{p}\right) - \cos\left(\frac{2\pi d_1}{p}\right) \right] \sin\left(\frac{2\pi}{p}x(t)\right) \right\} \quad (4.3.5)$$

Según la Ley de Faraday, podríamos encontrar el voltaje de salida directamente:

$$V_s = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Por otra parte, para conseguir la corriente de salida del generador, podemos utilizar la Ley de Ohm:

$$V = IR$$

Siendo R la resistencia de la bobina.

La potencia de salida del generador vendría dada por la siguiente ecuación:

$$P = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

4.4. Resultados

4.4.1. Dispositivo básico

Dado que no poseemos el dispositivo experimental, daremos una serie de valores para los parámetros. Las dimensiones del dispositivo suponemos que son iguales que las dimensiones del recolector estudiado en [38], $37\text{ mm} \times 37\text{ mm} \times 3\text{ mm}$.

Primero, vamos a suponer que en la superficie de la placa podemos obtener un campo magnético de 0.1 T . Suponemos que la lámina tiene 1 mm de alto. El periodo del imán son 4 mm . Con estas características, representamos el campo magnético a distancias distintas de la superficie del imán en la figura 4.4.1, calculado a partir de la aproximación dipolar descrita por la ecuación 4.3.3.

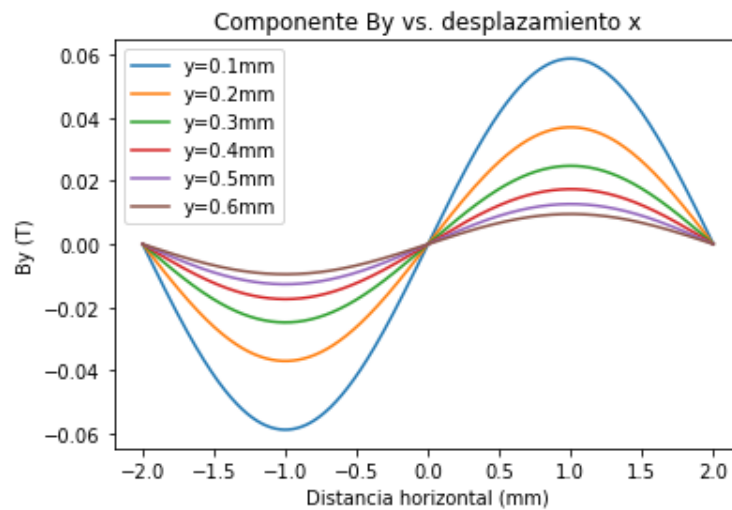


Figura 4.4.1: Valor de la componente B_y respecto a la distancia horizontal del centro del par N-S para distintos valores de y .

En cada placa de circuito impreso hay 5 bobinas en serie, cada una con 7 vueltas, por lo que $N = 35$. Dadas las dimensiones del generador, suponemos que la longitud de una línea de cobre son 33 mm . En [38], Roundy *et al.* utilizan circuitos estándar para disminuir el coste de producción del dispositivo. En este tipo de circuito impreso, las líneas de Cu tienen un ancho de 0.15 mm y un alto de 0.0375 mm . Dado que la resistividad del cobre vale $\rho = 1.56\text{ m}\Omega \times \text{cm}$ [98] a 273 K , podemos hallar la resistencia que ofrece cada placa de circuito impreso, $R = 3.2032\ \Omega$.

Vamos a ignorar el rozamiento, y supongamos que el imán oscila con una amplitud de

2 mm y frecuencia 1 kHz, con un movimiento sinusoidal. El voltaje producido en una placa de circuito colocada a 0.1 mm de la lámina magnética se representa en la figura 4.4.2. El voltaje máximo alcanzado son 0.27123 V, y la media cuadrática del mismo son 0.13267 V. En este caso, la corriente de salida son $I = 41.4191 \text{ mA}$ y la potencia 5.4952 mW.

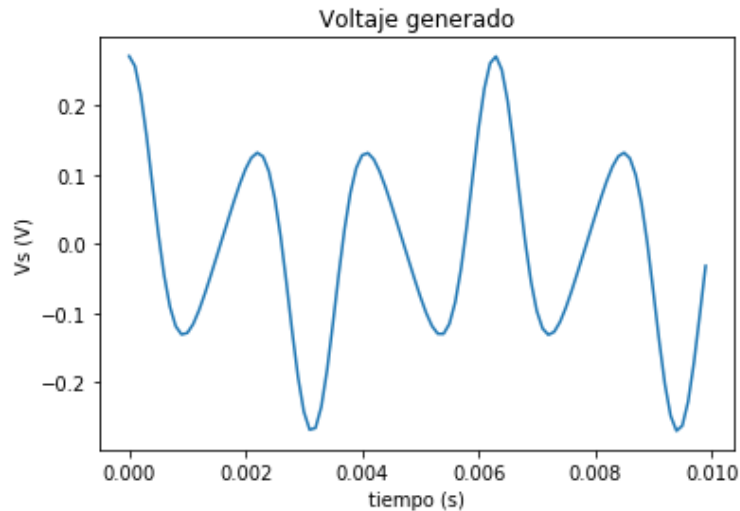


Figura 4.4.2: Voltaje generado en la bobina a 0.1 mm de la placa magnética.

Podemos colocar varias placas en serie, y el voltaje obtenido por el dispositivo sería la suma de los voltajes de cada placa. Si colocamos 6 placas de circuito impreso con distancias crecientes al imán podemos ver el voltaje generado en la figura 4.4.3. Como era de esperar, el voltaje disminuye a medida que aumenta la distancia.

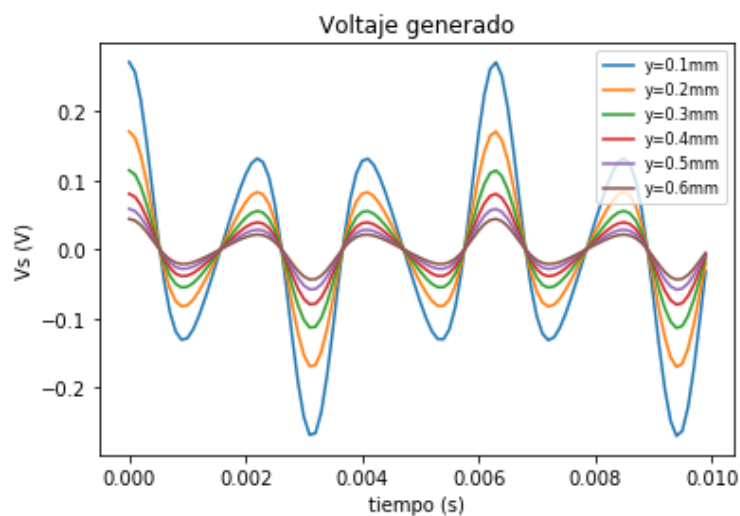


Figura 4.4.3: Voltajes generados a distintas distancias de la lámina magnética.

