



---

**Universidad de Valladolid**  
Facultad de Ciencias

# TRABAJO FIN DE GRADO

## GRADO EN FISICA

# Cosecha de Energía

## Energy Harvesting

Autor:  
Jesús García Ojero  
Tutor:  
José María Muñoz Muñoz

Valladolid, Julio de 2016



## RESUMEN

En este trabajo se analizarán los distintos métodos conocidos de extraer energía de fuentes tanto naturales como las producidas por el ser humano, entre las que se pueden distinguir las vibraciones mecánicas, gradientes de temperatura o las ondas electromagnéticas emitidas por aparatos electrónicos. Primero realizaremos una revisión bibliográfica de distintos métodos de obtención de energía a partir de vibraciones mecánicas, utilizando materiales piezoeléctricos y actuadores electromagnéticos; y a partir de gradientes de temperatura utilizando generadores termoeléctricos. Posteriormente, analizaremos brevemente la transmisión inalámbrica de energía y para finalizar propondremos un método para obtener energía a partir de las ondas electromagnéticas residuales emitidas por los aparatos electrónicos que usamos en nuestra vida cotidiana. Propondremos un modelo teórico para dar cuenta de las medidas experimentales realizadas.

## ABSTRACT

In this paper the various known methods of extracting energy from both natural and those caused by humans, among which can be distinguished mechanical vibrations, temperature gradients or electromagnetic waves emitted by electronic devices sources are analyzed. First we will make a literature review of various methods of obtaining energy from mechanical vibrations using piezoelectric materials and electromagnetic actuators; and from temperature gradients using thermoelectric generators. Then we briefly discuss the wireless transmission of energy and finally we propose a method of obtaining energy from waste electromagnetic waves emitted by electronic devices we use in our daily lives. We propose a theoretical model to account for the performed experimental measurements.

## Índice

<b>Lista de tablas</b> .....	5
<b>Lista de imágenes</b> .....	6
<b>1. Introducción</b> .....	8
<b>2. Objetivos</b> .....	9
<b>3. Vibraciones y actuadores</b> .....	10
3.1 Introducción teórica .....	10
3.2 Láminas piezoeléctricas.....	11
3.3 Actuadores electromagnéticos .....	16
<b>4. Termoeléctricos</b> .....	27
4.1 Introducción teórica .....	27
4.2 Principales aplicaciones.....	29
4.2.1 Aplicaciones terrestres.....	29
4.2.2 Aplicaciones espaciales .....	30
4.2.2.1 Generadores de aleaciones de Teluro .....	32
4.2.2.2 Generadores de aleaciones de SiGe.....	34
4.2.2.3 Misiones actuales en las que se utilizan NPS .....	35
4.2.2.4 Ventajas y desventajas de las NPS .....	36
4.2.3 Aplicaciones con pequeños gradientes de temperatura .....	36
4.2.3.1 Fuentes.....	37
4.2.3.2 Principales materiales utilizados.....	37
4.2.3.3 Aplicaciones.....	38
4.2.3.4 Conclusiones.....	40
<b>5. Campos electromagnéticos</b> .....	41
5.1 Carga inalámbrica de baterías.....	41
5.2 Ondas electromagnéticas residuales .....	43
5.3 Montaje y medidas experimentales.....	44
5.3.1 Oscilador Royer .....	44
5.3.2 Caracterización del núcleo ferromagnético .....	45
5.3.3 Medidas de la potencia disipada según el valor de R y del número de espiras.....	48
5.3.4 Modelo teórico del receptor .....	51
5.3.5 Justificación de la utilización del material ferromagnético.....	53
<b>6. Resumen y conclusiones</b> .....	55
<b>7. Bibliografía y referencias</b> .....	57

## Lista de tablas

**Tabla 1** Tabla con los generadores RTG utilizados en las misiones espaciales de Estados Unidos

**Tabla 2** Aplicaciones termoeléctricas en diferentes áreas

**Tabla 3** Valores de L y RI en función de la frecuencia para el bobinado con y sin núcleo

**Tabla 4** Valores la potencia disipada en una resistencia de 1 k $\Omega$  en función de la distancia para el bobinado con y sin núcleo

## Lista de imágenes

**Imagen 1** Efecto Piezoeléctrico directo

**Imagen 2** Efecto Piezoeléctrico indirecto

**Imagen 3** Esquema del circuito de carga de la batería

**Imagen 4** Esquema del circuito utilizado para cargar el condensador

**Imagen 5** Gráfica del voltaje del condensador frente al tiempo

**Imagen 6** Gráfica de la variación de la carga de la batería para una excitación resonante

**Imagen 7** Gráfica de la variación de la carga de la batería para una excitación arbitraria

**Imagen 8** Montaje experimental que simula la cola de un pez

**Imagen 9** Potencia extraída en función del espesor (a) cuadrada (b) circular

**Imagen 10** Configuración típica del amortiguador EM

**Imagen 11** Modelo circuital del amortiguador EM

**Imagen 12** Flujo de energía en una estructura con un sistema EMDEH

**Imagen 13** Circuito conectado a una resistencia constante

**Imagen 14** Variación del parámetro  $C_{em}$  en función de la resistencia de carga

**Imagen 15** Variación de la potencia extraída en función de la resistencia de carga

**Imagen 16** Variación de la eficiencia en función de la resistencia de carga

**Imagen 17** Circuito con rectificador y supercondensador

**Imagen 18** Circuito con rectificador y batería recargable

**Imagen 19** Variación del voltaje del supercondensador en función del tiempo Curva I: interruptor abierto, Curva II:  $R_{load} = 15 \Omega$

**Imagen 20** Variación de la potencia extraída en función del tiempo Curva I: interruptor abierto, Curva II:  $R_{load} = 15 \Omega$

**Imagen 21** Variación de la eficiencia en función del tiempo Curva I: interruptor abierto, Curva II:  $R_{load} = 15 \Omega$

**Imagen 22** Variación del parámetro  $C_{em}$  en función del tiempo Curva I: interruptor abierto, Curva II:  $R_{load} = 15 \Omega$

**Imagen 23** Variación del voltaje en la batería en función del tiempo

**Imagen 24** Variación de la potencia extraída en función del tiempo

**Imagen 25** Variación de la eficiencia en función del tiempo

**Imagen 26** Variación del parámetro  $C_{em}$  en función del tiempo

**Imagen 27** Esquema de las aceleraciones y fuerzas presentes cuando una persona camina

**Imagen 28** Esquema de la pila de imanes utilizada, con los separadores en gris.

**Imagen 29** Simulación del flujo magnético en los espacios entre los imanes

**Imagen 30** a) pila de imanes utilizados en el prototipo, b) conjunto de bobinas con el canal de plástico, c) Prototipo colocado en el lateral de la deportiva utilizada en las medidas

**Imagen 31** Variación de la potencia extraída en función de la velocidad

**Imagen 32** Comparación de la potencia extraída entre la simulación y la medida experimental para el corredor DH

**Imagen 33** Comparación de la potencia extraída entre la simulación y la medida experimental para el corredor KY

**Imagen 34** Marcapasos nuclear Medtronic Model 9000

**Imagen 35** Esquema del SNAP-3B RTG

**Imagen 36** Esquema del SNAP-27 RTG

**Imagen 37** Esquema del Viking/SNAP-19 RTG

**Imagen 38** Esquema del reactor SNAP-10A

**Imagen 39** Esquema del ciclo termodinámico del SNAP-10A

**Imagen 40** Esquema del MMRTG

**Imagen 41** Eficiencia de conversión en función de la temperatura del lado caliente y del valor de la figura de mérito  $Z$ , ( $T_{cool} = 300K$ )

**Imagen 42** Variación de la figura de mérito  $Z$  en función de la temperatura para varios materiales termoeléctricos

**Imagen 43** Potencia recuperada en una planta de fabricación de acero

**Imagen 44** Configuración convencional de las bobinas resonantes

**Imagen 45** Configuración asimétrica propuesta de las bobinas resonantes

**Imagen 46** Variación de la eficiencia frente a la frecuencia para varios valores del coeficiente de acoplamiento  $k$

**Imagen 47** Montaje experimental de la configuración asimétrica propuesta

**Imagen 48** Variación de la eficiencia total en función de la configuración de las espiras

**Imagen 49** Esquema circuital del oscilador Royer utilizado como emisor de campo

**Imagen 50** Montaje experimental del oscilador Royer

**Imagen 51** Montaje experimental utilizado para las medidas de la potencia disipada

**Imagen 52** Esquema circuital del modelo teórico para el núcleo sin pérdidas

**Imagen 53** Esquema circuital del modelo teórico para el núcleo con pérdidas

## 1. Introducción

En los últimos años, la miniaturización de los aparatos electrónicos ha provocado que el consumo de sensores, sistemas de adquisición de datos y otros tipos de aparatos electrónicos han reducido su consumo. Además, la localización de estos sensores en lugares hostiles o de difícil acceso provoca que su alimentación, mantenimiento y otros trabajos necesarios sean difíciles de llevar a cabo.

Debido a estas dos razones, se ha empezado a prestar mayor interés en el tema del “energy harvesting”, que consiste en la extracción de energía a partir de distintas fuentes naturales o no. En las fuentes naturales podemos distinguir entre las vibraciones mecánicas debido a procesos sísmicos, el viento o los distintos tipos de movimiento del agua en mares y ríos; y gradientes de temperatura localizados en mares, zonas volcánicas activas o debido a la radiación solar. Entre las fuentes no naturales, es decir, las provocadas por el hombre, se distinguen los gradientes de temperatura debido a procesos industriales, quema de biomasa en hornos y a los motores de los vehículos, las vibraciones mecánicas debido a distintos aparatos,...

Según el tipo de fuente que se quiera aprovechar se utilizarán unos métodos u otros. En el caso de vibraciones mecánicas se utilizan materiales piezoeléctricos, debido a su gran sensibilidad a las vibraciones, y la inducción electromagnética, debido al movimiento oscilatorio de los imanes al ser excitados por las vibraciones mecánicas. En el caso de gradientes de temperatura se utilizan generadores termoelectrónicos, ya sean alimentados por fuentes radioisotópicas o el calor desprendido en procesos industriales u hornos. Para aprovechar las ondas electromagnéticas residuales se utilizará la inducción generada en una bobina y amplificado por el efecto resonante de un circuito LC. Debido a que la intensidad de estas ondas electromagnéticas residuales es muy baja, del orden de  $\mu\text{T}$ , se utilizará un núcleo de material ferromagnético para amplificar el flujo en la superficie de las espiras.

En artículos como [18] recopilan y analizan los trabajos de investigación llevados a cabo durante un unos años sobre “energy harvesting” y métodos específicos de obtener energía del medio ambiente en distintas áreas.



## 2. Objetivos

Entre los objetivos de este trabajo se encuentran realizar una revisión bibliográfica de proyectos sobre “energy harvesting” que utilicen materiales piezoeléctricos, termoeléctricos o actuadores electromagnéticos, que se puedan aplicar en la vida cotidiana de las personas para alimentar sensores u otro tipo de dispositivos, en las distintas áreas de las industrias para recuperar energía de los procesos industriales realizados o en otros ámbitos de interés como la industria aeroespacial; una breve revisión bibliográfica para analizar el proceso de transmisión de energía de forma inalámbrica; y proponer un método por el cual se pueda obtener energía de las ondas electromagnéticas residuales emitidas por aparatos electrónicos que utilizamos en nuestra vida diaria.

### 3. Vibraciones y actuadores

En este primer apartado nos centraremos en analizar los posibles métodos de obtención de energía utilizando las vibraciones mecánicas. Para ello, primero introduciremos los materiales piezoeléctricos y analizaremos varios proyectos de obtención de energía utilizando estos materiales. Posteriormente, analizaremos los posibles métodos de obtención de energía utilizando actuadores electromagnéticos. Al igual que antes, se analizarán varios proyectos en los que se utilizan actuadores electromagnéticos y, finalmente, compararemos ambas formas de obtención de energía.

#### 3.1 Introducción teórica

El **efecto piezoeléctrico** es una propiedad que existe en muchos materiales. El nombre consta de dos partes; *Piezo*, derivado de la palabra en griego presión y *electric*, de electricidad. Por lo tanto, la traducción es efecto de presión-electricidad.

##### **Definición de efecto piezoeléctrico:**

“Aparición de un potencial eléctrico entre ciertas caras de un cristal cuando éste es sometido a presión mecánica. Inversamente, cuando se aplica un campo eléctrico en ciertas caras del cristal, éste experimenta una distorsión mecánica”. El efecto se desarrolla por el desplazamiento de iones en cristales que tienen una celda asimétrica (el más simple poliedro que hace posible la estructura de cristal).

Cuando el cristal se comprime los iones de cada celda se desplazan causando la polarización eléctrica de la celdilla unidad. Debido a la regularidad de la estructura cristalina, estos efectos se acumulan causando la aparición de una diferencia de potencial eléctrico entre ciertas caras del cristal. Cuando un campo eléctrico externo se aplica al cristal, los iones en cada celda se desplazan por las fuerzas electroestáticas, dando por resultado la deformación mecánica del cristal entero.

Debido a su capacidad para convertir la deformación mecánica en tensiones eléctricas y las tensiones eléctricas en movimiento mecánico, los cristales piezoeléctricos se utilizan en dispositivos tales como transductores, micrófonos, etc. Los cristales piezoeléctricos también se utilizan como resonadores en osciladores electrónicos y amplificadores de alta frecuencia.

Los materiales que presentan el fenómeno de la piezoelectricidad se distribuyen en los siguientes grupos: monocristales, entre los que destacan el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), el tantalato de litio ( $\text{TaO}_3\text{Li}$ ) y el niobato de litio ( $\text{NbO}_3\text{Li}$ ); y las cerámicas, entre las que destacan el titanato de bario ( $\text{TiO}_3\text{Ba}$ ), las cerámicas PZT ( $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ) y las cerámicas PBN ( $(\text{Pb}_{0.6}\text{Ba}_{0.4})\text{Nb}_2\text{O}_6$ ).

Se conocen dos tipos de efectos piezoeléctricos: el **efecto piezoeléctrico directo** y el **efecto piezoeléctrico indirecto**.

Con el **efecto piezoeléctrico directo** una fuerza o vibración mecánica en el elemento piezoeléctrico genera una carga o voltaje entre sus terminales.

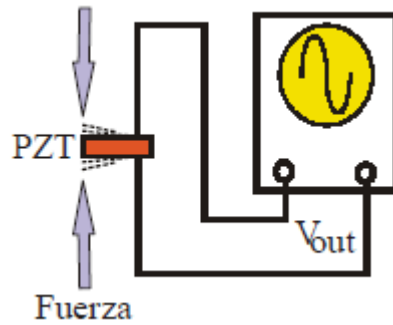


Imagen 1

La polaridad de esta carga depende de la orientación del esfuerzo comparado con la dirección de polarización en el elemento piezoeléctrico.

El **efecto piezoeléctrico indirecto** como su nombre lo indica, es lo contrario del efecto piezoeléctrico directo, aplicando un campo eléctrico o voltaje al elemento piezoeléctrico se produce un cambio dimensional o deformación.

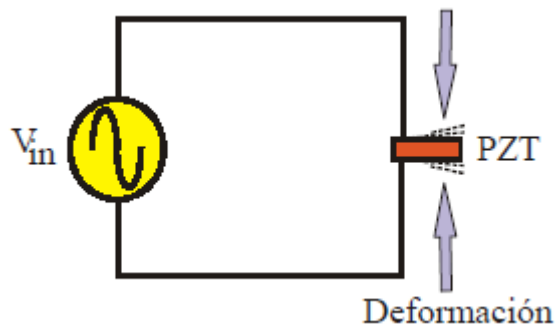


Imagen 2

La dirección del cambio es igualmente dependiente de la dirección de polarización. Aplicando un campo en la misma polaridad del elemento resulta en un incremento dimensional, y un campo de polaridad opuesta resulta en un decremento. El incremento en una dimensión de la estructura resulta o produce un decremento en las otras dos debido al aplazamiento de *Poisson*.

### 3.2 Láminas piezoeléctricas

Después de realizar una breve introducción a los materiales piezoeléctricos, nos centraremos en la obtención de energía utilizando la energía procedente de las vibraciones mecánicas presentes en la naturaleza (vibraciones mecánicas del agua), vibraciones en estructuras como puentes y edificios residenciales, vibraciones en aparatos construidos por el ser humano,.... Para ello, analizaremos los dos métodos de conversión de energía mecánica en energía eléctrica más destacados: la utilización de materiales piezoeléctricos y la utilización de la inducción magnética.

En este apartado nos centraremos en el estudio de la conversión de energía mecánica utilizando materiales piezoeléctricos. Los materiales más utilizados en este método son las cerámicas PZT debido a la facilidad de mecanizado, es decir, a que se pueden producir en

distintas geometrías y dimensiones fácilmente, a pesar de que la constante de acoplamiento  $k$  (relación entre la energía mecánica convertida en eléctrica y la energía mecánica suministrada) no es la más alta entre los materiales piezoeléctricos. Los valores típicos de la constante de acoplamiento son del orden de 0.6, es decir, el 60% de la energía suministrada se convierte en energía eléctrica. También tienen una gran sensibilidad y una rápida respuesta frente a excitaciones externas.

Las principales aplicaciones de los materiales piezoeléctricos son la generación de voltaje, utilizando el efecto piezoeléctrico directo; actuadores, utilizando el efecto piezoeléctrico inverso; transformadores piezoeléctricos; filtros de frecuencias; y generadores de sonidos y ultrasonidos.

En el ámbito de la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, los materiales piezoeléctricos se utilizan en las situaciones en las que la amplitud de la excitación externa es pequeña debido a la fragilidad de estos materiales. Normalmente, se suele unir una lámina piezoeléctrica junto con una lámina de un material metálico para disminuir el desgaste del material piezoeléctrico. En la mayoría de las situaciones, la potencia máxima extraída es del orden de mW. Por tanto, los principales usos que tendrían los sistemas que utilizan materiales piezoeléctricos sería la alimentación de sensores. Ahora comentaremos varios proyectos en los que utilizan materiales piezoeléctricos para obtener energía a partir de vibraciones mecánicas.

El primer proyecto [1] consiste en el almacenamiento de la energía eléctrica extraída por una lámina de PZT utilizando las vibraciones de elementos presentes en diferentes aparatos, como el compresor de un coche. Debido a que la señal eléctrica producida por la lámina es alterna, hay que utilizar un circuito rectificador para obtener una señal eléctrica en continua. Para ello hay dos tipos de circuitos posibles, uno más simple que se utiliza en el caso de que se quiera almacenar la energía eléctrica en baterías y otro más complicado que se utiliza en el caso de utilizar condensadores para utilizar la energía extraída casi instantáneamente.