Al estar colocadas en serie, el voltaje generado se suma. El voltaje total de un dispositivo

que utiliza 6 placas de circuito impreso se representa en la figura 4.4.4. El voltaje máximo generado en el recolector son 0.73943 V . La media cuadrática del mismo alcanza un valor de 0.361694 V . La corriente generada en este circuito tiene un valor de 18.8194 mA y la potencia son 6.8068 mW .

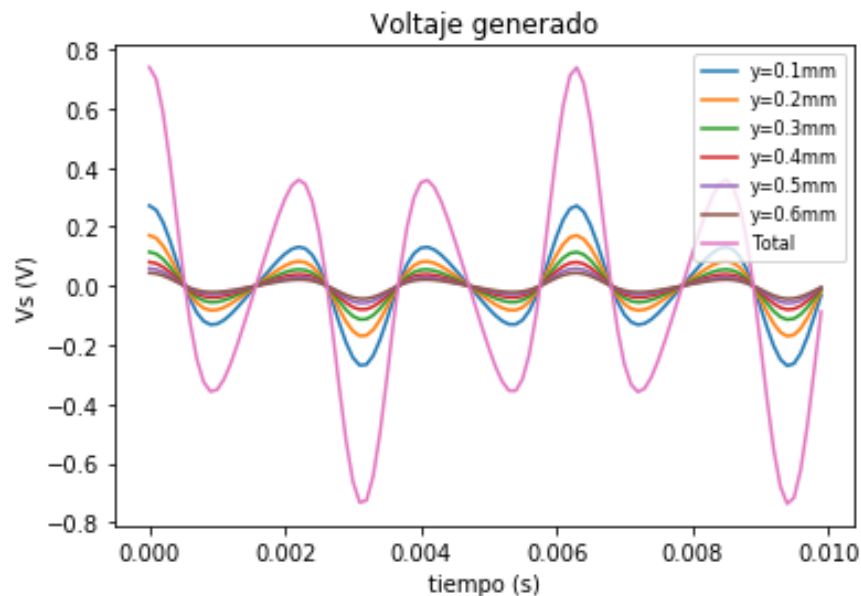


Figura 4.4.4: Voltaje total generado por un dispositivo que utiliza 6 bobinas y los voltajes generados por cada una de ellas.

Como podemos observar, el voltaje generado aumenta, ya que se suman los voltajes generados en cada una de las placas. Sin embargo, la intensidad de corriente disminuye y la potencia generada aumenta muy poco comparado con el voltaje. Esto se debe a que al aumentar el número de bobinas, también aumenta la resistencia del circuito.

La densidad de potencia generada en el modelo en el que solo se utiliza una placa es $1.2754 \cdot 10^{-3}\text{ mW/mm}^3$. Para el modelo con 6 placas en serie, aumenta su valor, aunque sólo ligeramente, obteniendo $1.5094 \cdot 10^{-3}\text{ mW/mm}^3$.

4.4.2. Efectos de reducción de escala

En este apartado vamos a disminuir las dimensiones del dispositivo un orden de magnitud, y estudiar cómo afecta esto a la salida del mismo. Estudiaremos los voltajes, potencia e intensidad producidos tras la reducción de la periodicidad de los imanes y las bobinas, la disminución la distancia entre el imán y las placas, y la reducción de todas las dimensiones espaciales del recolector.

Aunque esta reducción de escala puede entrañar dificultades de fabricación e incrementos del coste del dispositivo, en nuestro cálculo vamos a centrarnos en estimar los voltajes, corrientes y potencias de salida.

En primer lugar, vamos a suponer el caso ideal en el que todas las magnitudes espaciales disminuyen un orden de magnitud. Es decir, el tamaño del dispositivo pasaría a ser $3.7 \text{ mm} \times 3.7 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$. El espesor del dispositivo se mantiene similar al inicial ya que se utiliza el mismo material magnético. Reducimos también la periodicidad del imán a 0.4 mm y la separación entre las bobinas de 0.1 mm a $10 \mu\text{m}$, y la anchura y altura de las líneas de cobre que forman la bobina plana, de forma que miden $15 \mu\text{m}$ de ancho y $3.75 \mu\text{m}$ de alto. En este caso, el voltaje generado es menor al que obtuvimos en el primer apartado, en concreto, 23.0962 mV de voltaje máximo y 11.2976 mV para su media cuadrática. Representamos su valor en función del tiempo en la figura 4.4.5.

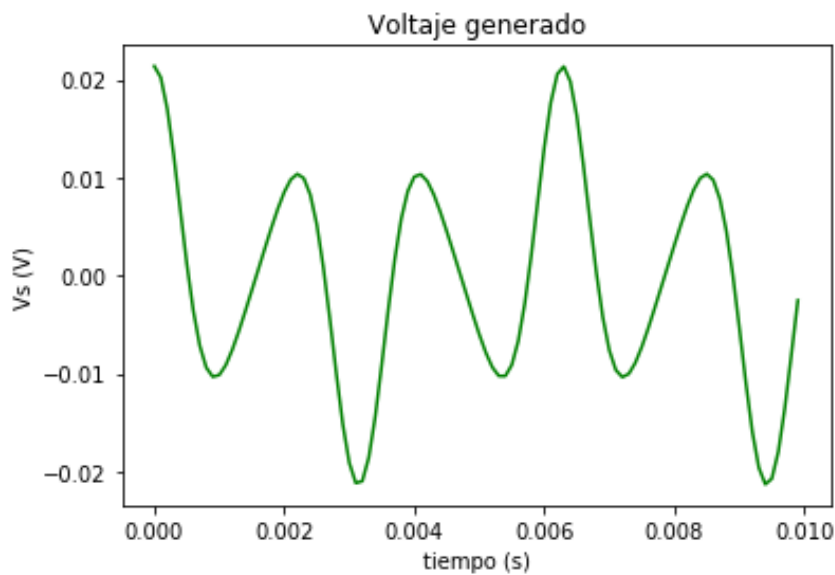


Figura 4.4.5: Voltaje total generado cuando disminuyen las dimensiones del generador.

Sin embargo, al disminuir las dimensiones de la bobina, aumenta significativamente su resistencia. La corriente generada en este caso son $58.783 \mu\text{A}$. La potencia que se genera son $6.6411 \cdot 10^{-5} \text{ mW}$. La densidad de potencia vale $3.7316 \cdot 10^{-5} \text{ mW/mm}^3$.

Supongamos ahora que queremos reducir la separación vertical entre las placas y la lámina magnética, manteniendo el resto de propiedades del recolector como se presentó en el estudio de Roundy *et al.* [38]. Estudiamos el caso en el que las bobinas están separadas $10 \mu\text{m}$. Debemos reducir la altura de las líneas de cobre, ya que si no las placas estarían en contacto.

Supongamos entonces que dicha altura es $3.75 \mu m$. El resto de parámetros de las pistas de cobre se mantienen.

Esta situación cambia la gráfica de la componente B_y para cada una de las placas, representada en 4.4.6.

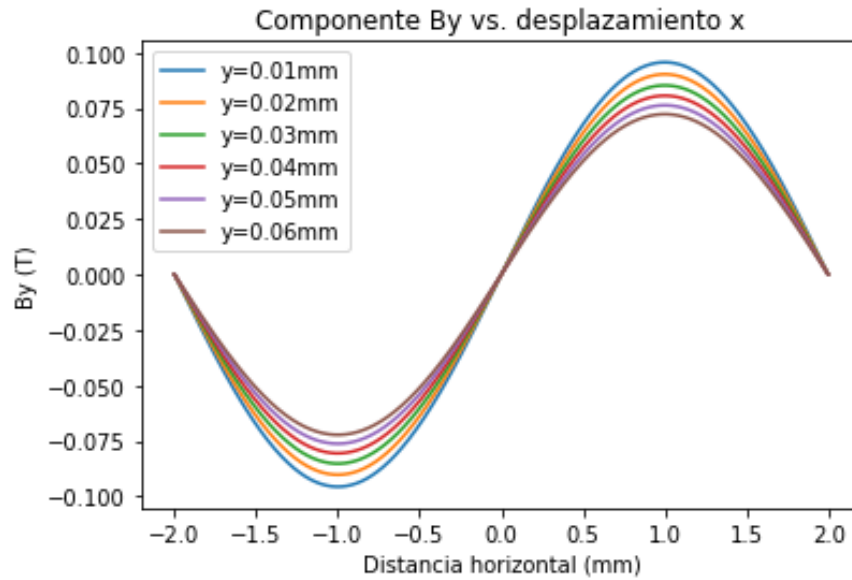


Figura 4.4.6: Valores de la componente B_y del campo magnético frente al desplazamiento horizontal para distancias pequeñas imán-bobina.

Representamos el voltaje generado por cada bobina en la figura 4.4.7.

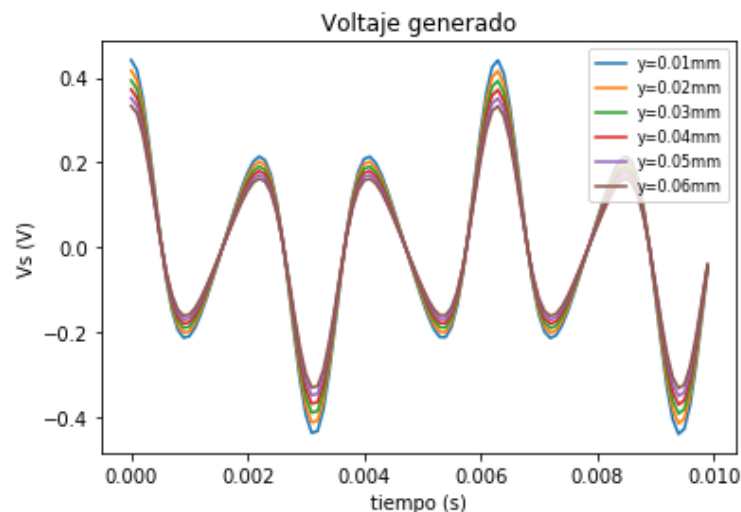


Figura 4.4.7: Voltaje recolectado por 6 bobinas planas a distancias entre 0.01 – 0.06 mm de la lámina magnética inicial

En la figura 4.4.8 podemos ver el voltaje total generado por el recolector cuando se disminuye la separación entre las placas. El voltaje máximo generado son 2.3097 V, con

media cuadrática $1.1298 V$. La intensidad de corriente son $5.8783 mA$ y la potencia generada $6.6411 mW$. La densidad de potencia son $3.7316 \cdot 10^{-3} mW/mm^3$. Este caso es de especial interés, ya que podemos aumentar significativamente el voltaje manteniendo las dimensiones del dispositivo experimental.

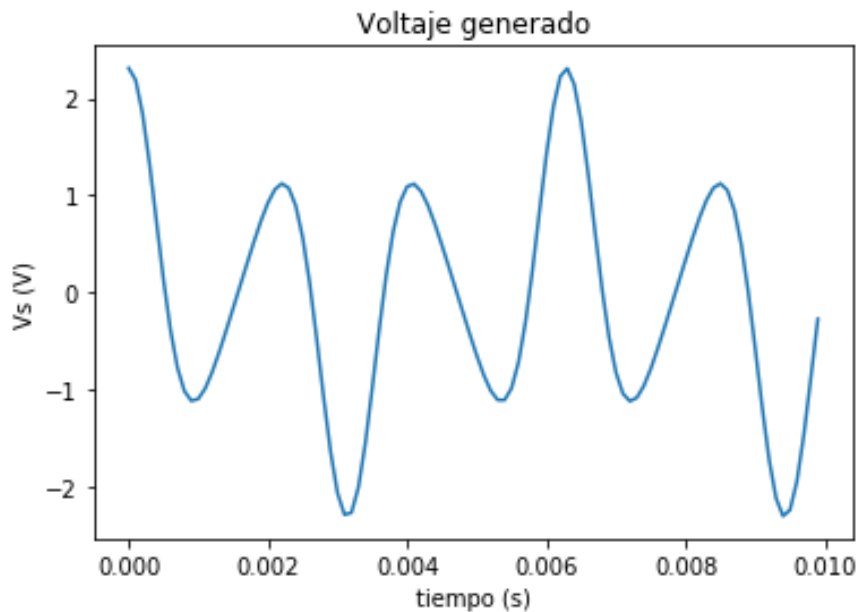


Figura 4.4.8: Voltaje generado con imán de espesor $1 mm$ y bobinas a $10 \mu m$

Vamos a intentar aprovechar las ventajas que nos proporciona este último caso pero intentando conseguir un dispositivo de menor tamaño. Esto se podría conseguir reduciendo la distancia entre las bobinas a $1 \mu m$ y reduciendo el periodo del imán a $0.4 mm$. También debemos disminuir la separación entre líneas de la bobina a $0.2 mm$, y la anchura de las mismas a $0.015 mm$. El tamaño del dispositivo serían $3.7 mm \times 3.7 mm \times 1.2 mm$.