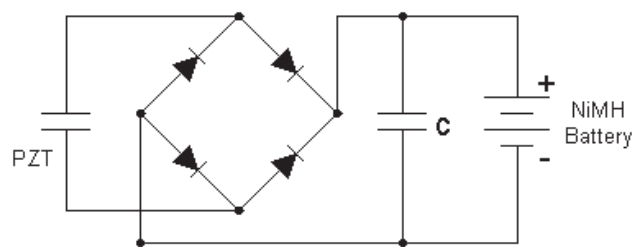


Imagen 3

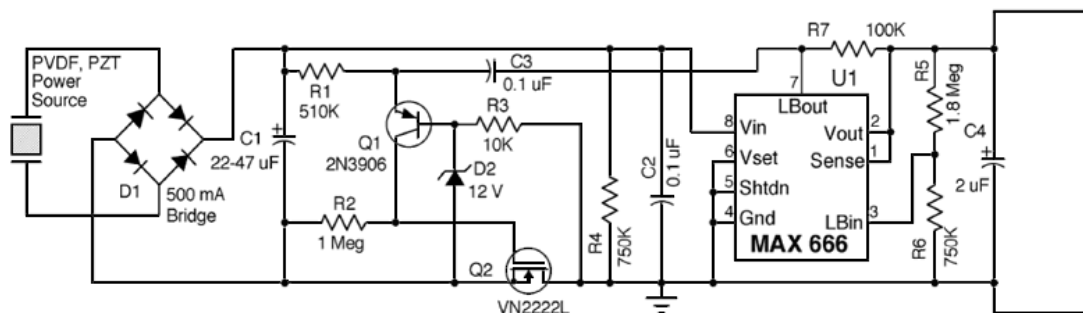
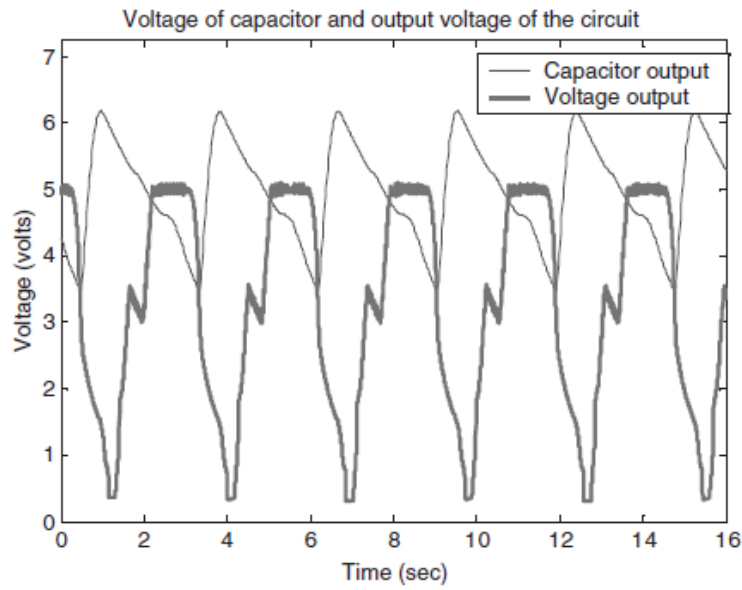


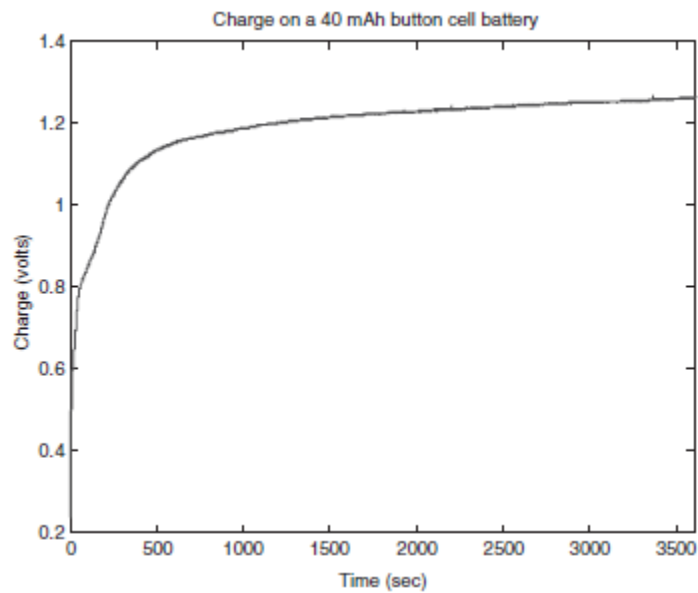
Imagen 4

Los principales resultados de las medidas experimentales realizadas se muestran en las siguientes imágenes:

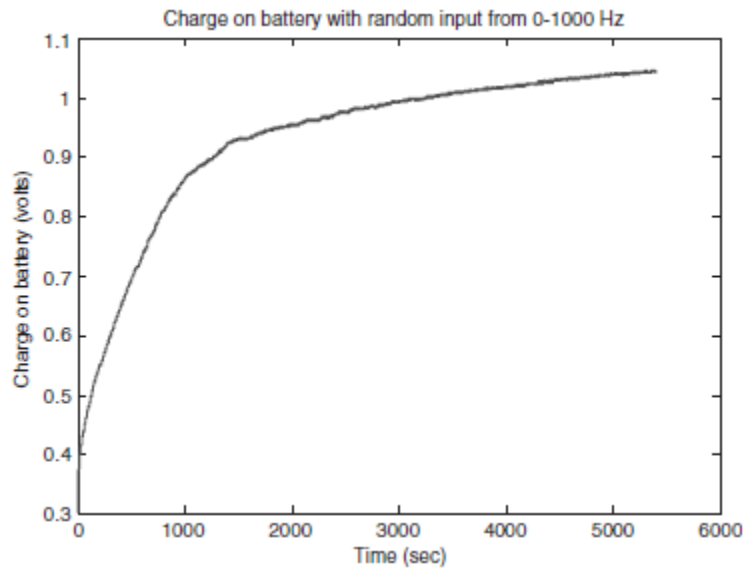


**Imagen 5**

Este método permite que la energía producida sea utilizada casi instantáneamente. En contra, tenemos que el circuito solo puede generar pulsos pequeños, parecido a un señal PWM (pulse-width-modulated). Debido a este tipo de salida, este método de acumulación de energía no sirve para alimentar aparatos electrónicos, aunque se podría utilizar para transmitir una señal corta.



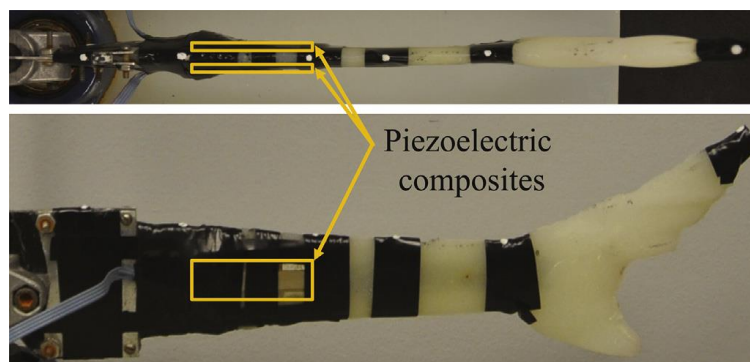
**Imagen 6**



**Imagen 7**

Al utilizar una batería para acumular la energía producida por la placa piezoeléctrica nos encontramos con varias ventajas respecto del método del condensador. En el caso del método del condensador, necesitamos que el piezoeléctrico esté produciendo energía constantemente, mientras que en el caso del método de la batería la energía se acumula incluso cuando no se está excitando el piezoeléctrico. Otra ventaja es que el tiempo de descarga de un condensador es más pequeño que el tiempo de descarga de una batería. Debido a esto, los condensadores no son adecuados cuando se requiere un suministro de potencia constante. Además, cuando se utilizan baterías, se pueden instalar 2 baterías permitiendo que una se esté cargando mientras que la otra esté descargándose.

El segundo proyecto [2] consiste en la extracción de energía eléctrica a partir de las vibraciones mecánicas en el agua utilizando un dispositivo con una lámina piezoeléctrica que simula la cola de un pez.

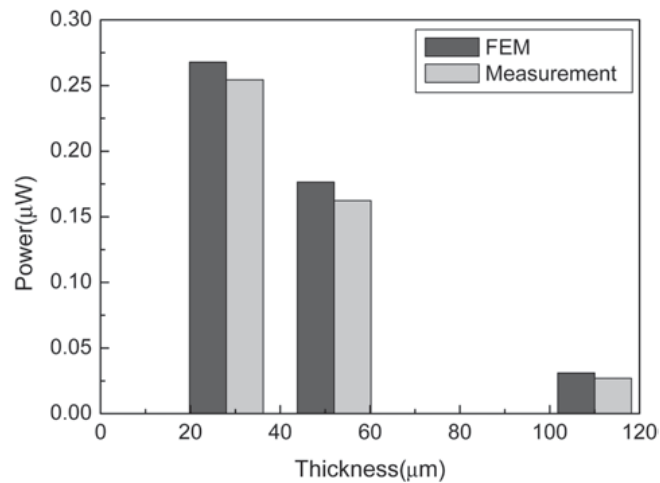


**Imagen 8**

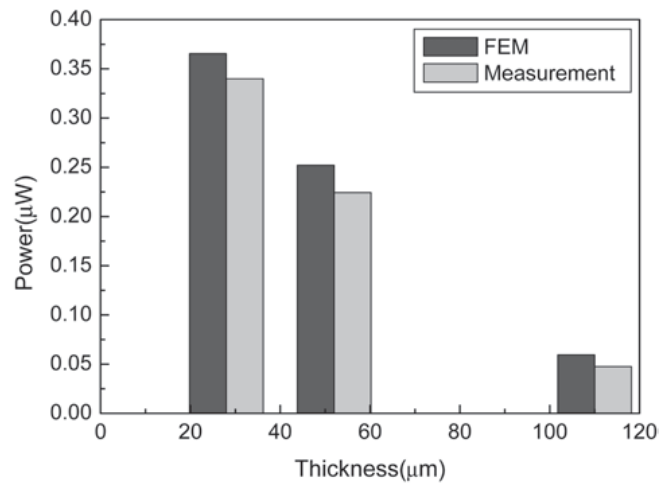
La principal aplicación de este método es la alimentación de un sensor para transmitir de forma inalámbrica la temperatura medida por un sensor alimentado por la conversión de la energía mecánica debida a la ondulación de la cola. La potencia extraída por este tipo de sistemas es del orden de  $\mu\text{W}$ , suficiente para alimentar pequeños sensores como el anterior. La principal desventaja es el efecto que produce la lámina piezoeléctrica usada en el

movimiento de ondulación de la cola, debido a esta razón todavía no se podría utilizar en animales vivos para realizar medidas de las temperaturas de los mares por donde nadan.

El siguiente proyecto [3] consiste en la extracción de energía para la alimentación de bio MEMS (micro-electro-mechanical system), que pueden ser usados como sensores en el flujo sanguíneo y en otras partes de la medicina. Para ello se utilizan láminas de PVDF (polifluoruro de vinilideno) con distintas geometrías, cuya área es del orden de  $1 \text{ cm}^2$ , para alimentar un bio MEMS que necesita una potencia del orden de  $\mu\text{W}$  o  $\text{mW}$ . En la siguiente imagen se muestra la potencia extraída en función del grosor de dichas láminas:



(a)



(b)

**Imagen 9**

Se puede apreciar como al aumentar el grosor, la potencia extraída es menor debido a la menor modificación de las dimensiones de la lámina con la misma presión. Por tanto, es posible alimentar un sensor que necesite un potencia en el rango de  $\mu\text{W}$  o, si se almacena dicha energía, se podría activar un sensor que necesite una potencia en el rango de  $\text{mW}$ .

### 3.3 Actuadores electromagnéticos

Ahora nos centraremos en analizar el uso de actuadores electromagnéticos para obtener energía a partir de vibraciones mecánicas. El uso de actuadores electromagnéticos se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética. En este método se utilizan principalmente materiales magnéticos como imanes permanentes y materiales conductores como el cobre para construir las bobinas por las que circulará corriente eléctrica. Los principales ámbitos de aplicación de este método son las situaciones en la que haya una gran energía mecánica implicada o grandes amplitudes de vibración.

El primer método consiste en utilizar amortiguadores lineales para obtener energía al amortiguar las vibraciones mecánicas en rascacielos, puentes,... [4] Para realizar ambas tareas a la vez, se propone un modelo simple de un amortiguador lineal compuesto por un imán permanente y dos bobinas, conectadas en serie en los extremos:

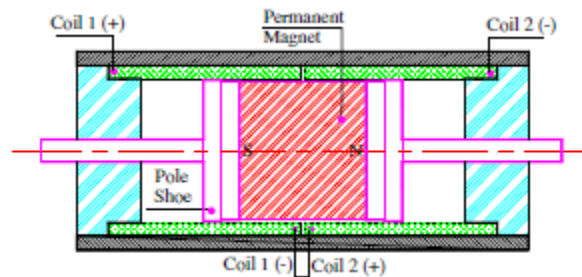


Imagen 10

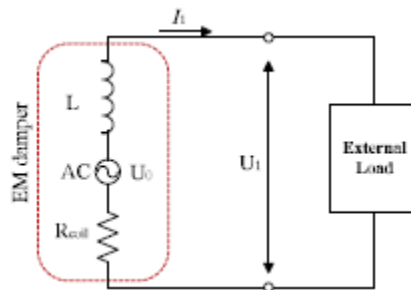


Imagen 11

De acuerdo con las ecuaciones de balance de energías, la energía debido a la excitación dinámica externa sobre una estructura es igual a la suma de la energía cinética de la masa de la estructura, la energía de [esfuerzo elástico], la energía de disipación debido al amortiguamiento propio de la estructura y la energía disipada debido a los amortiguadores. Esta última parte de la energía sería absorbida por los amortiguadores lineales propuestos anteriormente si la estructura cuenta con los sistemas necesarios para la obtención de energía. Esta parte de la energía pasaría a ser la potencia de entrada para el sistema EMDEH (ElectroMagnetic Damping Energy Harvesting),

$$P_{in} = F \cdot \dot{x}$$

donde  $F$  y  $\dot{x}$  son la fuerza de amortiguamiento instantáneo y la velocidad del imán, respectivamente. Dicha potencia de entrada será disipada en dos efectos de amortiguamiento diferente: el amortiguamiento parásito ( $P_p$ ), debido a pérdidas mecánicas en el movimiento



del imán y que son independientes de la corriente; y la potencia debida al amortiguamiento electromagnético ( $P_{em}$ ). La potencia debida al amortiguamiento electromagnético sólo aparece cuando el circuito está cerrado y la corriente fluye por el circuito. Dicha potencia se divide en las pérdidas en las bobinas ( $P_{coil}$ ), las pérdidas debidas al circuito utilizado para extraer la energía ( $P_{loss}$ ) y la energía extraída ( $P_{out}$ ) y que será la que se pueda utilizar o acumular. Resumiendo, tenemos que la potencia de entrada en el sistema EMDEH se distribuye en los siguientes términos:

$$P_{in} = P_p + P_{em} = P_p + P_{coil} + P_{gross} = P_p + P_{coil} + P_{loss} + P_{out}$$

donde ( $P_{gross}$ ) es la potencia extraída al circuito externo sin tener en cuenta las pérdidas debidas al amortiguador EM. Se puede apreciar que la ventaja de los amortiguadores EM respecto de los amortiguadores convencionales es que parte de la energía disipada puede ser extraída en forma de energía eléctrica en vez de ser disipada en forma de calor. Por tanto, estamos obteniendo un doble beneficio, aparte de disipar la energía cinética debido a las vibraciones de las estructuras, estamos obteniendo energía eléctrica que podría ser utilizada para alimentar sensores o ser acumulada en baterías para su posterior utilización.

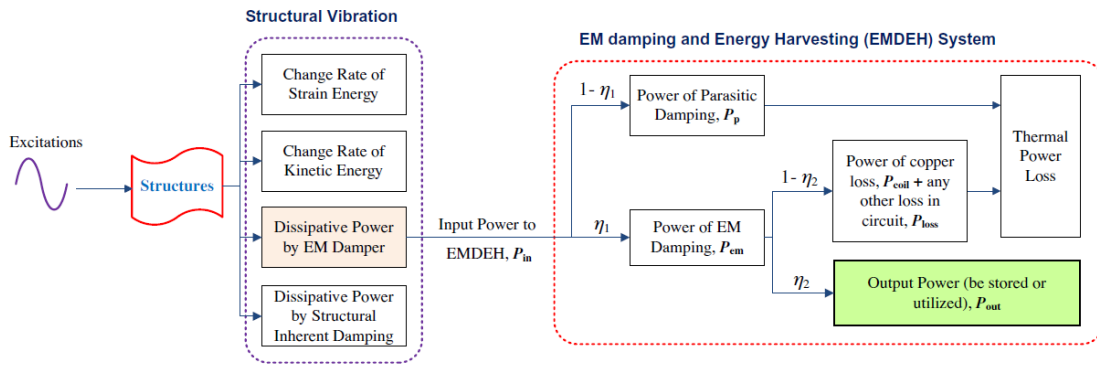


Imagen 12

La eficiencia de conversión de energía del sistema EMDEH viene definida por:

$$\eta = \frac{\bar{P}_{out}}{\bar{P}_{in}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$$

donde  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  y  $\eta_3$  son las distintas eficiencias que vienen definidas por:

$$\eta_1 = \frac{\bar{P}_{em}}{\bar{P}_{in}} = \frac{\bar{P}_{em}}{P_p + \bar{P}_{em}}$$

$$\eta_2 = \frac{\bar{P}_{gross}}{\bar{P}_{em}}$$

$$\eta_3 = \frac{\bar{P}_{out}}{\bar{P}_{gross}} = \frac{\bar{P}_{out}}{\bar{P}_{out} + \bar{P}_{loss}}$$

Dichas eficiencias pueden ser evaluadas analíticamente en el caso concreto de que la excitación sea una oscilación armónica de amplitud “d” y frecuencia constante “f”:

$$x = d * \sin(2\pi ft)$$

Los resultados más característicos se mostrarán en las siguientes imágenes. Primero se mostrarán los resultados correspondientes al caso de circuito con una resistencia de carga:

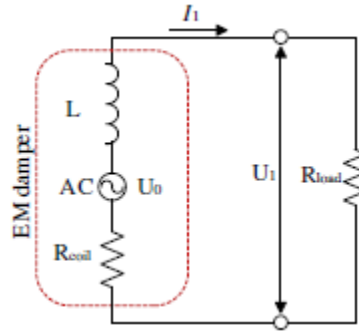


Imagen 13

En las siguientes gráficas se mostrarán las variaciones del coeficiente de amortiguamiento ( $C_{em}$ ), de la potencia disipada y de la eficiencia en función del valor de la resistencia de carga conectada al circuito:

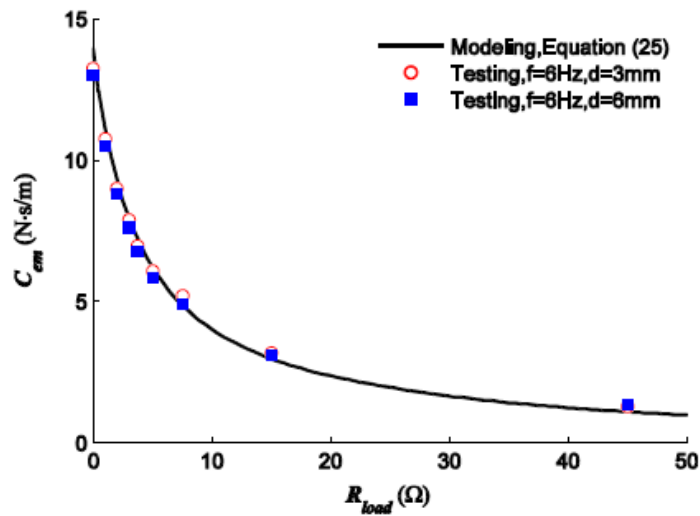


Imagen 14

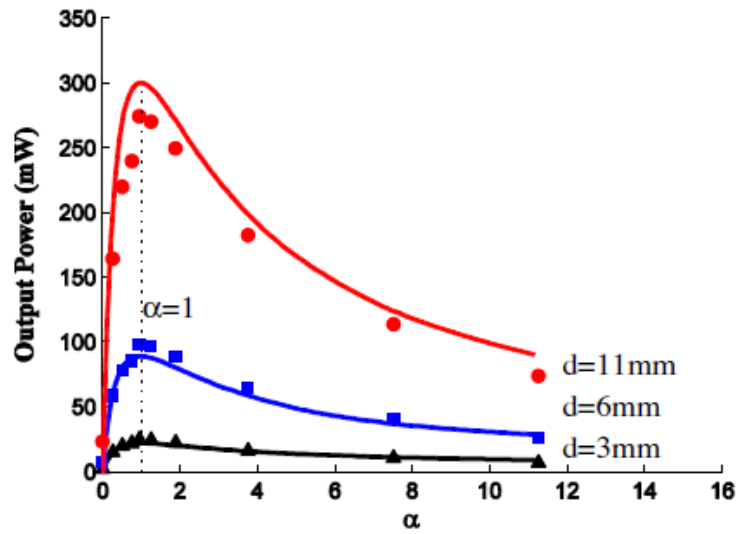


Imagen 15

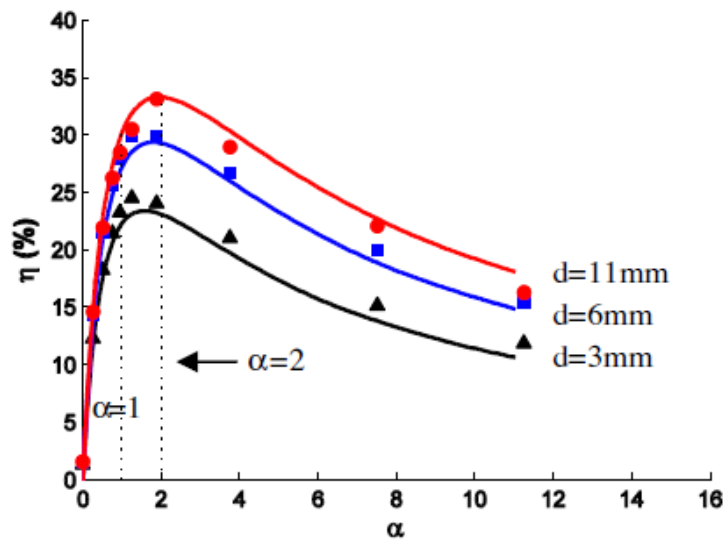


Imagen 16

En las gráficas anteriores el parámetro  $\alpha$  hace referencia a la relación  $R_{load}/R_{coil}$

Ahora se mostrarán los resultados correspondientes a los casos en los que la energía extraída era almacenada en un supercondensador y en una batería de NiMH de 250 mAh. Los esquemas circuitales son los siguientes:

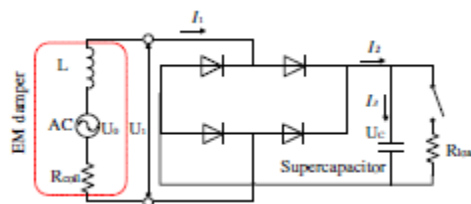
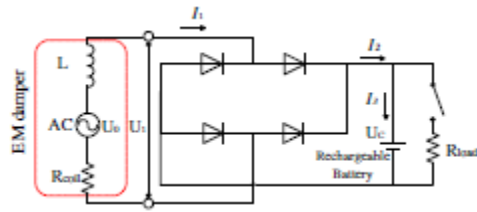
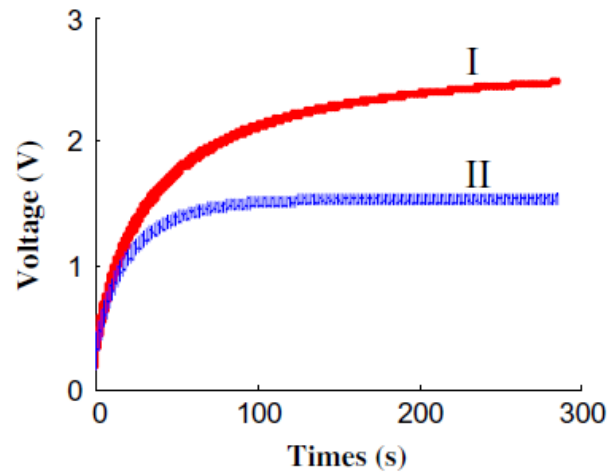


Imagen 17

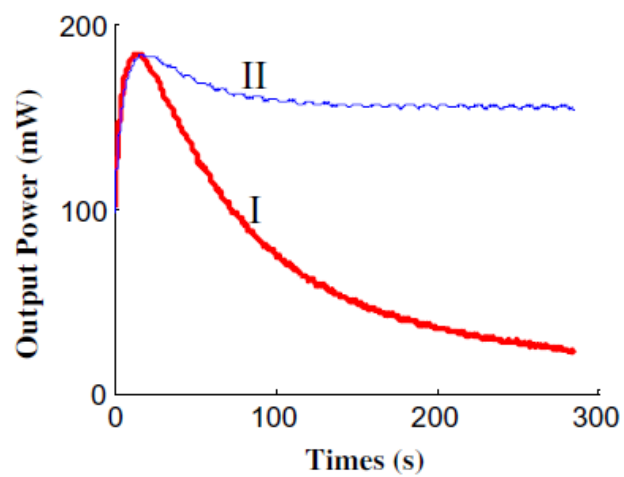


**Imagen 18**

La variación de voltaje, de potencia extraída y de la eficiencia frente al tiempo se muestran en las siguientes gráficas para el caso del supercondensador:



**Imagen 19**



**Imagen 20**

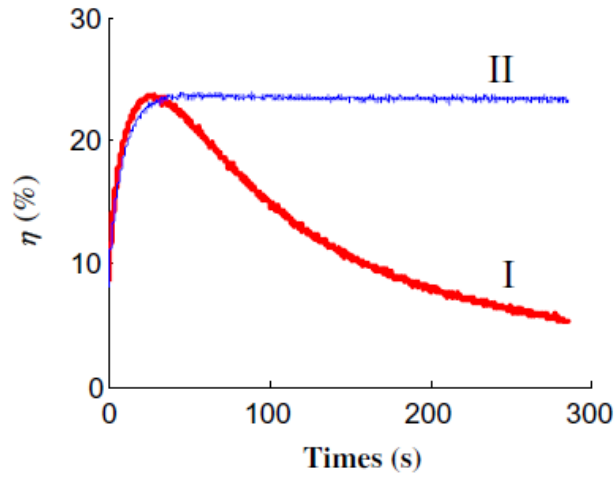


Imagen 21

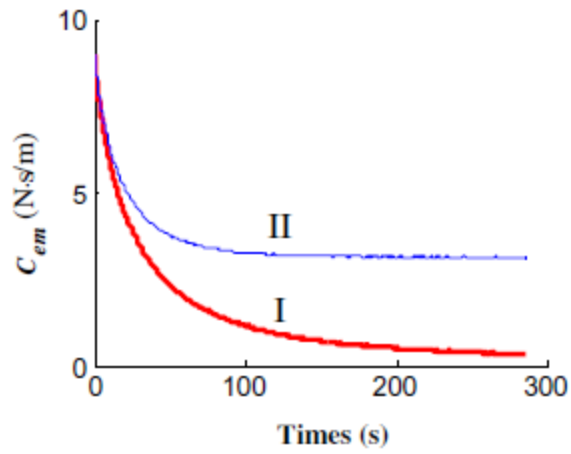


Imagen 22

Mientras que en el caso de la batería de NiMH, tenemos las siguientes gráficas:

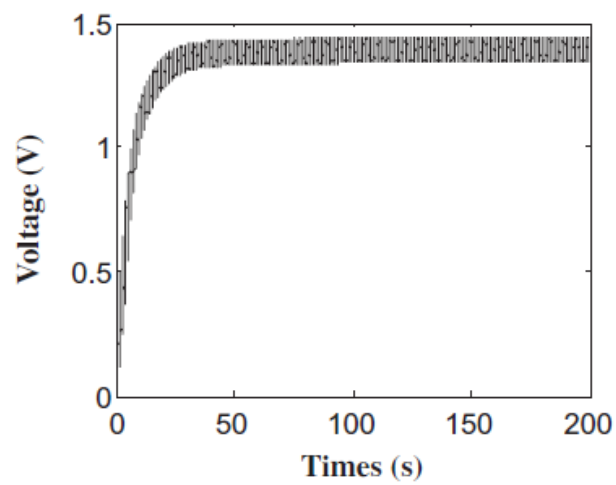


Imagen 23

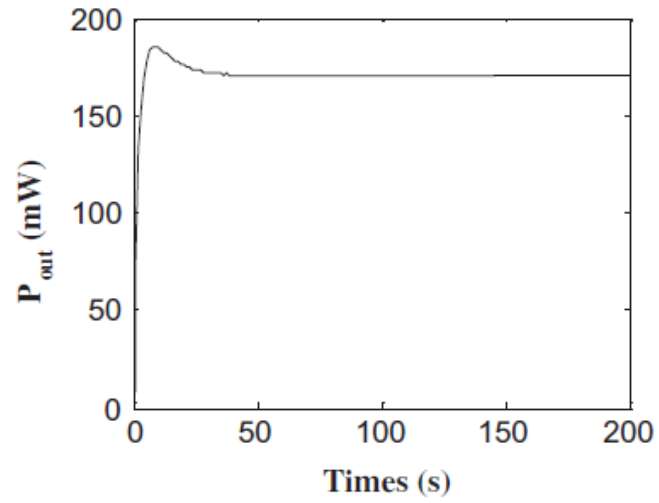


Imagen 24

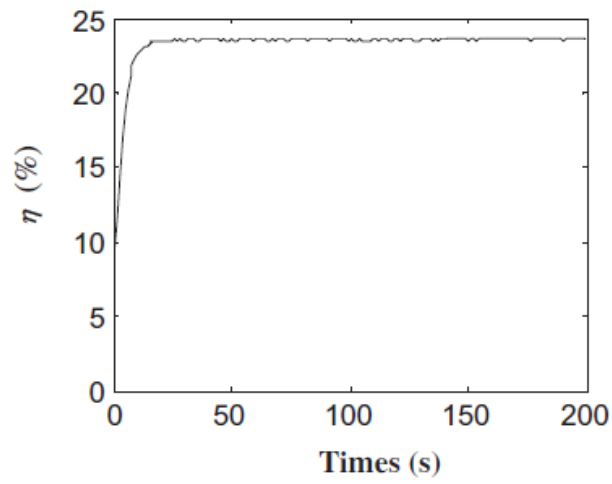


Imagen 25

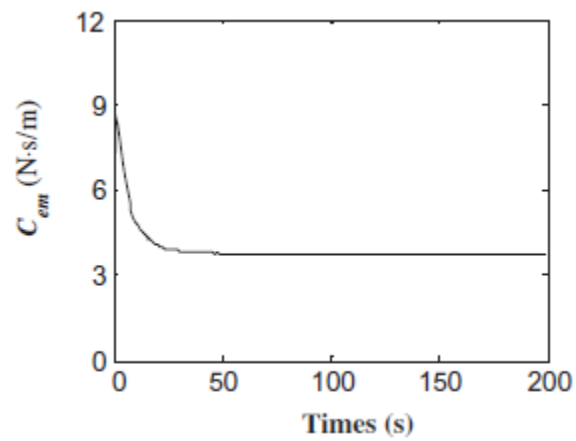


Imagen 26

Con las gráficas anteriores se puede apreciar que se pueden utilizar los sistemas EMDEH para cargar tanto supercondensadores como baterías recargables. Además, se puede apreciar como la eficiencia y la potencia extraída van disminuyendo al cargarse el supercondensador, mientras que en el caso de la batería recargable permanecen constantes cuando ya se ha llegado al voltaje máximo. El inconveniente es que el máximo de eficiencia de conversión no coincide con el máximo de disipación (coeficiente  $C_{em}$ ) y que los parámetros del sistema varían con el valor de la impedancia externa conectada al circuito.

El segundo método consiste en utilizar las distintas fuerzas que se producen cuando una persona camina [5]. Entre éstas se incluyen la fuerza debido al peso de la persona, la fuerza debida a la aceleración al mover las piernas y la fuerza debido al pulso de aceleración debido al golpeo del talón con el suelo:

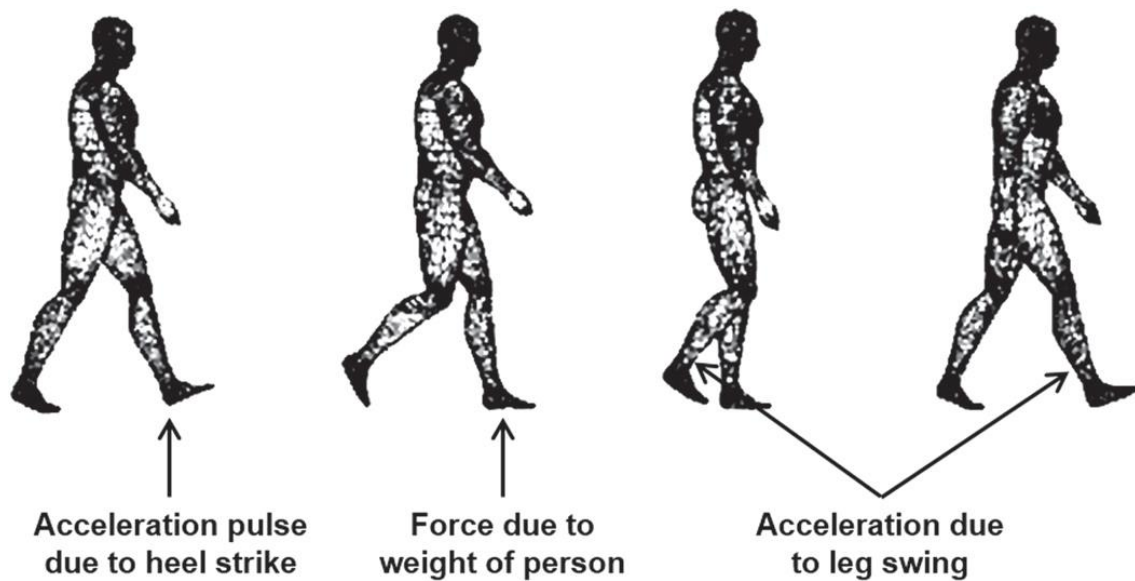


Imagen 27

El fenómeno físico en el que consiste este método de extracción de energía es la inducción de un voltaje en un conjunto de espiras circulares conectadas en serie. Para ello se colocará una pila de imanes cilíndricos en paralelo, cuyo eje coincidirá con el eje de las espiras, que estarán separados por bloques de materiales ferromagnéticos para incrementar el campo eléctrico entre los imanes y su alrededor y, por tanto, aumentar el flujo magnético en la superficie contenida en las espiras. La disposición de la pila de imanes y los separadores de material ferromagnético se muestran en la siguiente imagen. En la otra imagen se muestra la distribución de campo magnético simulada con software utilizando el método FEM (Finite Element Method).

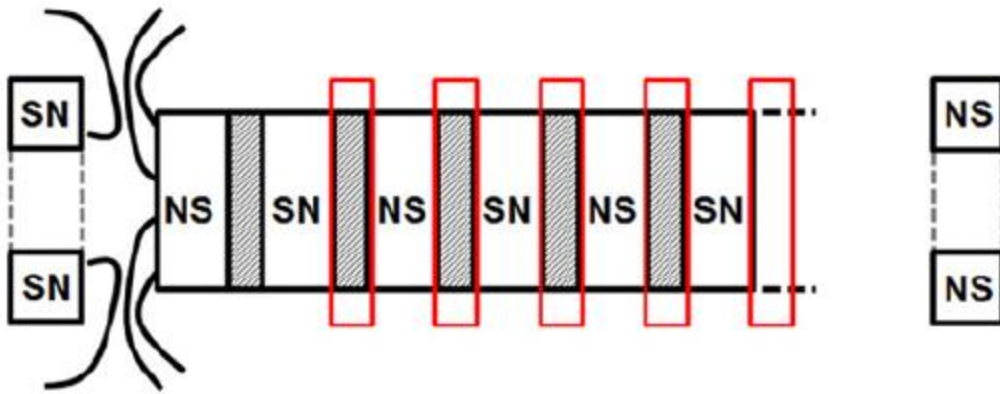


Imagen 28

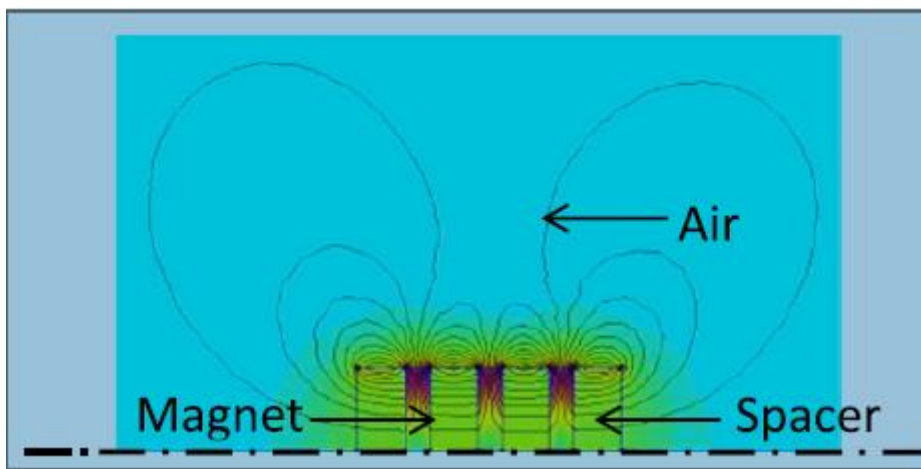


Imagen 29

En la siguiente imagen se muestra el prototipo del dispositivo utilizado para extraer energía utilizando la aceleración del movimiento de las piernas al caminar.