Para que no se toquen entre sí, la altura de las líneas de cobre del circuito debe ser menor a una micra, supongamos $0.375 \mu m$. Este tipo de pistas se podría conseguir con técnicas avanzadas de litografía óptica. Esto podría suponer un aumento en el coste de producción del dispositivo, que no se tendrá en cuenta en este estudio pero puede resultar significativo a la hora de presentar un prototipo del mismo.

En la figura 4.4.9 podemos observar el voltaje generado por el recolector con estas condiciones. El valor máximo del mismo alcanza los $27.5407 mV$, con una media cuadrática de $13.4717 mV$. Dichos valores son ligeramente mayores que los obtenidos con el recolector del mismo tamaño del principio de esta sección.

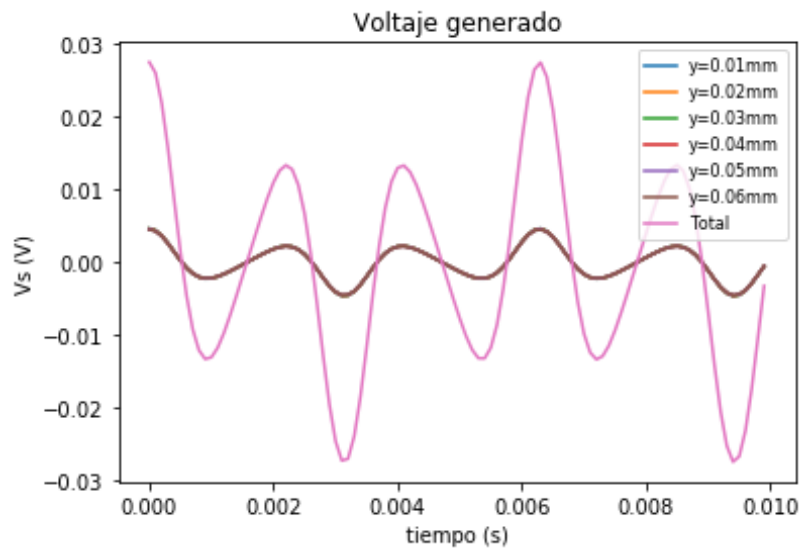


Figura 4.4.9: Voltaje total y voltajes generados por las distintas placas cuando se reducen las dimensiones del recolector y disminuye la separación entre las bobinas.

No obstante, a pesar de que los resultados para el voltaje sean buenos, la reducción en el tamaño de las pistas de cobre afecta gravemente a la intensidad y potencia de salida, ya que aumenta la resistencia del circuito. La intensidad de corriente alcanzada son $7.0094 \mu A$, y la potencia $9.4429 \cdot 10^{-2} \mu W$. La densidad de potencia son $5.3059 \cdot 10^{-2} \mu W/mm^3$.

Hemos visto una serie de casos en las que modificamos el espesor del dispositivo y sus correspondientes valores de salida. Veamos ahora qué ocurre si los parámetros que modificamos son los relativos al eje horizontal. Vamos a estudiar dos casos: el primero se centra en reducir las dimensiones del generador y el segundo en reducir la periodicidad del imán manteniendo el tamaño inicial.

En el primer caso vamos a reducir la longitud del recolector en las direcciones de los ejes x y z , obteniendo un prototipo prácticamente cúbico, de $3.7 mm \times 3.7 mm \times 3 mm$. Para ello vamos a suponer una periodicidad de $0.4 mm$ para la lámina magnética. Las líneas de la bobina tendrán una longitud de $3.3 mm$, una anchura de $15 \mu m$ y altura de $37.5 \mu m$. Si la anchura se mantuviese en $150 \mu m$, cabría el mismo número de vueltas de bobina en el circuito, pero serían demasiado grandes respecto al periodo del imán como para poder realizar la aproximación de la figura 4.3.1.

El campo magnético en función del desplazamiento horizontal en este caso se representa en 4.4.10.

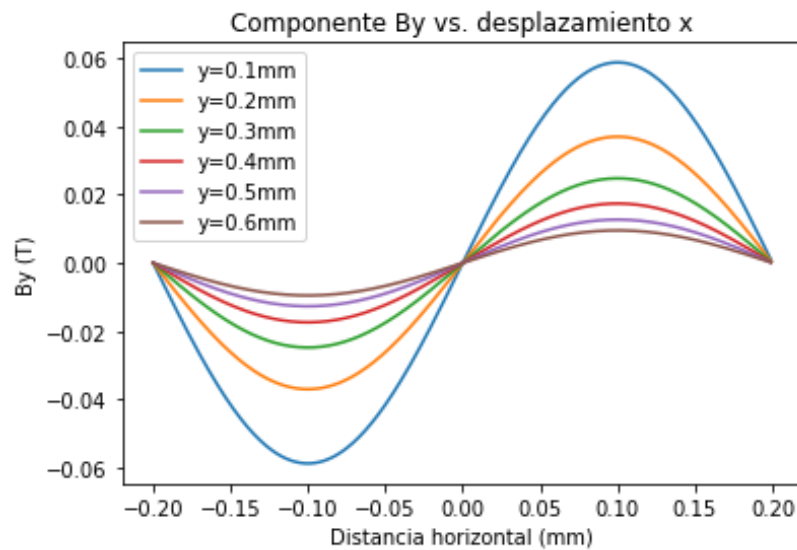


Figura 4.4.10: Componente B_y del campo magnético percibido por las bobinas cuando reducimos la periodicidad del imán.

En la figura 4.4.11 se puede ver el voltaje generado por cada bobina con estas modificaciones. El voltaje total máximo tiene un valor de 7.3943 mV y su media cuadrática vale 3.6169 mV . La intensidad de corriente tiene un valor de 0.1881 mA , y la potencia generada son $6.8068 \cdot 10^{-4} \text{ mW}$. Su densidad de potencia vale $1.6573 \cdot 10^{-5} \text{ mW/mm}^3$. Comparado con primer ejemplo de reducción de parámetros, los valores de la intensidad y potencia aumentan, y este modelo podría merecer un estudio más detallado. Sin embargo, se pierde la ventaja principal del diseño: el hecho de que el dispositivo sea plano. La forma cúbica dificulta su integración en sistemas *MEMS*.