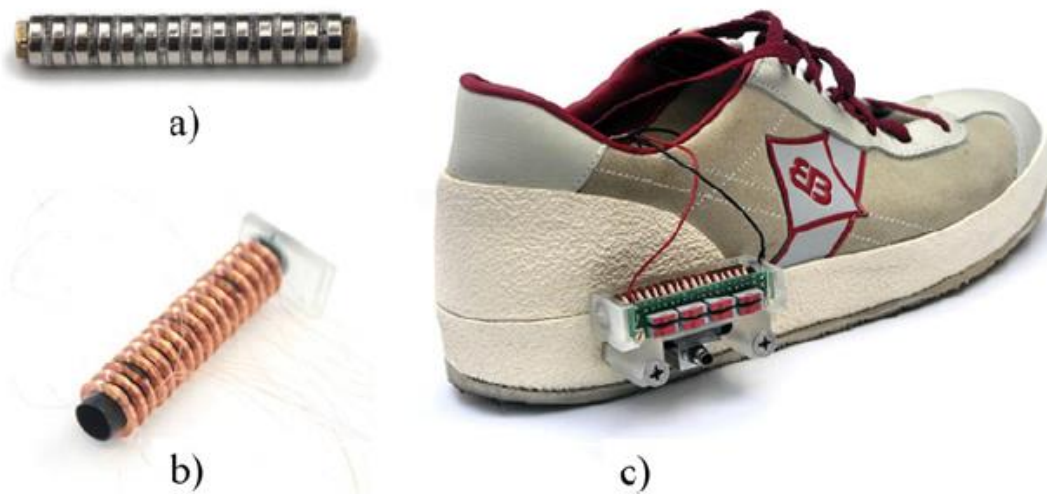


Imagen 30



En la siguiente imagen se puede ver como varía la potencia extraída en función de la velocidad y del tipo de corredor:

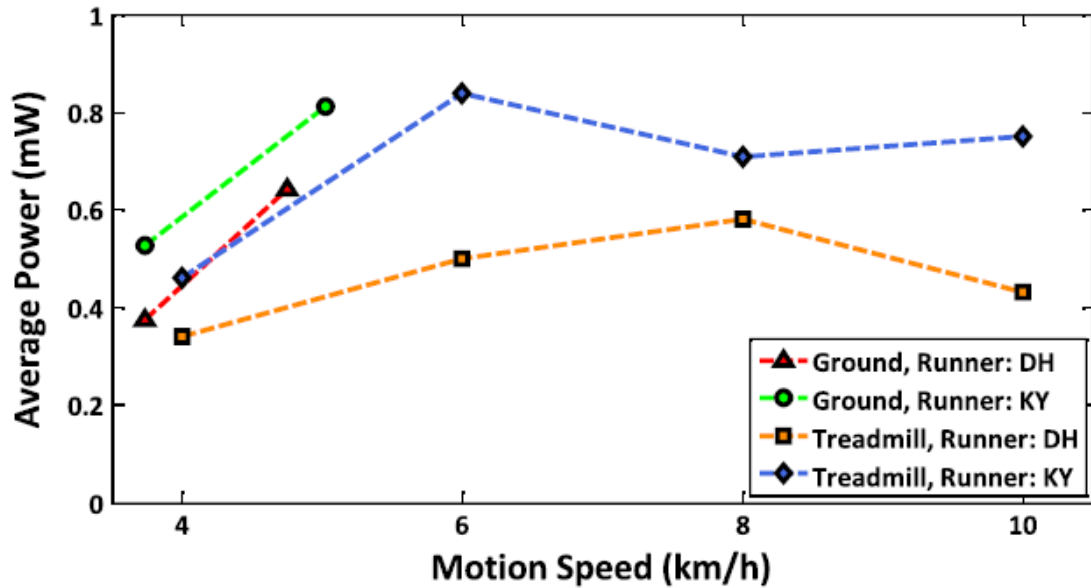


Imagen 31

Se puede apreciar como al pasar de caminar rápido (6 km/h) a una carrera suave (8 km/h) se reduce la potencia extraída. Además, se puede apreciar como el estilo de paseo y la geometría del cuerpo afectan a la potencia extraída. En las siguientes gráficas se muestra la comparación entre las simulaciones y las medidas experimentales:

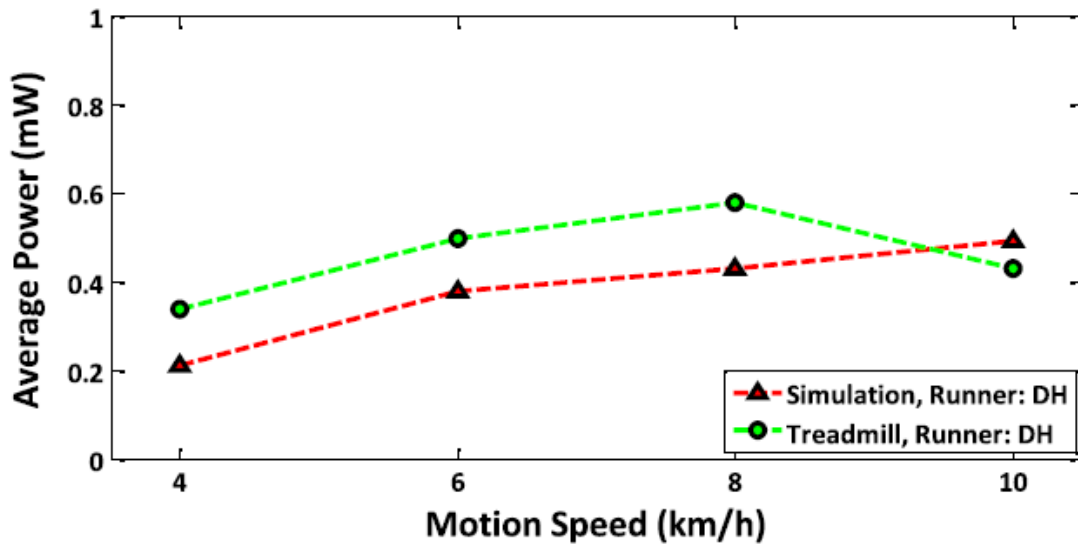


Imagen 32

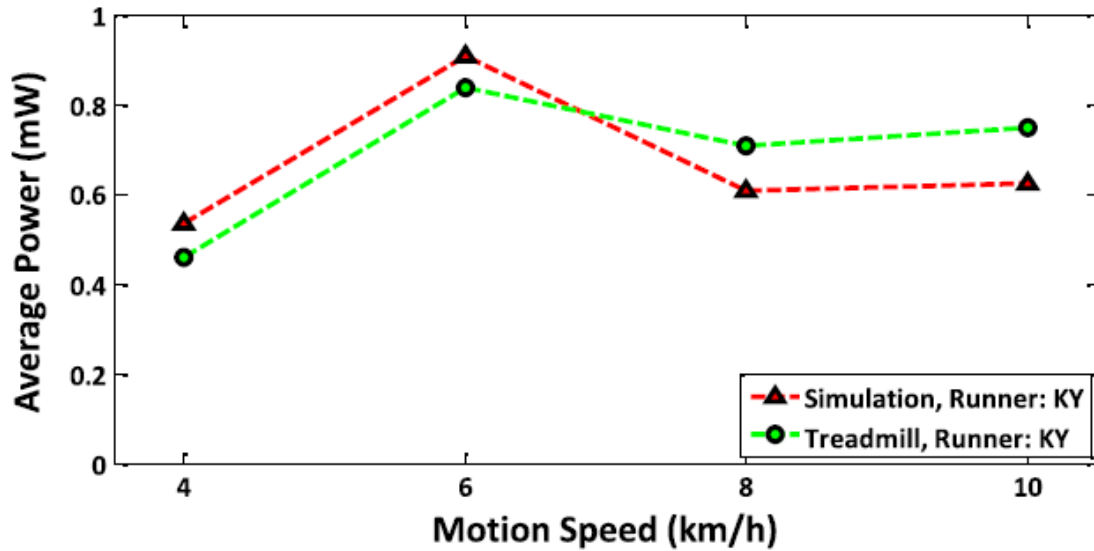


Imagen 33

Con las gráficas anteriores se puede concluir que es posible obtener energía utilizando las distintas aceleraciones que se producen al caminar, principalmente el balanceo de las piernas mientras caminamos. Debido a la miniaturización del aparato utilizado se podría acoplar fácilmente a las suelas, aunque dicha miniaturización limita la obtención de energía debido al menor flujo de campo magnético presente entre las espiras. La potencia extraída podría ser utilizada para alimentar sensores biométricos, ya que dichos sensores necesitan una pequeña potencia para funcionar.

## 4. Termoeléctricos

En este apartado nos centraremos en la obtención de energía utilizando las diferencias de temperaturas que se encuentran en la naturaleza o debido a aparatos fabricados. Primero, realizaremos una introducción teórica en la que explicaremos los fenómenos físicos que dan lugar a la termoelectricidad y, después, analizaremos las principales tanto terrestres como aplicadas a la industria aeroespacial. La mayor parte este apartado se ha obtenido del siguiente libro [6].

### 4.1 Introducción teórica

La interacción entre un fenómeno eléctrico y térmico se conoce desde el siglo XIX, cuando Joule observó que la materia ofrece cierta resistencia al movimiento de los electrones, los cuales ceden energía cinética al entorno en los sucesivos choques. Esta energía proporcionada por los electrones se disipa en forma de calor. Sin embargo, no es éste el único fenómeno de interacción termoeléctrica. Otros efectos son los denominados Seebeck, Peltier y Thomson y el termoiónico.

El efecto Peltier fue descubierto en el año 1834 por el físico francés J. C. A. Peltier. Surgió sobre la base del descubrimiento del físico alemán T.J. Seebeck, quien en 1821 observó que en un circuito formado por dos conductores distintos, cuyas uniones se encuentran a temperaturas distintas, aparece entre los extremos una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial es función de la naturaleza de los conductores y de la diferencia de temperaturas. Este dispositivo se conoce como termopar. La esencia del efecto Peltier, que básicamente es el contrario del efecto Seebeck, consiste en que cuando pasa una corriente a través de un circuito formado por dos conductores de distinta naturaleza, una de sus uniones absorbe calor y la otra lo cede. El calor que cede el foco caliente será la suma de la energía eléctrica aportada al termoelemento y el calor que absorbe el foco frío. Estos termoelementos, configurados de este modo, constituyen una máquina térmica, que puede ser tanto calefactora como refrigeradora.

El efecto Thomson, descubierto en 1857 por Thompson W., consiste en la absorción o liberación de calor por parte de un conductor eléctrico, en el que existe un gradiente de temperaturas y por el que circula una corriente eléctrica.

El efecto termoiónico consiste en la emisión de iones procedente de la superficie de un metal o un óxido de metal cuando el material está a una cierta temperatura T. Este efecto fue inicialmente reportado por F. Guthrie en 1873 y redescubierto por Thomas Edison en 1880. La densidad de corriente emitida está relacionada con la temperatura a la que se encuentra el sistema mediante la ecuación:

$$J = AT^2 e^{-W/kT}$$

donde T es la temperatura del metal en Kelvin, W es la función trabajo del metal, k es la constante de Boltzmann y la constante de proporcionalidad A viene dada por:

$$A = \frac{4\pi m k^2 e}{h^3} = 1.20173 * 10^6 Am^{-2} K^{-2}$$

donde m y e son la masa y la carga del electrón, respectivamente, y h es la constante de Planck.

Ya en 1885 el físico inglés Rayleigh J.W. planteó la posibilidad del uso de dispositivos termoeléctricos como generadores de corriente eléctrica. Sin embargo, pese a que los fenómenos termoeléctricos son bien conocidos desde hace ya más de cien años, su desarrollo, tanto como generador de corriente o como refrigeración, estuvo totalmente frenado debido a los escasos rendimientos que se obtenían. Como consecuencia, la mayor parte de las aplicaciones termoeléctricas, que han ido desarrollándose desde hace más de 30 años han sido para campo militar, donde es más importante la robustez y precisión que la eficiencia o el coste. En el mercado civil actual, la refrigeración termoeléctrica tiene un sitio en aplicaciones de medicina, aparatos científicos y en dispositivos en los cuales la potencia de refrigeración es muy pequeña y de puntual aplicación, como por ejemplo en neveras portátiles y refrigeradores de botellas de vino, en los que se considera beneficiosa la ausencia de vibraciones.

Los efectos Seebeck y Peltier son cualitativamente distintos y se descubrieron por separado. Sin embargo, hoy en día se entienden como dos aspectos de un mismo fenómeno y reciben un tratamiento teórico unificado, dentro del marco de la TPI (Termodinámica de Procesos Irreversibles).

Como es conocido, cuando en un sistema termodinámico (p. ej. un semiconductor) existen simultáneamente un flujo térmico (asociado a una diferencia de temperaturas  $\Delta T$ ) y un flujo de carga eléctrica (asociado a una fuerza electromotriz  $\Delta \mathcal{E}$ ), habrá una producción de entropía, que en la aproximación lineal se escribirá:

$$\frac{dS}{d\tau} = J_Q \frac{\Delta T}{T^2} + I \frac{\Delta \mathcal{E}}{T}$$

donde  $J_Q$  es el flujo de calor,  $I$  es la intensidad eléctrica (flujo de carga) y  $T$  la temperatura media del sistema. La TPI nos dice que cuando hay estas dos contribuciones independientes a la producción de entropía, debe existir una relación lineal entre los flujos y las distintas fuerzas. Además, el flujo de calor estará acoplado con el flujo de carga, de tal forma que:

$$\begin{pmatrix} J_Q \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{\Delta T}{T^2} \\ \frac{\Delta \mathcal{E}}{T} \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{aligned} J_Q &= L_{11} \cdot \frac{\Delta T}{T^2} + L_{12} \cdot \frac{\Delta \mathcal{E}}{T} \\ I &= L_{21} \cdot \frac{\Delta T}{T^2} + L_{22} \cdot \frac{\Delta \mathcal{E}}{T} \end{aligned}$$

La matriz  $L$  se denomina matriz de coeficientes fenomenológicos. Consideremos un sistema que obedece a las ecuaciones acopladas anteriores. Cuando la intensidad eléctrica es nula, pero existe una diferencia de temperaturas, de la segunda de las ecuaciones se concluye que aparecerá una fuerza electromotriz, dada por:

$$\Delta \mathcal{E} = - \frac{L_{21}}{L_{22} \cdot T} \cdot \Delta T = -\alpha \cdot \Delta T$$

Este fenómeno se llama efecto Seebeck. El coeficiente  $\alpha$ , que mide la intensidad del efecto, se denomina la potencia termoeléctrica del material. Por otra parte, si a través de un sistema con capacidad termoeléctrica se hace circular una intensidad de corriente, debido al acoplamiento de flujos, aparecerá una diferencia de temperaturas. Es el efecto inverso al anterior y se denomina efecto Peltier. Cuando se establece la corriente, la diferencia de temperaturas va aumentando, hasta que se alcanza un estado estacionario, en el que el flujo total de calor en el sistema se hace nulo (por ello las temperaturas dejan de variar).

Sustituyendo esa condición en las ecuaciones anteriores se encuentra una relación lineal entre la diferencia de temperaturas aplicada y la intensidad que recorre el sistema (donde  $\beta$  es el coeficiente Peltier del sistema):

$$\Delta T = \frac{T^2}{\left( L_{21} - \frac{L_{22} \cdot L_{11}}{L_{12}} \right)} \cdot I = \beta \cdot I$$

La máxima eficiencia de conversión termoeléctrica viene dada por:

$$\phi_{\max} = \gamma \eta \text{ where } \gamma = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}}}$$

$$\eta = \frac{(1 + Z_c T)^{1/2} - 1}{(1 + Z_c T)^{1/2} + T_{\text{hot}}/T_{\text{cold}}} \text{ with } T = \frac{T_{\text{hot}} + T_{\text{cold}}}{2}$$

con la temperatura en Kelvin. La eficiencia es, por tanto, el producto de la eficiencia de Carnot, que es menor que la unidad, y el parámetro  $\eta$ , en el que se agrupan los parámetros de los materiales del termopar utilizado. La eficiencia de conversión depende de la diferencia de temperatura sobre la que está trabajando el aparato, la temperatura media de trabajo y el facto de mérito ( $Z$ ) del termopar:

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda}$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de Seebeck,  $\sigma$  es la conductividad eléctrica y  $\lambda$  es la conductividad térmica.

## 4.2 Principales aplicaciones

Después de realizar una breve introducción histórica y teórica, analizaremos las principales aplicaciones de los generadores termoeléctricos. Entre las aplicaciones de los generadores termoeléctricos destacan los generadores RTG (radioisotope thermoelectric generator), las aplicaciones espaciales y la conversión termoeléctrica con pequeños gradientes de temperatura.

### 4.2.1 Aplicaciones terrestres

La aplicación principal de los generadores RTG es la alimentación de equipos de adquisición de datos en lugares remotos en los que el uso de baterías, células solares o generadores de otro tipo tiene mayores desventajas. La característica común de este tipo de generadores es el uso de una fuente radiactiva como fuente de calor, como Polonio 210 en el SNAP-3 (Systems for Nuclear Auxiliary Power) o los distintos modelos SENTINEL, que utilizaban Estroncio 90 como fuente de calor y un conversor compuesto de Teluro de Plomo. La principal desventaja de estos generadores es el uso de una fuente radiactiva como fuente de calor, pero permiten su uso continuado durante varios años hasta agotarse. Entre los distintos usos podemos destacar la alimentación de estaciones climatológicas en el norte de Canadá o en la Antártida; ayudas en la navegación como el RIPPLE (Radioisotope Powered Pulsed Light Equipment) en Reino Unido y Escandinavia, el MARGUERITE desarrollado por una grupo Fracés-Hispano-Suizo de SNECMA (**S**ociété **N**ationale d'Étude et de **C**onstruction de **M**oteurs d'**A**vion) o los MAPLE (Minor Atomic Powered Life Equipment) desarrollados por Norte América, que utilizaban Cobalto 60 como fuente de calor; y la alimentación de comunicaciones

militares o sistemas de detección en ambientes hostiles. Aparte de los usos comentados anteriormente, también se utilizaron generadores RTG para alimentar faros en la costa norte de Rusia durante el siglo pasado. Debido a la ausencia de un mecanismo de navegación durante el siglo pasado y al largo período nocturno en el mar Ártico, la Unión Soviética decidió instalar una red de faros nucleares autónomos alimentados por Estroncio 90 o Plutonio 238 en situaciones en las que se necesitaba una potencia mayor. Adicionalmente, se utilizaron fuentes de radioisótopos como fuente de calor para alimentar marcapasos durante los años 70 y 80.



**Imagen 34 [16]**

Las ventajas de utilizar este tipo de alimentación es la gran longevidad de este tipo de dispositivos frente a los que utilizan baterías. Con el desarrollo de la tecnología relacionada con las baterías y con la recarga, se dejaron de utilizar los marcapasos nucleares a finales de los años 80, aunque algunos de los marcapasos nucleares implantados continúan funcionando.

#### 4.2.2 Aplicaciones espaciales

En las aplicaciones espaciales, los generadores termoeléctricos utilizados se pueden dividir en dos grupos: los generadores de Teluro de Plomo y los de aleaciones de Silicio y Germanio. Tras realizar una introducción, analizaremos los generadores de Teluro de Plomo y, posteriormente nos centraremos en los de aleaciones de Silicio-Germanio. La mayor parte de las NPS (Nuclear Power Sources) lanzadas al espacio por Estados Unidos y la antigua Unión Soviética conseguían su conversión de energía utilizando generadores termoeléctricos. El primer lanzamiento de una NPS fue en 1961 por Estados Unidos. Lanzó en SNAP-3B que utilizaba una fuente de radioisótopos. Posteriormente, Estados Unidos siguió realizando lanzamientos de distintas NPS en los que las numeraciones impares implican una fuente de radioisótopos y las numeraciones pares una fuente de fisión nuclear como el Plutonio 238. En el inicio, el uso de las NPS era para complementar el uso de fuente de energía solar, pero gradualmente se convirtieron en la única fuente de energía de los satélites, con las ventajas de un tamaño reducido, largos tiempo de uso, autosuficiencia y fiabilidad. En la siguiente tabla se muestran un resumen de los lanzamientos producidos por Estados Unidos:

Power Source <sup>a</sup>	No. of NPS	Initial Avg Power/NPS (W)	Spacecraft (Mission Type)	Launch Date <sup>b</sup> (Launch Site)	Initial Orbit	Status
SNAP-3B7	1	2.7	Transit 4A (Navigational)	29 Jun 1961 (ETR)	-890 × 1000 km 67.5°, 104 min	RTG operated for ~15 years. Satellite now shutdown but operational.
SNAP-3B8	1	2.7	Transit 4B (Navigational)	15 Nov 1961 (ETR)	-960 × 1130 km 32.4°, 106 min	RTG operated for 9 years. Satellite operation was intermittent after 1962 high-altitude nuclear test. Last reported signal in 1971.
SNAP-9A	1	>25.2	Transit 5BN-1 (Navigational)	28 Sep 1963 (WTR)	-1090 × 1150 km 89.9°, 107 min	RTG operated as planned. Non-RTG electrical problems on satellite caused satellite to fail after 9 months.
SNAP-9A	1	26.8	Transit 5BN-2 (Navigational)	5 Dec 1963 (WTR)	-1080 × 1110 km 90.0°, 107 min	RTG operated for >6 years. Satellite lost navigational capability after 1.5 years.
SNAP-IOA	1	>500	SNAPSHOT (Experimental)	3 Apr 1965 (WTR)	1296 × 1329 km 90.2°, 111.5 min	Reactor successfully operated for 43 d until shutdown by electrical component failure on spacecraft.
SNAP-19B3	2	28.2	Nimbus III (Meteorological)	14 Apr 1969 (WTR)	1070 × 1131 km 99.9°, 107 min	RTGs operated for >2.5 years (no data taken after that).
SNAP-27	1	73.6	Apollo 12 (Lunar)	14 Nov 1969 (KSC)	Lunar trajectory	RTG operated for ~8 years (until station was shut down).
SNAP-27	1	72.5	Apollo 14 (Lunar)	31 Jan 1971 (KSC)	Lunar trajectory	RTG operated for ~6.5 years (until station was shut down).
SNAP-27	1	74.7	Apollo 15 (Lunar)	26 Jul 1971 (KSC)	Lunar trajectory	RTG operated for > 6 years (until station was shut down).
SNAP-19	4	40.7	Pioneer 10 (Planetary)	2 Mar 1972 (ETR)	Solar system escape trajectory	RTGs still operating. Spacecraft successfully operated to Jupiter and is now beyond orbit of Pluto.
SNAP-27	1	70.9	Apollo 16 (Lunar)	16 Apr 1972 (KSC)	Lunar trajectory	RTG operated for ~5.5 years (until station was shut down).
Transit-RTG	1	35.6	"Transit" (TRIAD-01-1X)	2 Sep 1972 (WTR)	716 × 863 km 90.1°, 101 min	RTG still operating.

Tabla 1

En la siguiente figura se muestra un esquema de un generador RTG SNAP-3B en la que se muestra las características comunes de una NPS: la fuente de calor (un reactor nuclear o un radioisótopo con decaimiento natural) y un convertidor (que puede utilizar numerosos sistemas de conversión como termoeléctrico, termoiónico, Brayton, Rankine,...) para transformar la energía térmica en energía eléctrica.

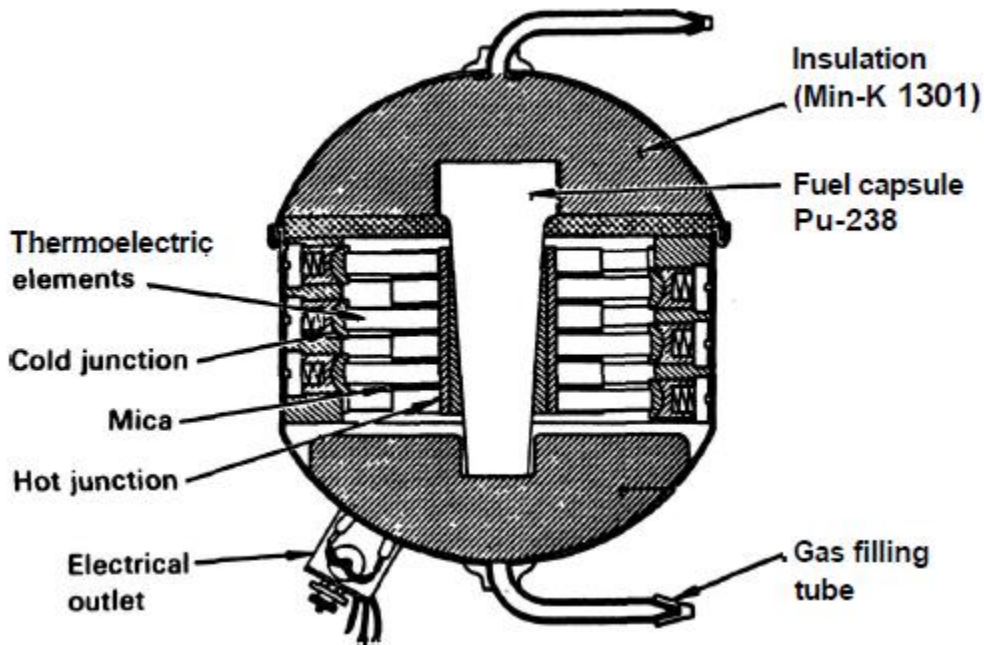


Imagen 35

#### 4.2.2.1 Generadores de aleaciones de Teluro

Ahora nos centraremos en analizar los generadores de Teluro de Plomo. La mayoría de las NPS lanzadas al espacio por Estados Unidos en los años 60 y 70 utilizaban materiales termoeléctricos compuestos por aleaciones de Teluro para fabricar los elementos del convertidor. Todos estos RTG basados en Teluros funcionaban por medio de un acople conductor entre la fuente de calor de Plutonio y los elementos termoeléctricos. Se utilizaba aislamiento para minimizar las pérdidas de calor y una cubierta de gas para reducir la sublimación de los materiales termoeléctricos en el extremo caliente de los pares. Otros generadores, como el Transit RTG, funcionaban en vacío usando una transferencia radiante de calor entre los elementos termoeléctricos y la fuente de calor. Entre estos generadores termoeléctricos destacaban el SNAP-3B, SNAP-9, SNAP-19 y SNAP-27. En las siguientes imágenes se mostrarán los generadores SNAP-27 y SNAP-19:



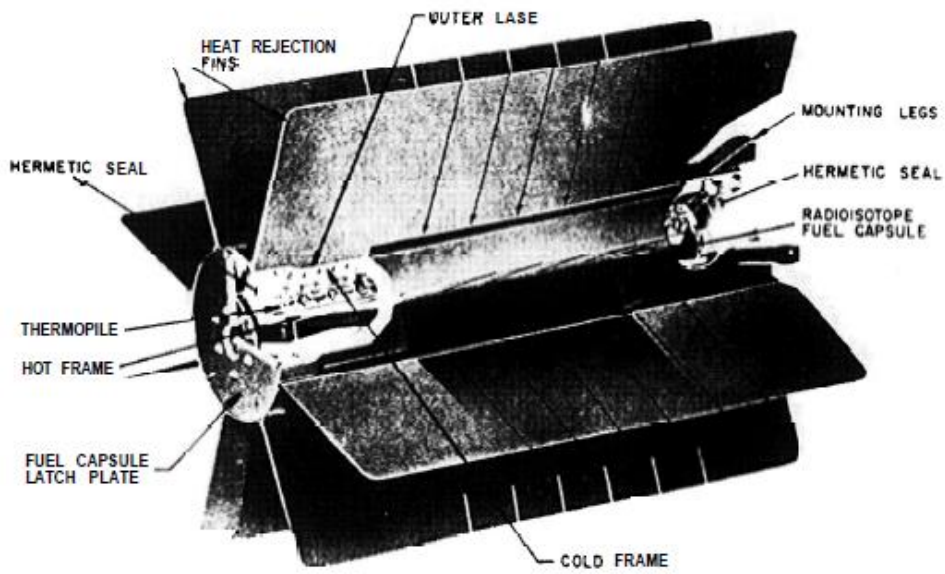


Imagen 36

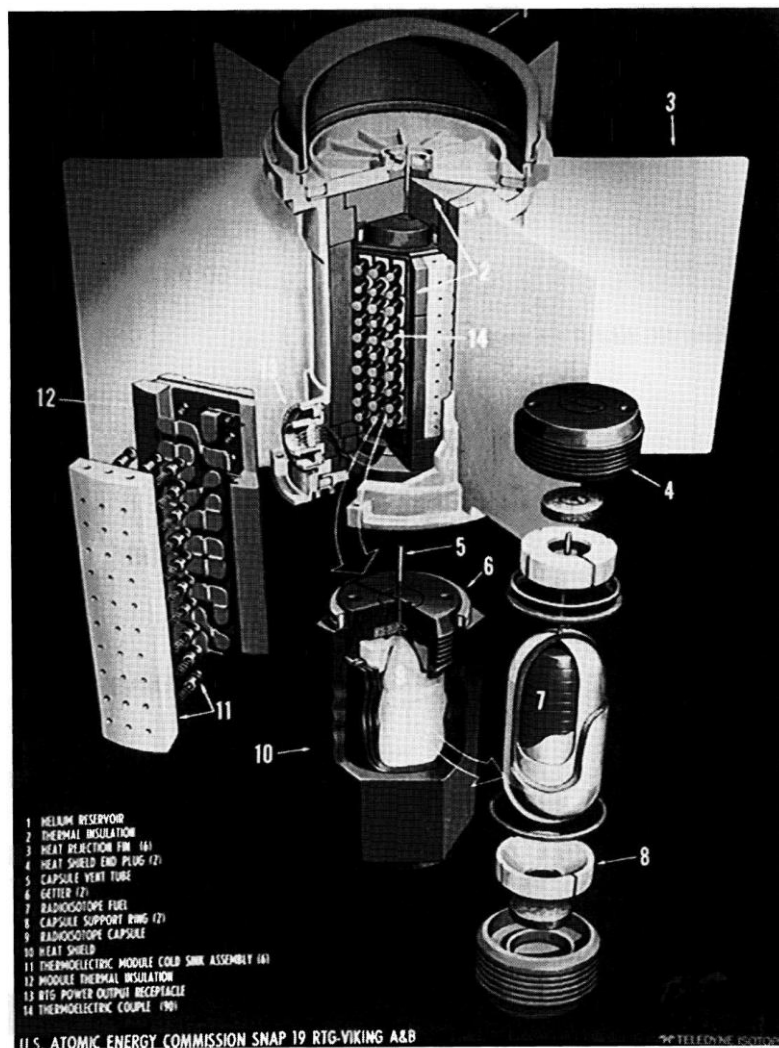


Imagen 37

#### 4.2.2.2 Generadores de aleaciones de SiGe

Tras explicar la composición de los generadores de Teluro de Plomo, nos centraremos en analizar los generadores de aleaciones de Silicio-Germanio. El uso de aleaciones de SiGe de como materiales termoeléctricos en la conversión de energía fue una consecuencia de las necesidades de que las NPS tuvieran menos masa y generaran mayor energía, es decir, la necesidad de mejores eficiencias provocó el impulso de este tipo de materiales. En general, una mayor temperatura en el lado caliente implica una mayor eficiencia, aunque la temperatura óptima viene impuesta por la duración de la misión, por ejemplo minimizando la sublimación de los materiales termoeléctricos. La temperatura del lado frío se optimizaba para obtener la relación energía-masa deseada. Las aleaciones de SiGe se pueden utilizar desde temperatura ambiente hasta una temperatura en torno a los 1300 K y ofrecen el potencial de una mayor conversión de energía junto con una mayor eficiencia. Además, las NPS compuestas de aleaciones de SiGe no necesitan una atmósfera inerte debido a que las temperaturas son menores que las necesarias para que la sublimación presente un problema. En las siguientes imágenes se muestra un esquema del generador más emblemático en esta categoría y el ciclo termodinámico que realizaba:

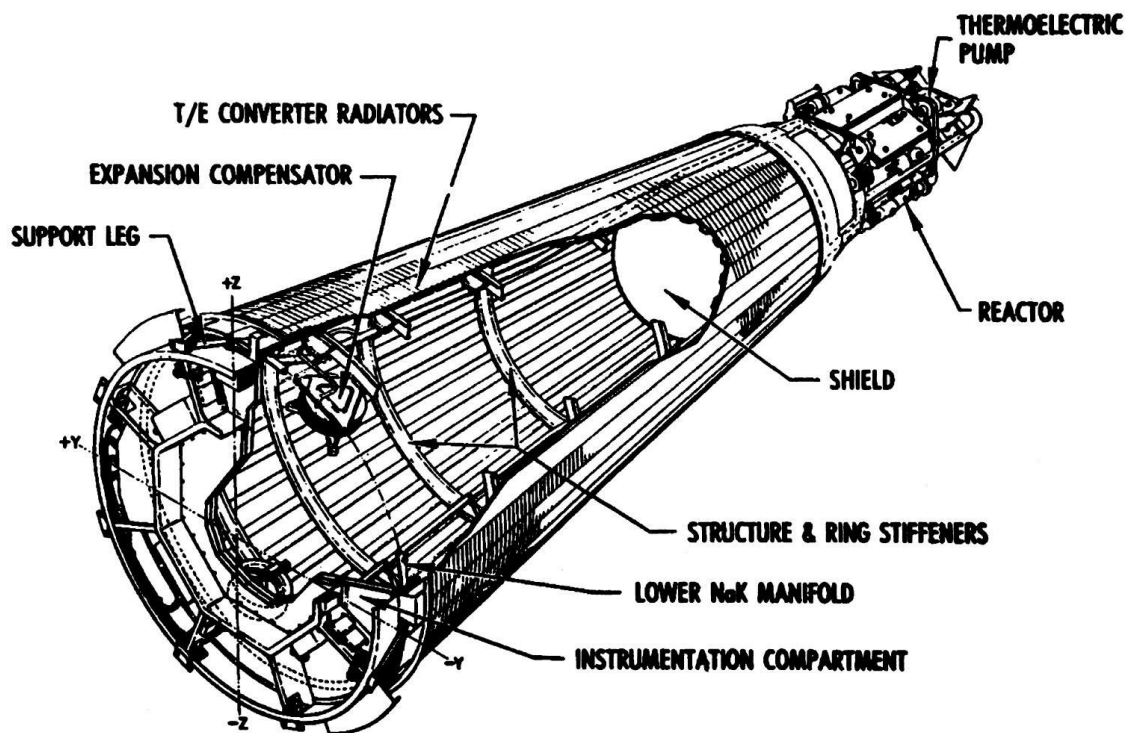


Imagen 38

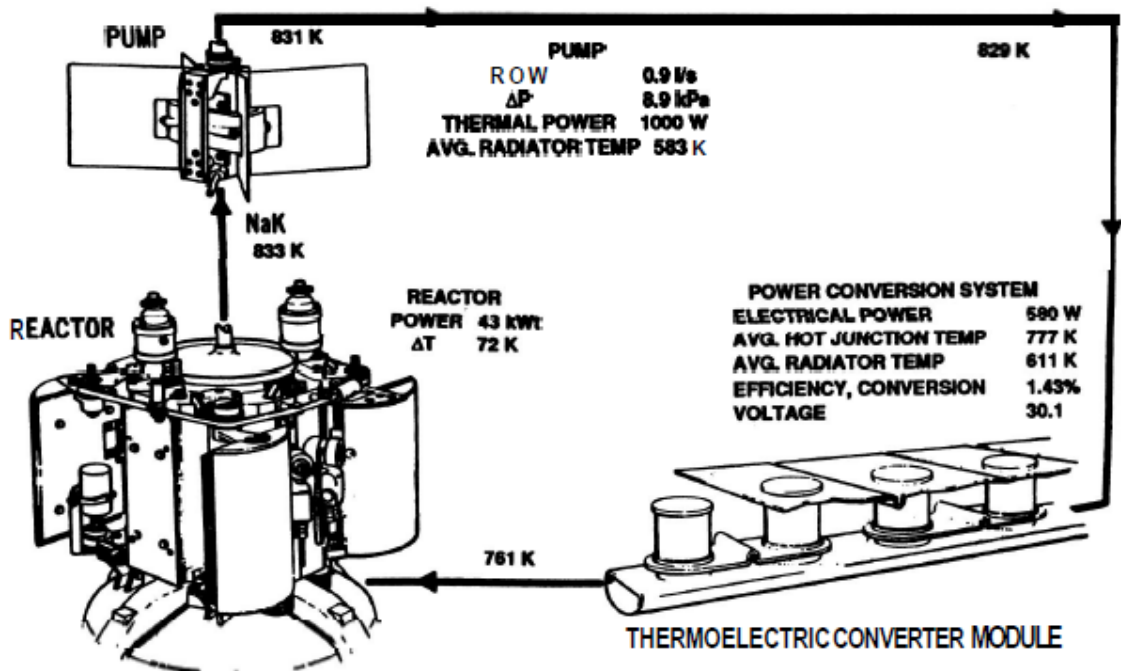
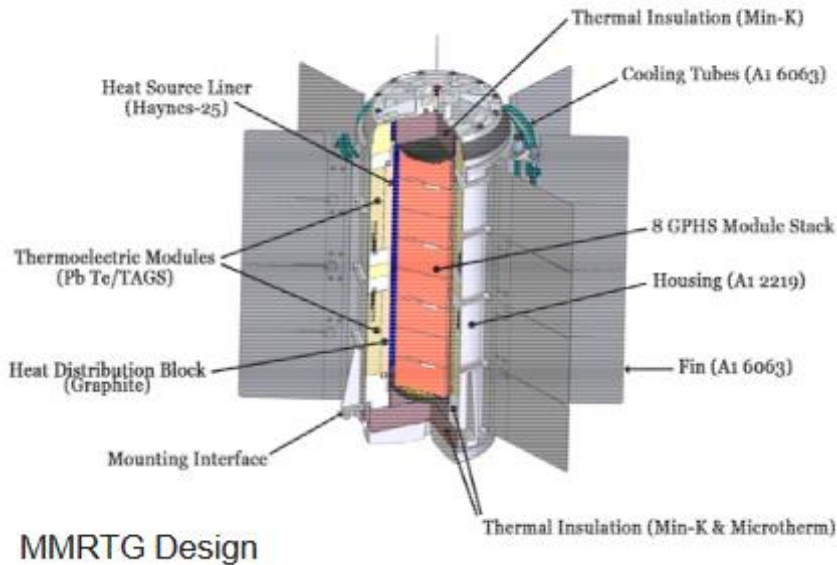


Imagen 39

#### 4.2.2.3 Misiones actuales en las que se utilizan NPS

Entre las misiones de la NASA que todavía siguen operativas destacan las misiones Voyager 1 & 2 (1977), Cassini-Huygens (1997), New Horizons (2006) y Curiosity (2011). Actualmente, las misiones Voyager 1 & 2 son las más largas que siguen en activo. Estos satélites son alimentados por tres MHW-RTGs (Multi-Hundred Watt), que utilizan dióxido de plutonio 238 como fuente de calor y pares termoeléctricos compuestos de aleación SiGe. El satélite Cassini-Huygens está alimentado por tres GPHS-RTGs (General Purpose Heat Source) y el satélite New Horizons por un GPHS-RTG. El generador termoeléctrico GPHS-RTG también utiliza dióxido de plutonio 238 como fuente de calor y pares termoeléctricos compuestos de aleación de SiGe, como el MHW-RTG. Finalmente, la última misión más destacada es la Curiosity. El rover desplegado en Marte es alimentado por un generador termoeléctrico MMRTG (Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator). Este generador termoeléctrico está basado en el RTG usado en las misiones Viking y Pioneer 10 y 11 (SNAP-19 RTG). El generador MMRTG utiliza dióxido de plutonio 238 como fuente de calor y pares termoeléctricos compuestos por PbTe, TAGS y PbSnTe, con una eficiencia en el rango del 6 o 7%. En la siguiente imagen se muestra el esquema del generador termoeléctrico MMRTG [7]:



**Imagen 40**

#### 4.2.2.4 Ventajas y desventajas de las NPS

Las principales ventajas de estos generadores son su fiabilidad y la posibilidad de que excedan los requisitos de las misiones en lo que se utilizaron, como entregar más energía de la necesaria o seguir funcionando más tiempo del que dura la misión espacial. La gran desventaja es el uso de fuentes radiactivas como fuente de calor y la posibilidad de que algún satélite, que utilice estos generadores para su alimentación, caiga sobre la superficie terrestre.