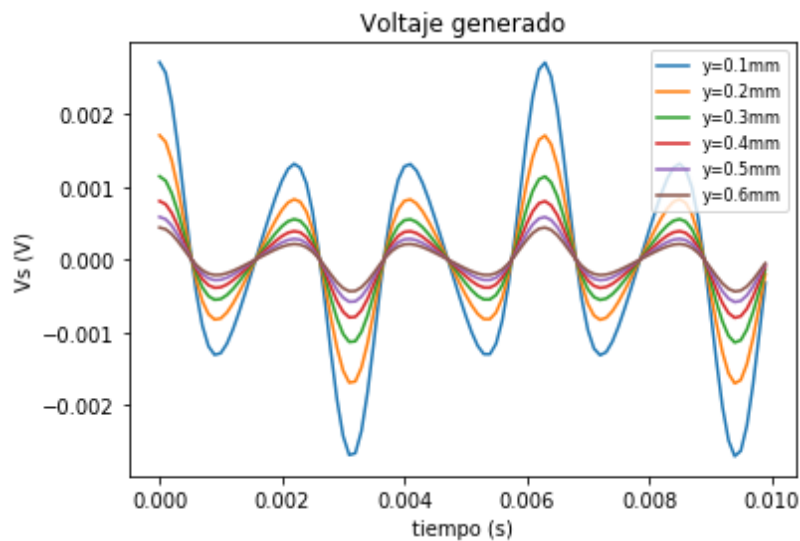


Figura 4.4.11: Voltaje generado por cada placa al cambiar la periodicidad del imán.

En el supuesto anterior, hemos utilizado un imán con periodicidad 0.4 mm . Si es posible su fabricación, podríamos realizar una modificación importante en el dispositivo inicial: mantener su tamaño inicial pero aumentar el número de vueltas de cada bobina. Para ello, debemos imprimir un mayor número de pistas de cobre, por lo que estas deben ser más finas. Digamos, por ejemplo, que cada línea tiene $15\ \mu\text{m}$ de ancho. Las líneas estarán separadas una distancia de 0.2 mm , para que concuerde con la periodicidad de la lámina magnética.

Cada placa de circuito impreso utilizada hasta ahora tenía 5 bobinas en serie con 7 vueltas cada una. Si disminuye el tamaño de las pistas de cobre en un orden de magnitud, podríamos encajar 70 vueltas de cobre por cada bobina. En la figura 4.4.12 representamos el voltaje obtenido en este caso.

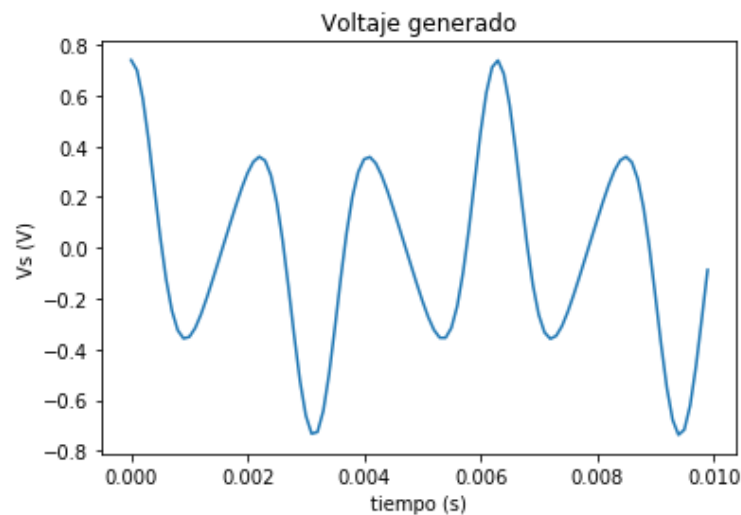


Figura 4.4.12: Voltaje total generado al aumentar el número de vueltas de la bobina y reducir la periodicidad de la lámina magnética.

El voltaje máximo generado por el dispositivo en este caso son 0.7394 V , con media cuadrática 0.3617 V . La intensidad de corriente es de 0.188 mA y la potencia $6.8068 \cdot 10^{-2}\text{ mW}$. La densidad de potencia son $1.6574 \cdot 10^{-5}\text{ mW/mm}^3$.

Resulta sorprendente que al aumentar el número de vueltas de cada bobina el voltaje disminuya. Esto se debe a que la expresión para el voltaje (4.3.4) es proporcional al número de vueltas N de la bobina, pero también lo es a la derivada temporal de la oscilación horizontal del imán. En nuestro estudio, dicha oscilación es de la forma $a_0 \sin(\omega t)$. Su derivada temporal, por tanto, será $a_0 \omega \cos(\omega t)$. Si suponemos que la amplitud a_0 del movimiento del imán disminuye al reducir la periodicidad de la lámina magnética, se compensan las variaciones en N y a_0 sobre el voltaje, según la ecuación 4.3.5. Además, la resistencia del circuito aumenta

significativamente al aumentar las líneas de cobre, por lo que la intensidad y potencia de salida del mismo disminuyen.

4.5. Conclusiones

En este capítulo hemos presentado un modelo particular para la recolección de energía electromagnética. Hemos estudiado el voltaje, la corriente y potencia generadas a partir de una primera aproximación de sus propiedades. Los valores de voltajes de salida obtenidos podrían alimentar dispositivos de baja potencia, y teniendo en cuenta la geometría del dispositivo, se podría integrar en dispositivos microelectromecánicos.

También hemos visto qué ocurre si disminuimos las dimensiones del generador. Los cálculos, dentro de las aproximaciones realizadas, indican que el voltaje, la corriente y la potencia de salida disminuyen, pero pueden ser integrados como fuentes de alimentación para sistemas de bajo consumo.

Capítulo 5

Conclusiones

A lo largo de esta memoria hemos analizado los dispositivos de recolección de energía a partir de vibraciones ambientales. Hemos presentado los tipos más habituales de recolección de energía, estudiando sus características básicas y sus posibles aplicaciones.

Hemos revisado las cuatro técnicas principales de obtención de energía vibracional: piezoeléctrica, electromagnética, electrostática y triboeléctrica. Hemos estudiado su funcionamiento y presentado una serie de ejemplos prácticos de cada una.

Hemos resumido la integración de recolectores en sistemas microelectromecánicos. Para ello contamos con la ayuda de una serie de modelos que aplican las técnicas de recolección estudiadas hasta el momento. Se han comparado los resultados obtenidos en cada caso.

Por último, hemos descrito en detalle un recolector electromagnético plano. Se ha hecho un análisis cuantitativo del mismo, analizando los efectos de escala, e introduciendo posibles modificaciones para la optimización de la potencia generada.