#### 4.2.3 Aplicaciones con pequeños gradientes de temperatura

La mayor parte de los generadores termoeléctricos comerciales actuales funcionan con una temperatura del lado caliente de varios cientos de grados centígrados y usan combustibles fósiles o fuentes isotópicas como fuentes de calor para generar niveles de energía eléctrica en el rango de mili-microvatios a centenas de vatios. Los generadores son utilizados en medicina especializada, aplicaciones terrestres civiles y militares y en aplicaciones espaciales. . En muchas de las aplicaciones terrestres la combinación de varias de las propiedades deseadas de los generadores termoeléctricos, en concreto, fiabilidad, la ausencia de partes móviles y robustez sopesan su pequeña eficiencia en la conversión de calor a electricidad. Sin embargo, en aplicaciones espaciales la masa del sistema y el precio como la disponibilidad del combustible son importantes y parámetros como la relación energía-masa y la eficiencia de conversión se convierten en factores tan importantes como la fiabilidad. En los últimos años, el espacio se ha convertido en una aplicación dominante y la mayor parte de la investigación se ha concentrado en mejorar el rendimiento total de los sistemas de conversión termoeléctrica. Esto se ha conseguido gracias al ligero aumento del parámetro denominado figura de mérito de los materiales termoeléctricos, reduciendo las pérdidas parásitas a través del desarrollo de mejor aislantes térmicos y aumentando las temperaturas de trabajo. Debido a lo anterior mencionado se ha prestado poca atención a la generación termoeléctrica a bajas temperaturas. Una combinación de materiales con una figura de mérito relativamente baja y a la baja eficiencia del ciclo de Carnot han hecho que sea una propuesta comercial no atractiva. Sin embargo, cuando la fuente de calor es gratis, como es el caso del calor emitido en ciertos procesos industriales, la eficiencia de conversión no es una de las principales consideraciones. Además, las mayores ventajas de los generadores termoeléctricos es que son silenciosos, no necesitan ningún fluido para funcionar y no emiten sustancias contaminantes.

#### 4.2.3.1 Fuentes

Las principales fuentes son la energía geotérmica, la energía térmica oceánica, los depósitos de turba, los estanques solares y el calor emitido en procesos industriales. La energía geotérmica es el calor natural de la Tierra que proviene principalmente del decaimiento radioactivo de los isótopos con grandes vidas media del Uranio, Torio y Potasio. Las fuentes de calor geotérmico se dividen en fuente con gran entalpía (150 °C - 200 °C) y las de baja entalpía (temperaturas por debajo de 150 °C). Hay varias áreas en los océanos, principalmente en la parte de los trópicos, en el que existe una gran diferencia de temperatura entre el agua en la superficie y a una profundidad de unos 500m, y en otras regiones, como el mar Rojo, estos cambios de temperatura ocurren en distancias aún menores que las anteriores. Los procesos de petrificación durante la formación de la turba están acompañados de un desprendimiento de energía en forma de calor, que en ciertos casos está a suficiente temperatura como para provocar combustiones espontáneas. La eficiencia de los procesos industriales puede llegar a ser del 40%, en los mejores casos. Una gran parte de la energía desperdiciada se utiliza en calentar el agua de refrigeración por encima de los 40 °C.

#### 4.2.3.2 Principales materiales utilizados

En las siguientes imágenes se muestran la variación de la figura de mérito con la temperatura y la variación de la figura de mérito para varios de los materiales termoeléctricos más utilizados en el rango de temperaturas desde temperatura ambiente hasta 150 °C:

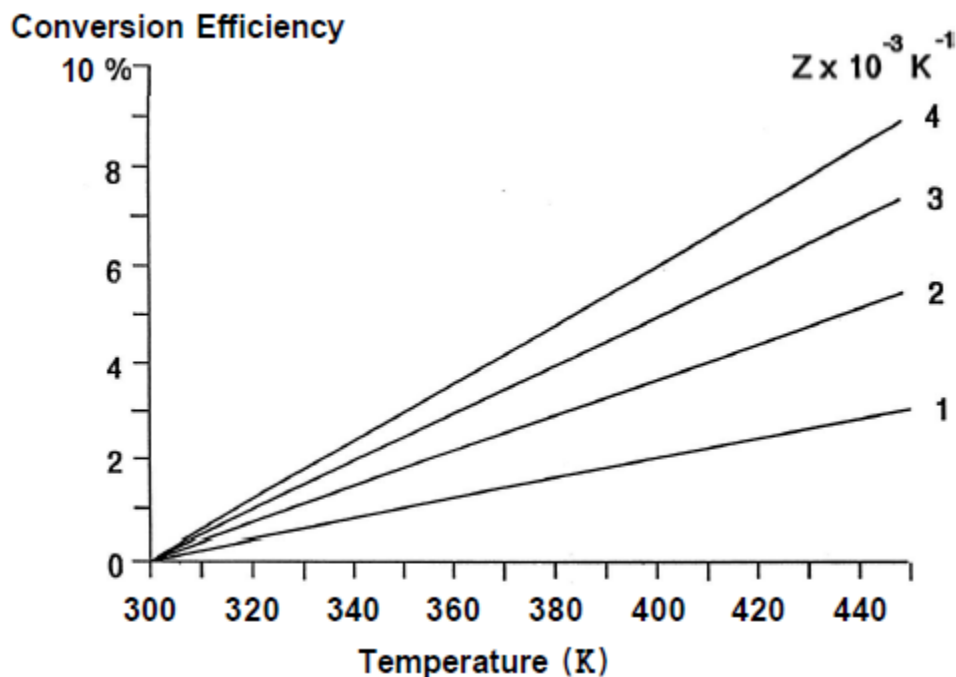


Imagen 41

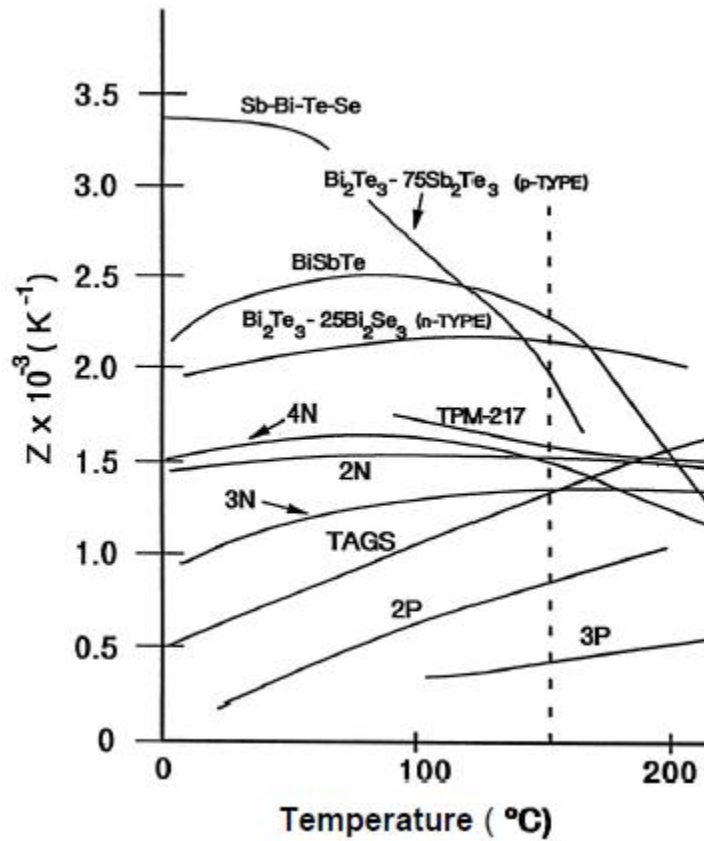


Imagen 42

#### 4.2.3.3 Aplicaciones

Entre las principales aplicaciones de la conversión termoeléctrica está el uso de dichos generadores termoeléctricos para obtener energía del agua de refrigeración de plantas industriales como fábricas acero. En la siguiente imagen se muestra la energía recuperada en diferentes fases del proceso de fabricación del acero:

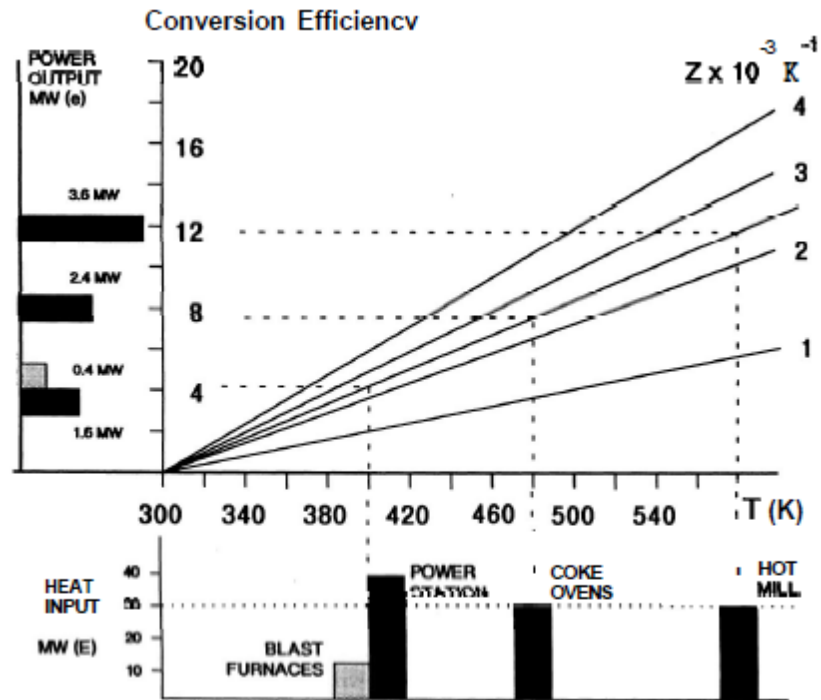


Imagen 43

Otra de las principales aplicaciones es el uso de plataformas petrolíferas en el mar del Norte para bombear agua caliente hasta la superficie para obtener energía eléctrica y transportarla hasta el continente usando cables submarinos. Debido a que la temperatura de esta agua caliente es inferior a 140 °C, no se podrían utilizar turbinas para extraer energía. Informaciones acerca del rendimiento de estas plataformas estimas que es rendimiento de Carnot es del orden del 22%, el agua caliente extraída tiene una temperatura en torno a los 90 ° C y el agua del mar en torno a 10 °C. Los termopares modernos pueden llegar a una eficiencia del 20%, que da una eficiencia total en torno al 4,4%. Por tanto, cada extractor tiene la posibilidad de producir en torno a 1 MW y, teniendo en cuenta que en cada plataforma se pueden acomodar unos 10 extractores, nos da una producción total del orden de 10 MW por plataforma.

Estas dos aplicaciones están relacionadas con alta potencia, ya que se obtienen potencias en el rango de centenas de kW y MW. Entre las aplicaciones de baja potencia (rango de W-kW o  $\mu$ W-mW) se encuentran el aprovechamiento del calor de los gases de combustión en vehículos, el aprovechamiento del calor de estufas y hornos en viviendas alejadas de núcleos urbanos y rurales [8],[9], o la generación termoeléctrica a escalas microscópicas utilizando membranas de silicio [10]

Application	Area	Material (s)	Purpose (s)	Operating temperatura (cold/hot)	Power input (output)	Conversion efficiency	Thermal efficiency
Heat engine	Vehicle	BiTe based	Cooling and heating	Not specified	n/a	n/a	Not specified
	Medical service	Not specified	Cooling	283 K/318 K	12 V/4 A	n/a	Not specified
	Electronic	CdZnTe	Cooling	283 K/313 K	3 W	n/a	Not specified
Power generations	Automobile	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , PbTe	Electricity generation	373 K/1073 K	0.5–1 kW	5–10%	n/a
	Aerospace	PbTe, SiGe	Electricity generation	366 K/783 K–1300 K	25–56 W	Not specified	n/a
	Industrial	SiGe	Electricity generation	293 K/871 K	46.8 W	4.4%	n/a
	Domestic	Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , PbTe	Electricity and hot water generation	303 K/473 K–911 K	4 W–1 kW	4.0%	60%–80%
	Thin film	ZnSb, Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	Electricity generation	Not specified	19.13 mW	Not specified	n/a
			Electricity generation	( $\Delta T = 85$ K)			

**Tabla 2 [8]**

Nota: “Not specified” significa que el resultado no está presente en la referencia; “n/a” significa que el resultado no es aplicable al parámetro.

#### 4.2.3.4 Conclusiones

Se ha podido comprobar cómo es posible obtener energía eléctrica utilizando el agua de refrigeración caliente usada en procesos industriales o las plantas petrolíferas del mar del Norte aportan una fuente de calor geotérmico. Sin embargo, la temperatura de la mayor parte del calor es tan baja que la conversión en electricidad utilizando métodos convencionales no es posible. Debido a esta razón, los generadores termoeléctricos se consideran una alternativa viable a pesar de su baja eficiencia. Otra de las desventajas de los generadores termoeléctricos es que la energía eléctrica producida es en corriente continua y sería necesario transformarla a corriente alterna para poder utilizarla en ciertos casos. En el caso de aplicaciones de baja potencia, se puede apreciar que los generadores termoeléctricos se pueden utilizar en un rango amplio de áreas.



## 5. Campos electromagnéticos

En este apartado nos centraremos en tanto en la transmisión de energía en formas de ondas electromagnéticas como en la obtención de energía a partir de ondas electromagnéticas residuales emitidas por aparatos que utilizamos en nuestra vida cotidiana. En primer lugar, analizaremos la transmisión de energía comentando un tema de gran interés en la actualidad: la carga inalámbrica de baterías de smartphones y coches eléctricos. Posteriormente, analizaremos la extracción de energía utilizando ondas electromagnéticas residuales proponiendo un modelo simple compuesto por un circuito resonador LC, en el que utilizaremos materiales ferromagnéticos.

### 5.1 Carga inalámbrica de baterías

La carga inalámbrica de baterías es un tema de interés actual debido al gran desarrollo de los smartphones y el reciente interés en los coches eléctricos como medio de transporte para reducir el uso de combustibles fósiles y las consiguientes emisiones de gases de efecto invernadero.

El primer proyecto [11] consiste en la carga de las baterías de un coche eléctrico modificando el sistema convencional de carga inalámbrica. El sistema convencional utiliza una configuración simétrica de dos bobinas en el primario y otras dos en el secundario.

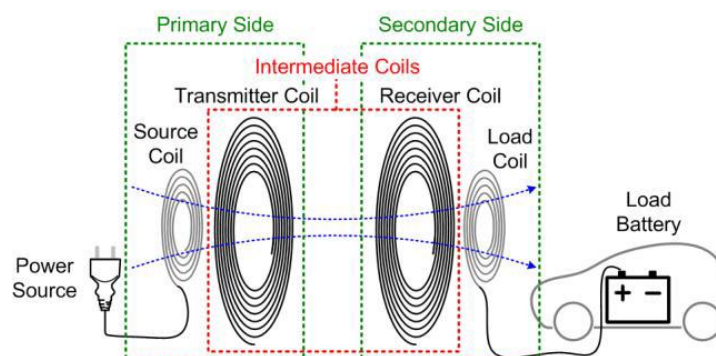


Imagen 44

Dicha modificación consiste en colocar una configuración de tres bobinas en el primario y solo una en el secundario, de esta forma se consigue aumentar el acoplamiento entre el primario y el secundario y, por tanto, aumentar la eficiencia.

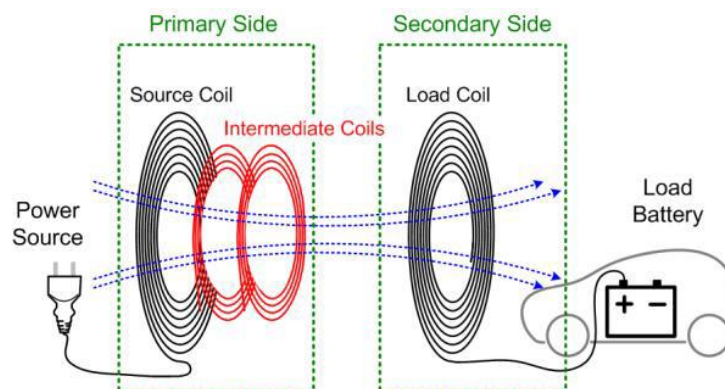
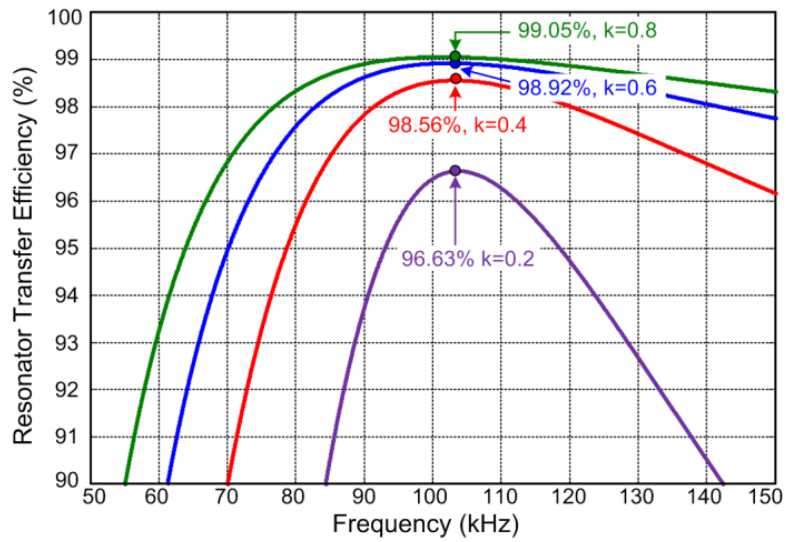
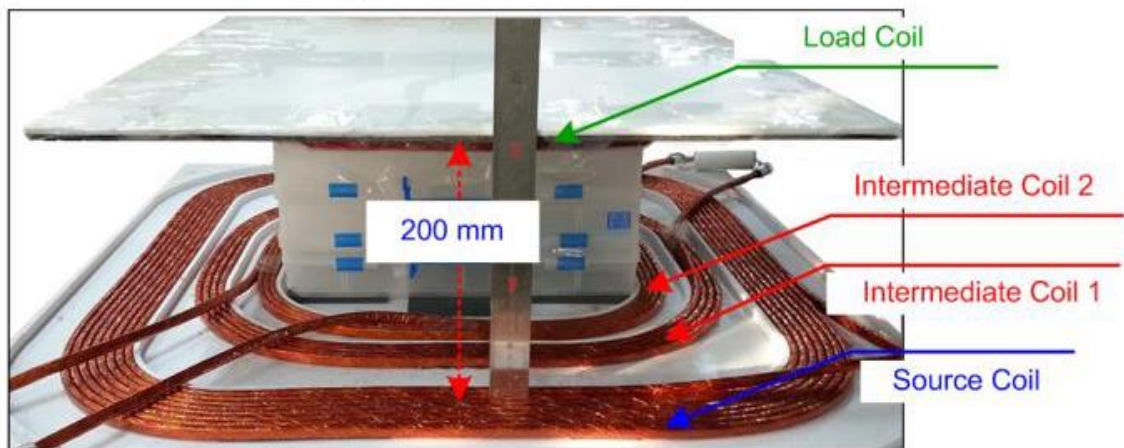


Imagen 45



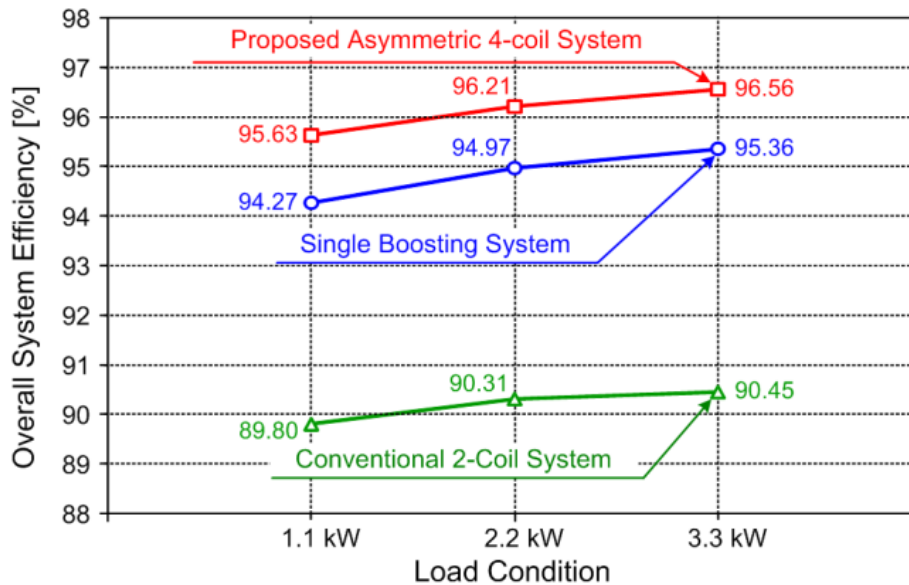
**Imagen 46**

Como se puede observar en la gráfica anterior, hay una diferencia notable en la eficiencia entre  $k=0.2$  y  $k=0.4$ , pero al ir aumentando el valor de  $k$  por encima de  $0.6$  la eficiencia empieza a saturar.



**Imagen 47**

En la siguiente imagen, se mostrará como varía la eficiencia total del sistema en los casos del sistema propuesto anteriormente, del sistema convencional de una configuración simétrica y del caso en el que solo se utiliza una bobina intermedia para aumentar el coeficiente de acoplamiento  $k$ :



**Imagen 48**

Podemos concluir que modificando el sistema convencional con una configuración simétrica al sistema propuesto se consigue una mejora de la eficiencia en la transmisión de energía cuando los bobinados primario y secundario están separados por una distancia de unos 20 cm. De esta forma se consigue una reducción de las pérdidas relacionadas con el proceso de transmisión de energía como de las pérdidas relacionadas con los circuitos electrónicos utilizados.

En la bibliografía se incluye una serie de papers en los que se utilizan otros métodos para cargar vehículos eléctricos como una pequeña scooter [12] o la transmisión tanto de energía como información [13],[14],[17]...

## 5.2 Ondas electromagnéticas residuales

En este apartado nos centraremos en el estudio de la obtención de energía a partir de ondas electromagnéticas residuales emitidas por aparatos que utilizamos en nuestra vida cotidiana, como electrodomésticos, ordenadores,.... En este tipo de aparatos tendremos componentes en el rango de 50-60 Hz debido a los sistemas de alimentación y una componente en el rango de frecuencia de decenas de kHz. En el caso de las pantallas de ordenadores, tendremos que esta componente está en el rango 15-35 kHz, mientras que en las cocinas de inducción domésticas esta componente está en el rango de 25-40 kHz. En todos estos aparatos, el campo de inducción magnético es del orden de unos pocos microTeslas ( $\mu\text{T}$ ) o unas décimas de  $\mu\text{T}$  [15].

Para la obtención de energía a partir de estas ondas electromagnéticas residuales propondremos un método sencillo compuesto por un circuito resonador LC, en el que la autoinducción será una barra bobinada de un material ferromagnético. Al utilizar un circuito resonador LC se puede obtener más energía con la misma intensidad de campo magnético que mediante el uso de un bobinado con el mismo número de espiras. Realizaremos tanto un modelo teórico como medidas experimentales. En el modelo teórico, analizaremos un circuito resonante RLC para obtener la potencia disipada en la resistencia manteniendo la frecuencia y el número de espiras constantes. En las medidas experimentales, utilizaremos un emisor de campo magnético con una frecuencia fija para realizar el estudio de receptor.

### 5.3 Montaje y medidas experimentales

El objetivo de los próximos apartados es construir un generador de campo magnético con una frecuencia en torno a 1 MHz y desarrollar un prototipo de receptor resonante en el que se buscará la mayor potencia disipada manteniendo un tamaño total del sistema comedido, es decir, se buscará que el tamaño del receptor sea lo suficientemente pequeño como para poder extraer una cantidad razonable de potencia, en el rango de mW.

#### 5.3.1 Oscilador Royer

El primer paso consiste en construir el emisor de campo magnético. Se ha elegido el oscilador Royer que operará a una frecuencia en torno a 1 MHz y que se alimentará con un voltaje de unos 10 V. El oscilador Royer consiste en un circuito en el que se une un tanque resonador LC junto con una configuración push-pull de dos transistores, ya sean BJT o MOSFET, es decir, mientras un transistor está funcionando, el otro está apagado. El diseño original del oscilador Royer consiste en la utilización de 2 transistores BJT. El uso de transistores MOSFET es debido al menor tiempo de conmutación que tienen los MOSFET en comparación con el tiempo de conmutación de los BJT. La elección del oscilador Royer como emisor de campo magnético se debe a la simplicidad en el circuito junto con el uso de un número no muy grande de componentes y a su bajo consumo. Además de la simplicidad y las características comentadas anteriormente, el oscilador Royer permite la transmisión de energía a unas distancias de varios cm, que están en el rango de distancias en las que se utilizará el receptor resonante LC que se estudiará en los siguientes apartados. La frecuencia elegida nos permite trabajar con la aproximación de “onda larga” debido a que la longitud de onda emitida es mayor que las distancias utilizadas en las medidas. El esquema circuital del oscilador Royer utilizado es el de la siguiente imagen:

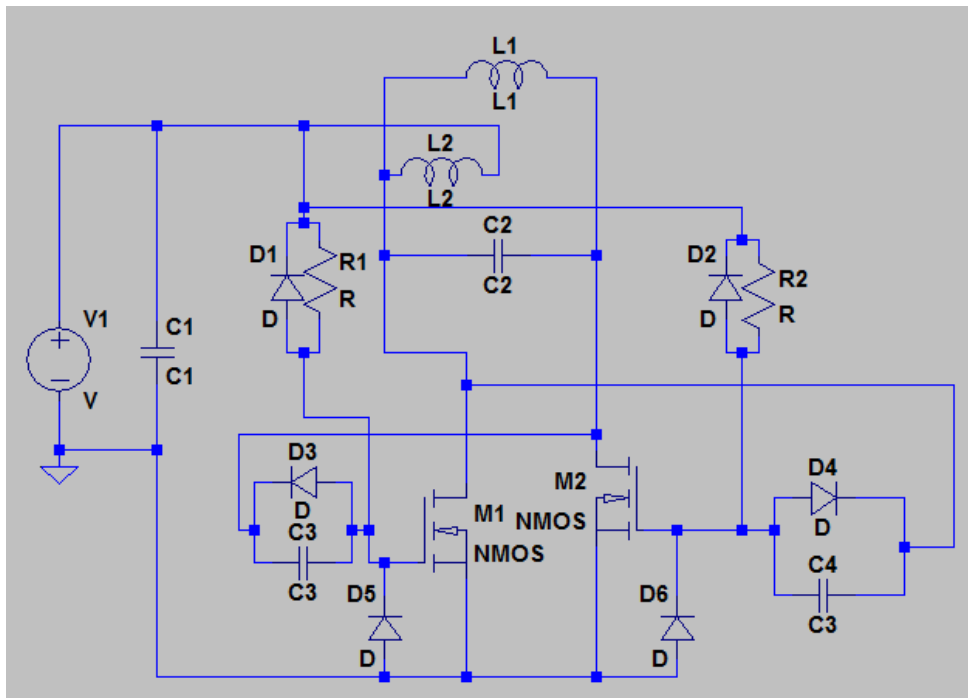
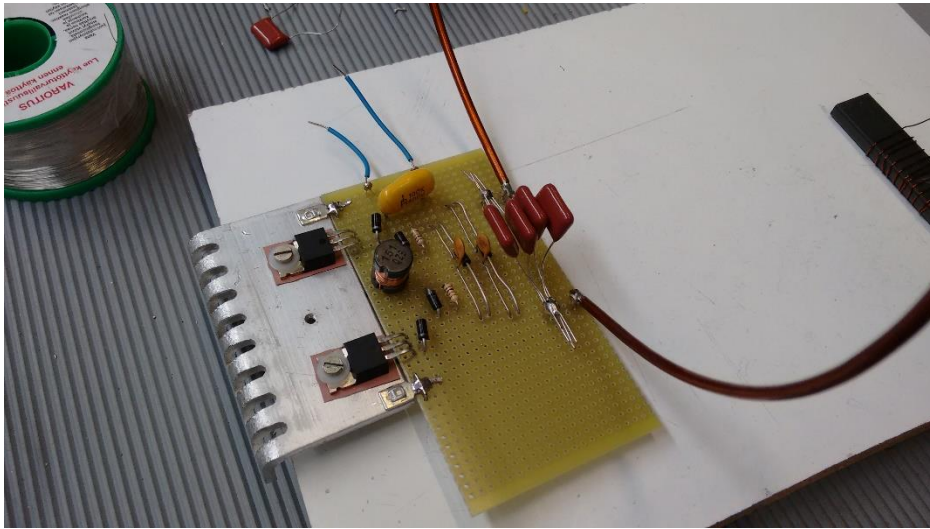


Imagen 49

En el esquema circuital anterior se han utilizado 4 condensadores de 10 nF en paralelo (condensadores marrones), que se representan por el condensador C2; 2 condensadores de 4,7 nF (condensadores tipo lenteja), que se representan por los condensadores C3 y C4; 2

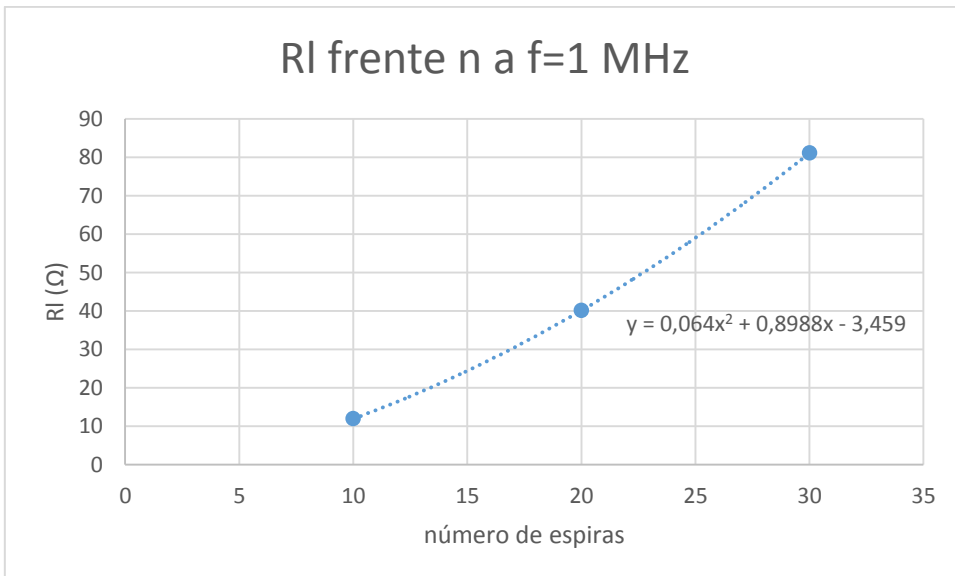
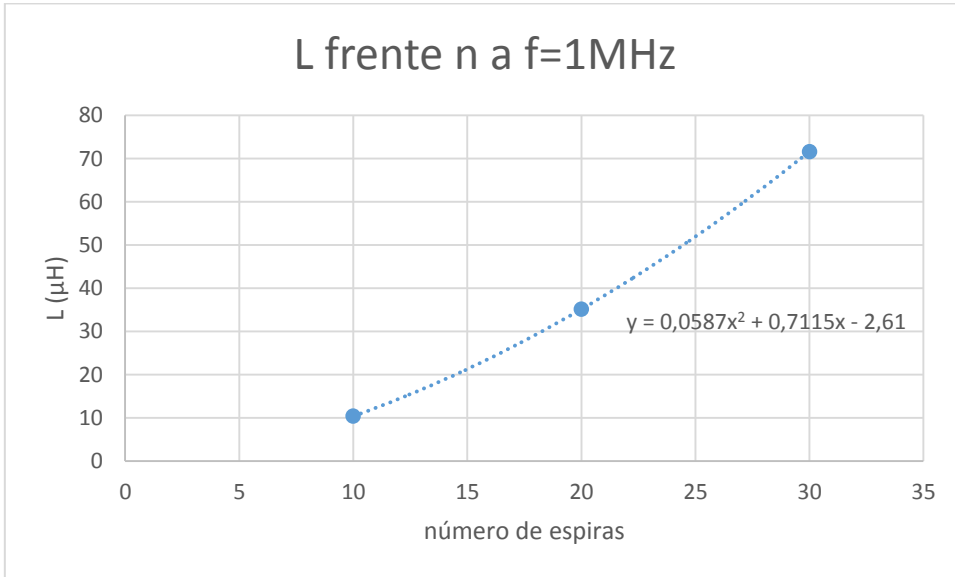
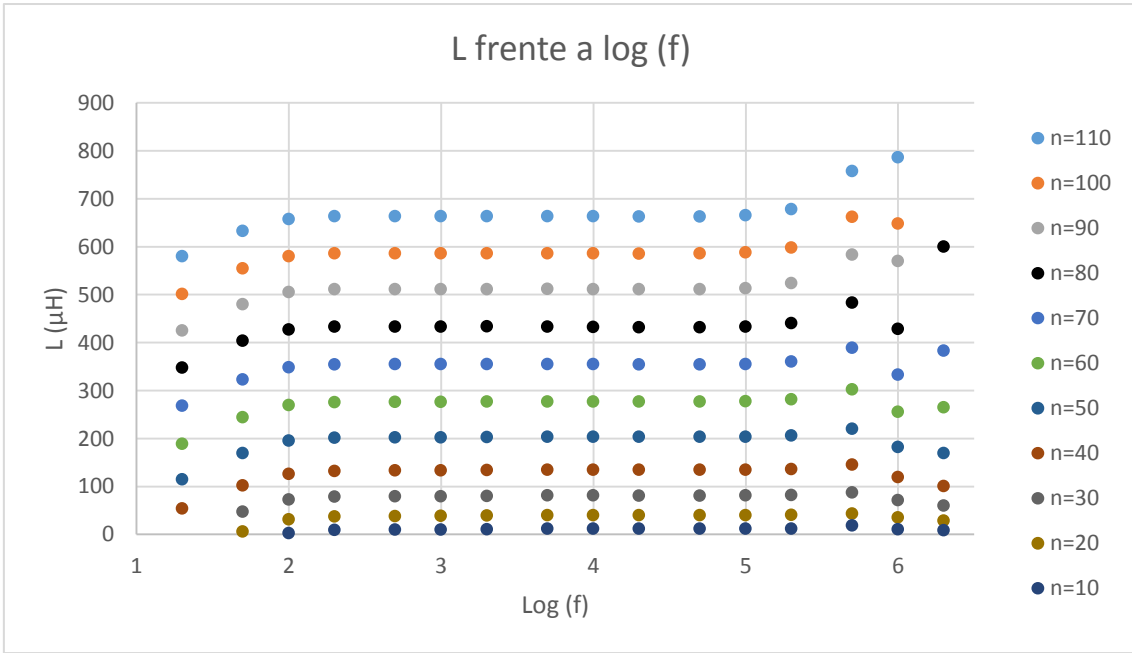
resistencias de 10 k $\Omega$ ; diodos MUR120G, transistores MOSFET IRFZ44N, un condensador de 100 nF (que actuará como filtro de la fuente de alimentación), que se representa por el condensador C1; una bobina de 150  $\mu$ H, que se representan por la autoinducción L2 y una espira de cobre de x de diámetro, que se representa por la autoinducción L1. La razón de cambiar los diodos Zener y los circuitos que están conectados a la puerta de los transistores MOSFET es debido a la mayor estabilidad en la alimentación de la puerta con los circuitos modificados que con el diseño del circuito original.