Bibliografía

- [1] Marisol Martín-González, Olga Caballero-Calero, and Pablo Díaz-Chao. Nanoengineering thermoelectrics for 21st century: Energy harvesting and other trends in the field. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24:288–305, 2013.
- [2] H B Radousky, H Liang. Energy harvesting: an integrated view of materials, devices and applications. 2012.
- [3] Paothep Pichanusakorn and Prabhakar Bandaru. Nanostructured thermoelectrics. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 67(2-4):19–63, 2010.
- [4] XF Zheng, CX Liu, YY Yan, and Q Wang. A review of thermoelectrics research—recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:486–503, 2014.
- [5] Nicholas S Hudak and Glenn G Amatucci. Small-scale energy harvesting through thermoelectric, vibration, and radiofrequency power conversion. *Journal of Applied Physics*, 103(10):5, 2008.
- [6] Xun Shi, Jiong Yang, James R Salvador, Miaofang Chi, Jung Y Cho, Hsin Wang, Shengqiang Bai, Jihui Yang, Wenqing Zhang, and Lidong Chen. Multiple-filled skutterudites: high thermoelectric figure of merit through separately optimizing electrical and thermal transports. *Journal of the American Chemical Society*, 133(20):7837–7846, 2011.
- [7] Sang H Choi, James R Elliott, Glen C King, and Peter T Lillehei. Wireless power technology for application-specific scenarios of high-altitude airships. In *Smart Structures and Materials 2006: Smart Electronics, MEMS, BioMEMS, and Nanotechnology*, volume 6172, page 61721D. International Society for Optics and Photonics, 2006.
- [8] G Jeffrey Snyder and Eric S Toberer. Complex thermoelectric materials. In *Materials for sustainable energy: a collection of peer-reviewed research and review articles from Nature Publishing Group*, pages 101–110. World Scientific, 2011.
- [9] Jian He, Yufei Liu, and Ryoji Funahashi. Oxide thermoelectrics: The challenges, progress, and outlook. *Journal of Materials Research*, 26(15):1762, 2011.
- [10] Ssennoga Twaha, Jie Zhu, Yuying Yan, and Bo Li. A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement. *Renewable and sustainable energy reviews*, 65:698–726, 2016.
- [11] Paks Nuklear Power Plant. The application of thermopile technology in high energy nuclear power plants. *EXPRES 2014*, page 23, 2014.

- [12] MA Karri, EF Thacher, and BT Helenbrook. Exhaust energy conversion by thermoelectric generator: Two case studies. *Energy Conversion and Management*, 52(3):1596–1611, 2011.
- [13] Reiyu Chein and Guanming Huang. Thermoelectric cooler application in electronic cooling. *Applied Thermal Engineering*, 24(14-15):2207–2217, 2004.
- [14] Sabah A Abdul-Wahab, Ali Elkamel, Ali M Al-Damkhi, A Is' haq, Hilal S Al-Rubai'ey, Abdulaziz K Al-Battashi, Ali R Al-Tamimi, Khamis H Al-Mamari, and Muhammad U Chutani. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renewable Energy*, 34(1):30–34, 2009.
- [15] YJ Dai, RZ Wang, and L Ni. Experimental investigation on a thermoelectric refrigerator driven by solar cells. *Renewable energy*, 28(6):949–959, 2003.
- [16] Limei Shen, Fu Xiao, Huanxin Chen, and Shengwei Wang. Investigation of a novel thermoelectric radiant air-conditioning system. *Energy and buildings*, 59:123–132, 2013.
- [17] SB Riffat and Guoquan Qiu. Comparative investigation of thermoelectric air-conditioners versus vapour compression and absorption air-conditioners. *Applied Thermal Engineering*, 24(14-15):1979–1993, 2004.
- [18] Radion Cherkez. Theoretical studies on the efficiency of air conditioner based on permeable thermoelectric converter. *Applied Thermal Engineering*, 38:7–13, 2012.
- [19] Mohamed Hamid Elsheikh, Dhafer Abdulameer Shnawah, Mohd Faizul Mohd Sabri, Suhana Binti Mohd Said, Masjuki Haji Hassan, Mohamed Bashir Ali Bashir, and Mahazani Mohamad. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance. *Renewable and sustainable energy reviews*, 30:337–355, 2014.
- [20] Daniel Allen, Robert Haugeto, Michael Kajor, and Mehdi Namazian. Small thermoelectric generators. In *Twenty-First International Conference on Thermoelectrics, 2002. Proceedings ICT'02.*, pages 424–426. IEEE, 2002.
- [21] Mohamed S El-Genk, Hamed H Saber, and Thierry Caillat. Efficient segmented thermoelectric unicouples for space power applications. *Energy Conversion and Management*, 44(11):1755–1772, 2003.
- [22] Mohamed S El-Genk, Hamed H Saber, Thierry Caillat, and Jeff Sakamoto. Tests results and performance comparisons of coated and un-coated skutterudite based segmented unicouples. *Energy Conversion and Management*, 47(2):174–200, 2006.
- [23] James Huang. Aerospace and aircraft thermoelectric applications. *Boeing Management Company*, 1, 2009.
- [24] Tarik Kousksou, Jean-Pierre Bédécarrats, Daniel Champier, Pascal Pignolet, and Christophe Brillet. Numerical study of thermoelectric power generation for an helicopter conical nozzle. *Journal of Power Sources*, 196(8):4026–4032, 2011.

- [25] Robert E Blankenship, David M Tiede, James Barber, Gary W Brudvig, Graham Fleming, Maria Ghirardi, MR Gunner, Wolfgang Junge, David M Kramer, Anastasios Melis, et al. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement. *science*, 332(6031):805–809, 2011.
- [26] Prashant V Kamat. Meeting the clean energy demand: nanostructure architectures for solar energy conversion. *The Journal of Physical Chemistry C*, 111(7):2834–2860, 2007.
- [27] Gilbert M Masters. *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons, 2013.
- [28] Hyun Suk Jung and Nam-Gyu Park. Perovskite solar cells: from materials to devices. *small*, 11(1):10–25, 2015.
- [29] Swarup Biswas and Hyeok Kim. Solar cells for indoor applications: Progress and development. *Polymers*, 12(6):1338, 2020.
- [30] Martin A Green, Anita Ho-Baillie, and Henry J Snaith. The emergence of perovskite solar cells. *Nature photonics*, 8(7):506–514, 2014.
- [31] Hui-Seon Kim, Ivan Mora-Sero, Victoria Gonzalez-Pedro, Francisco Fabregat-Santiago, Emilio J Juarez-Perez, Nam-Gyu Park, and Juan Bisquert. Mechanism of carrier accumulation in perovskite thin-absorber solar cells. *Nature communications*, 4(1):1–7, 2013.
- [32] Yue-Guang Deng and Jing Liu. Recent advances in direct solar thermal power generation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(5):052701, 2009.
- [33] Mark Z Jacobson. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security. *Energy & Environmental Science*, 2(2):148–173, 2009.
- [34] Peng Li, Lanlan Cai, Pengcheng Zhai, Xinfeng Tang, Qingjie Zhang, and M Niino. Design of a concentration solar thermoelectric generator. *Journal of electronic materials*, 39(9):1522–1530, 2010.
- [35] S Maneewan, J Hirunlabh, J Khedari, B Zeghmami, and S Teekasap. Heat gain reduction by means of thermoelectric roof solar collector. *Solar Energy*, 78(4):495–503, 2005.
- [36] S Maneewan, J Khedari, B Zeghmami, J Hirunlabh, and J Eakburanawat. Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector. *Renewable Energy*, 29(5):743–752, 2004.
- [37] NM Khattab and ET El Shenawy. Optimal operation of thermoelectric cooler driven by solar thermoelectric generator. *Energy Conversion and Management*, 47(4):407–426, 2006.
- [38] Shad Roundy and Eri Takahashi. A planar electromagnetic energy harvesting transducer using a multi-pole magnetic plate. *Sensors and Actuators A: Physical*, 195:98–104, 2013.
- [39] Chongfeng Wei and Xingjian Jing. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74:1–18, 2017.

- [40] Loreto Mateu and Francesc Moll. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics. In *VLSI Circuits and Systems II*, volume 5837, pages 359–373. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [41] Yushan Tan, Ying Dong, and Xiaohao Wang. Review of mems electromagnetic vibration energy harvester. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 26(1):1–16, 2016.
- [42] Arthur D Kuo. Harvesting energy by improving the economy of human walking. *Science*, 309(5741):1686–1687, 2005.
- [43] Longhan Xie and Mingjing Cai. Increased energy harvesting and reduced accelerative load for backpacks via frequency tuning. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 58:399–415, 2015.
- [44] James M Gilbert and Farooq Balouchi. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. *International Journal of automation and computing*, 5(4):334–347, 2008.
- [45] Nathan S Shenck and Joseph A Paradiso. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. *IEEE micro*, 21(3):30–42, 2001.
- [46] Jan Smilek and Zdenek Hadas. A study of kinetic energy harvesting for biomedical application in the head area. *Microsystem Technologies*, 22(7):1535–1547, 2016.
- [47] Sheng Wei, Hong Hu, and Siyuan He. Modeling and experimental investigation of an impact-driven piezoelectric energy harvester from human motion. *Smart Materials and Structures*, 22(10):105020, 2013.
- [48] Canan Dagdeviren, Byung Duk Yang, Yewang Su, Phat L Tran, Pauline Joe, Eric Anderson, Jing Xia, Vijay Doraiswamy, Behrooz Dehdashti, Xue Feng, et al. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(5):1927–1932, 2014.
- [49] Lei Zuo and Pei-Sheng Zhang. Energy harvesting, ride comfort, and road handling of regenerative vehicle suspensions. *Journal of Vibration and Acoustics*, 135(1), 2013.
- [50] G Gatti, MJ Brennan, MG Tehrani, and DJ Thompson. Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66:785–792, 2016.
- [51] CB Williams and Rob B Yates. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. In *Proceedings of the International Solid-State Sensors and Actuators Conference-TRANSDUCERS'95*, volume 1, pages 369–372. IEEE, 1995.
- [52] Shad Roundy, Eli S Leland, Jessy Baker, Eric Carleton, Elizabeth Reilly, Elaine Lai, Brian Otis, Jan M Rabaey, Paul K Wright, and V Sundararajan. Improving power output for vibration-based energy scavengers. *IEEE Pervasive computing*, 4(1):28–36, 2005.
- [53] Lin Dong, Andrew B Closson, Congran Jin, Ian Trase, Zi Chen, and John XJ Zhang. Vibration-energy-harvesting system: Transduction mechanisms, frequency tuning techniques, and biomechanical applications. *Advanced Materials Technologies*, 4(10):1900177, 2019.

- [54] G Gautschi. Piezoelectric sensorics: Force strain pressure acceleration and acoustic emission sensors materials and amplifiers. 2013.
- [55] Shad Roundy, Paul K Wright, and Jan Rabaey. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer communications*, 26(11):1131–1144, 2003.
- [56] F Lu, HP Lee, and SP Lim. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. *Smart materials and structures*, 13(1):57, 2003.
- [57] Noël Eduard Du Toit. *Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [58] Elie Lefeuvre, Adrien Badel, Claude Richard, and Daniel Guyomar. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10):865–876, 2005.
- [59] Shanshan Li, Andrea Crovetto, Zhuoteng Peng, Ai Zhang, Ole Hansen, Mingjiang Wang, Xinxin Li, and Fei Wang. Bi-resonant structure with piezoelectric pvdf films for energy harvesting from random vibration sources at low frequency. *Sensors and Actuators A: Physical*, 247:547–554, 2016.
- [60] Dung-An Wang and Hong-Hua Ko. Piezoelectric energy harvesting from flow-induced vibration. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(2):025019, 2010.
- [61] Jiangxin Zhao, Jin Yang, Zhiwei Lin, Nian Zhao, Jun Liu, Yumei Wen, and Ping Li. An arc-shaped piezoelectric generator for multi-directional wind energy harvesting. *Sensors and Actuators A: Physical*, 236:173–179, 2015.
- [62] Nathan Sharpes, Abdessattar Abdelkefi, and Shashank Priya. Two-dimensional concentrated-stress low-frequency piezoelectric vibration energy harvesters. *Applied Physics Letters*, 107(9):093901, 2015.
- [63] Kyoung Joon Kim, Francesco Cottone, Suresh Goyal, and Jeff Punch. Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications. *Bell Labs Technical Journal*, 15(2):7–29, 2010.
- [64] Shad Roundy, Paul Kenneth Wright, and Jan M Rabaey. Energy scavenging for wireless sensor networks. In *Norwell*, pages 45–47. Springer, 2003.
- [65] Dibin Zhu, Stephen Roberts, Michael J Tudor, and Stephen P Beeby. Design and experimental characterization of a tunable vibration-based electromagnetic micro-generator. *Sensors and Actuators A: Physical*, 158(2):284–293, 2010.
- [66] Anthony Marin, Scott Bressers, and Shashank Priya. Multiple cell configuration electromagnetic vibration energy harvester. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(29):295501, 2011.
- [67] Ahmed Haroun, Ichiro Yamada, et al. Study of electromagnetic vibration energy harvesting with free/impact motion for low frequency operation. *Journal of Sound and Vibration*, 349:389–402, 2015.

- [68] Qian Zhang and Eun Sok Kim. Microfabricated electromagnetic energy harvesters with magnet and coil arrays suspended by silicon springs. *IEEE Sensors Journal*, 16(3):634–641, 2015.
- [69] Shad Roundy, Paul K Wright, and Kristofer SJ Pister. Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. In *ASME international mechanical engineering congress and exposition*, volume 36428, pages 487–496, 2002.
- [70] Philippe Basset, Dimitri Galayko, A Mahmood Paracha, Frédéric Marty, Andrii Dudka, and Tarik Bourouina. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(11):115025, 2009.
- [71] Y Naruse, N Matsubara, K Mabuchi, M Izumi, and S Suzuki. Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(9):094002, 2009.
- [72] Daniel Hoffmann, Bernd Folkmer, and Yiannos Manoli. Fabrication, characterization and modelling of electrostatic micro-generators. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(9):094001, 2009.
- [73] Yulong Zhang, Tianyang Wang, Anxin Luo, Yushen Hu, Xinxin Li, and Fei Wang. Micro electrostatic energy harvester with both broad bandwidth and high normalized power density. *Applied energy*, 212:362–371, 2018.
- [74] Feng-Ru Fan, Zhong-Qun Tian, and Zhong Lin Wang. Flexible triboelectric generator. *Nano energy*, 1(2):328–334, 2012.
- [75] Zhong Lin Wang. Triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors—principles, problems and perspectives. *Faraday discussions*, 176:447–458, 2015.
- [76] Shengming Li, Wenbo Peng, Jie Wang, Long Lin, Yunlong Zi, Gong Zhang, and Zhong Lin Wang. All-elastomer-based triboelectric nanogenerator as a keyboard cover to harvest typing energy. *ACS nano*, 10(8):7973–7981, 2016.
- [77] Junwen Zhong, Qize Zhong, Fengru Fan, Yan Zhang, Sihong Wang, Bin Hu, Zhong Lin Wang, and Jun Zhou. Finger typing driven triboelectric nanogenerator and its use for instantaneously lighting up leds. *Nano Energy*, 2(4):491–497, 2013.
- [78] Wen Jiang, Hu Li, Zhuo Liu, Zhe Li, Jingjing Tian, Bojing Shi, Yang Zou, Han Ouyang, Chaochao Zhao, Luming Zhao, et al. Fully bioabsorbable natural-materials-based triboelectric nanogenerators. *Advanced Materials*, 30(32):1801895, 2018.
- [79] Christopher Shearwood and Rob B Yates. Development of an electromagnetic microgenerator. *Electronics Letters*, 33(22):1883–1884, 1997.
- [80] Wen J Li, Zhiyu Wen, PK Wong, Gordon MH Chan, and PHW Leong. A micromachined vibration-induced power generator for low power sensors of robotic systems. In *Proc. Of the World Automation Congress, Hawaii, USA*, 2000.
- [81] Steve P Beeby, RN Torah, MJ Tudor, P Glynne-Jones, T O’donnell, CR Saha, and S Roy. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and microengineering*, 17(7):1257, 2007.

- [82] Enrico Dallago, Marco Marchesi, and Giuseppe Venchi. Analytical model of a vibrating electromagnetic harvester considering nonlinear effects. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(8):1989–1997, 2010.
- [83] Ibrahim Sari, Tuna Balkan, and Haluk Klah. An electromagnetic micro power generator for low-frequency environmental vibrations based on the frequency upconversion technique. *Journal of Microelectromechanical systems*, 19(1):14–27, 2009.
- [84] Hasan Uluřan, Oğuz Yařar, zge Zorlu, and Haluk Klah. Optimized electromagnetic harvester with a non-magnetic inertial mass. *Procedia engineering*, 120:337–340, 2015.
- [85] S Palagummi and FG Yuan. An optimal design of a mono-stable vertical diamagnetic levitation based electromagnetic vibration energy harvester. *Journal of Sound and Vibration*, 342:330–345, 2015.
- [86] Jongho Seo, Jin-Su Kim, Un-Chang Jeong, Yong-Dae Kim, Young-Cheol Kim, Hanmin Lee, and Jae-Eung Oh. Optimization and performance improvement of an electromagnetic-type energy harvester with consideration of human walking vibration. *Journal of the Korean Physical Society*, 68(3):431–442, 2016.
- [87] Bin Yang, Chengkuo Lee, Wenfeng Xiang, Jin Xie, Johnny Han He, Rama Krishna Kotlanka, Siew Ping Low, and Hanhua Feng. Electromagnetic energy harvesting from vibrations of multiple frequencies. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(3):035001, 2009.
- [88] Ibrahim Sari, Tuna Balkan, and Haluk Klah. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations. *Sensors and Actuators A: Physical*, 145:405–413, 2008.
- [89] Bin Yang and Chengkuo Lee. Non-resonant electromagnetic wideband energy harvesting mechanism for low frequency vibrations. *Microsystem Technologies*, 16(6):961–966, 2010.
- [90] Mengdi Han, Wen Liu, Bo Meng, Xiao-Sheng Zhang, Xuming Sun, and Haixia Zhang. Springless cubic harvester for converting three dimensional vibration energy. In *2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pages 425–428. IEEE, 2014.
- [91] Huicong Liu, Tao Chen, Lining Sun, and Chengkuo Lee. An electromagnetic mems energy harvester array with multiple vibration modes. *Micromachines*, 6(8):984–992, 2015.
- [92] Kai Tao, Jin Wu, Lihua Tang, Xin Xia, Sun Woh Lye, Jianmin Miao, and Xiao Hu. A novel two-degree-of-freedom mems electromagnetic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 26(3):035020, 2016.
- [93] Saibal Roy, Pranay Podder, and Dhiman Mallick. Nonlinear energy harvesting using electromagnetic transduction for wide bandwidth. *IEEE Magnetism Letters*, 7:1–4, 2015.
- [94] CT Pan, YM Hwang, HL Hu, and HC Liu. Fabrication and analysis of a magnetic self-power microgenerator. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 304(1):e394–e396, 2006.

-
- [95] Peihong Wang, Katsuhiko Tanaka, Susumu Sugiyama, Xuhan Dai, Xiaolin Zhao, and Jingquan Liu. A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on mems technology. *Microsystem technologies*, 15(6):941–951, 2009.
- [96] Mengdi Han, Quan Yuan, Xuming Sun, and Haixia Zhang. Design and fabrication of integrated magnetic mems energy harvester for low frequency applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23(1):204–212, 2013.
- [97] Mengdi Han, Zhongliang Li, Xuming Sun, and Haixia Zhang. Analysis of an in-plane electromagnetic energy harvester with integrated magnet array. *Sensors and Actuators A: Physical*, 219:38–46, 2014.
- [98] Neil W Ashcroft, N David Mermin, et al. Solid state physics [by] neil w. ashcroft [and] n. david mermin., 1976.