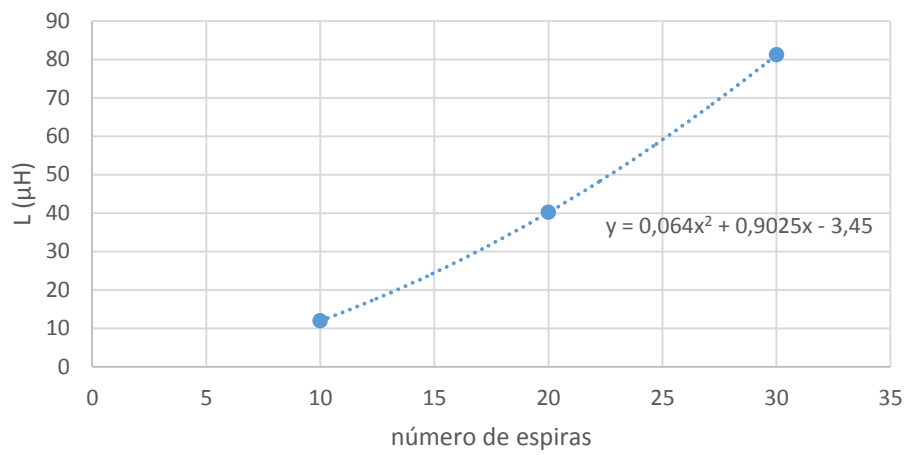
**Imagen 50**

### 5.3.2 Caracterización del núcleo ferromagnético

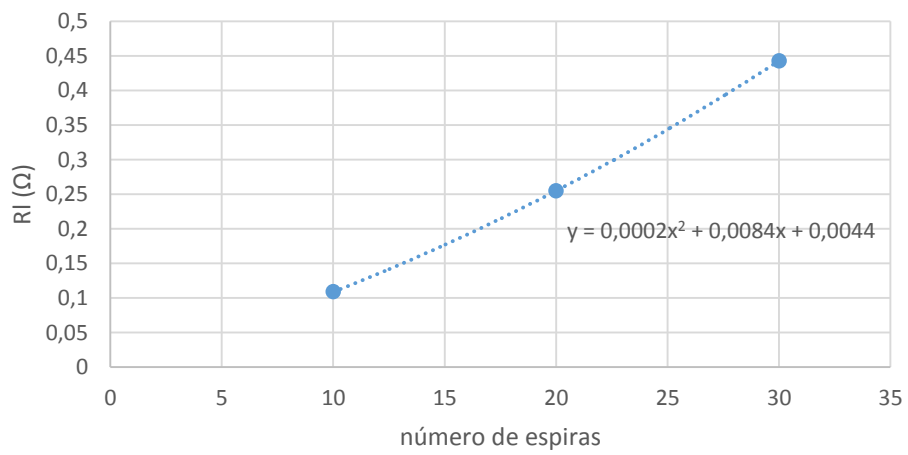
El siguiente paso consiste en analizar la barra de material ferromagnético disponible para posteriormente utilizarla en el receptor resonante LC. Para ello, realizaremos medidas de la autoinducción y de las pérdidas asociadas para distinto número de espiras y en un rango de frecuencias que varía desde los 20 Hz hasta los 2 MHz utilizando el dispositivo Agilent E4980A. Posteriormente, ajustaremos las medidas realizadas en función del número de espiras para una frecuencia fija para un número de espiras menor que 20 debido a que se busca que el tamaño del receptor no sea excesivamente grande. La razón por la que realizamos este ajuste es que utilizaremos las expresiones de L y Rl en función del número de espiras en el modelo teórico.

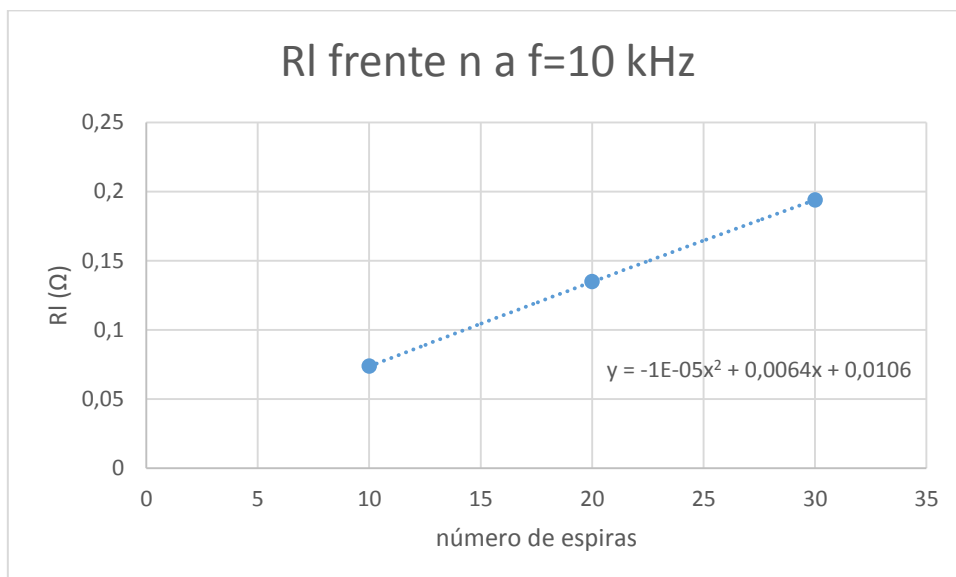
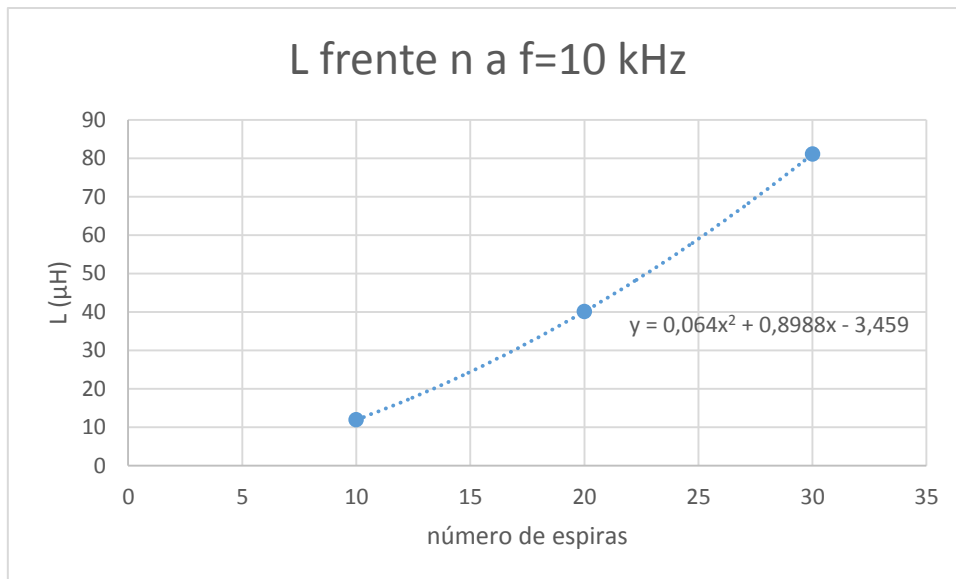


### L frente n a f=100 kHz



### RI frente n a f=100 kHz



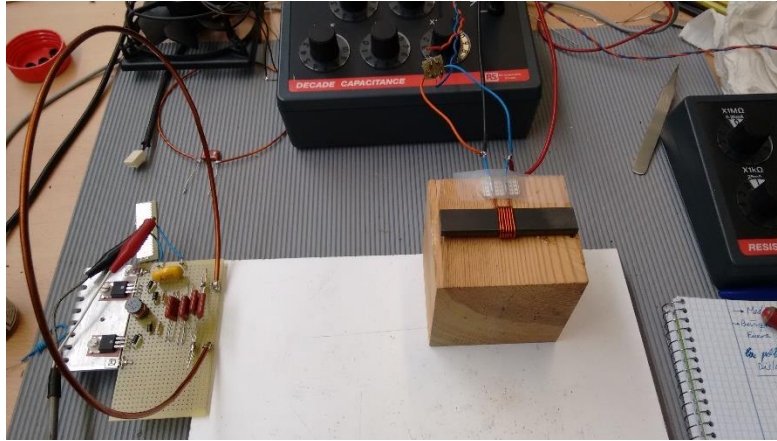


Se observa que tanto la autoinducción  $L$  como las pérdidas asociadas  $RI$  dependen de  $n^2$  y de  $n$  cuando el número de espiras es pequeño. Como ya se comentó antes, nos centraremos en este rango de número de espiras debido a que queremos que el tamaño del receptor no sea excesivamente grande. También se puede observar que el núcleo “satura” en frecuencias en torno a 1 MHz. Por tanto, el rango de frecuencias en el que sería recomendable utilizar este núcleo ferromagnético sería entre 1 kHz y 100 kHz, rango en el que se encuentran las ondas electromagnéticas emitidas por electrodomésticos.

#### 5.3.3 Medidas de la potencia disipada según el valor de $R$ y del número de espiras

El próximo paso consiste en medir la potencia disipada en función del valor de la resistencia de carga para distintos números de espiras para una distancia fija. Para ello, realizaremos el siguiente montaje:

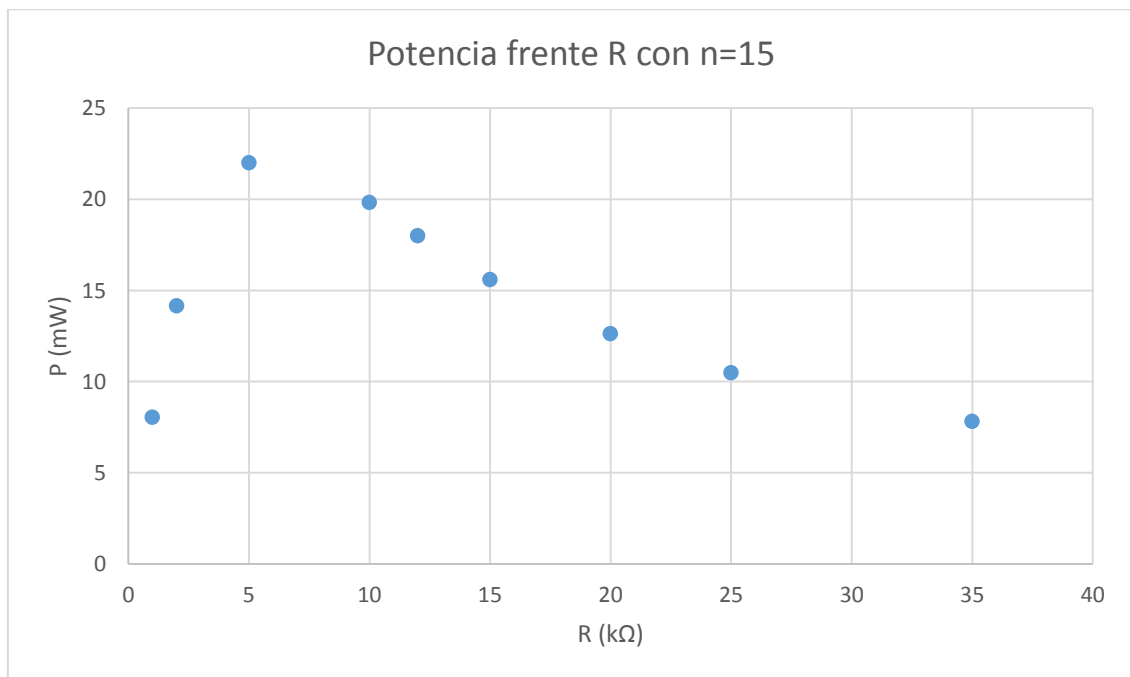


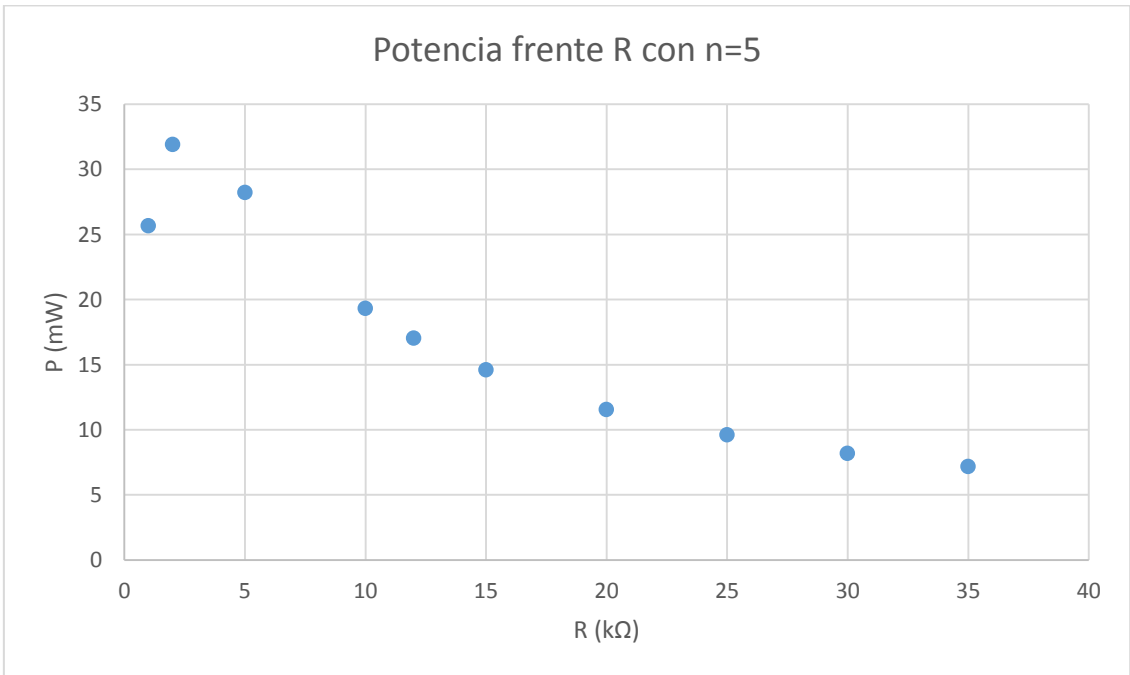
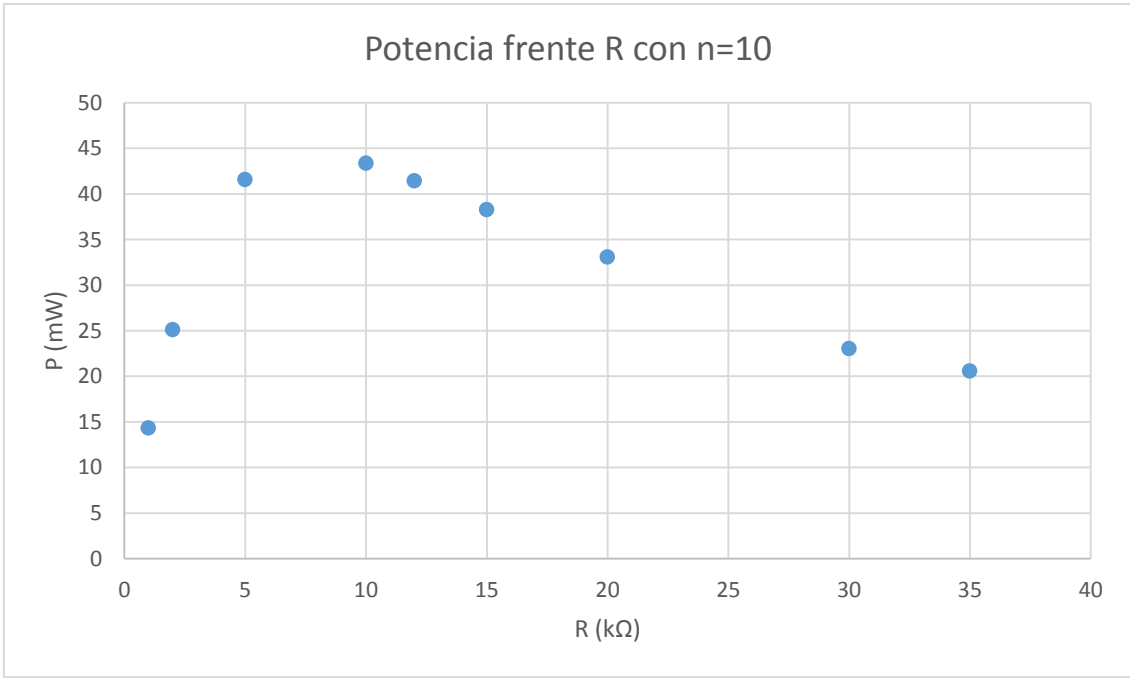


**Imagen 51**

Buscaremos la resonancia, con una resistencia del orden de  $1\text{ k}\Omega$ , utilizando la caja de condensadores y, posteriormente, mediremos el voltaje registrado en un multímetro para cada valor de la resistencia de carga deseado.

Las siguientes medidas corresponden a colocar el receptor a una distancia  $d=22\text{cm}$  respecto del emisor.





Como se puede apreciar, la potencia disipada depende de la resistencia de carga conectada al circuito. Esto también sucedía en el caso de los materiales piezoeléctricos.

### 5.3.4 Modelo teórico del receptor

Tras haber caracterizado el material ferromagnético que utilizaremos en el receptor, procederemos a realizar un modelo teórico del receptor. Para ello, primero estudiaremos el receptor como un circuito resonante RLC en paralelo sin tener en cuenta las pérdidas en la autoinducción:

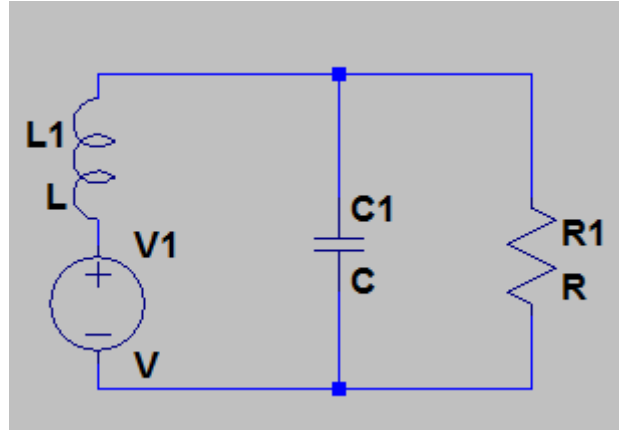


Imagen 52

En el esquema circuital anterior, L1 es la autoinducción asociada a la barra ferromagnética bobinada, C1 es el condensador necesario para que se produzca la resonancia, R1 es la resistencia de carga y V1 es las fuerza electromotriz inducida en el bobinado de la barra ferromagnética.

La fuerza electromotriz inducida en la autoinducción vendrá dada por la ley de Faraday, teniendo en cuenta un campo que varía sinusoidalmente:  $\varepsilon = |B| * \omega * S * n = k * n$ , donde  $\omega = 2 * \pi * f$ , n es el número de espiras y S es la sección de la barra. Utilizando la teoría de circuitos (ley de los nudos y caídas de potencial), llegamos a las siguientes expresiones:

$$\begin{cases} i_R * R = i_C \left( -\frac{j}{\omega * C} \right) = -i_L (j * \omega * L) + k * n \\ i_L = i_R + i_C \end{cases}$$

Despejando  $i_C$  e  $i_L$  en función de  $i_R$  y sustituyendo en la segunda fórmula, obtenemos que:

$$i_R = -j * \frac{k}{\omega * L}$$

donde se ha tenido en cuenta las condiciones de resonancia  $\omega^2 = 1/(L * C)$

Vemos que la corriente en la resistencia sería constante para un número de espiras y una frecuencia fijos, ya que no dependería del valor de la resistencia de carga utilizada. Este resultado no concuerda con las medidas obtenidas anteriormente. Por tanto, analizaremos el circuito anterior añadiendo las pérdidas en la autoinducción, es decir, añadiendo una resistencia en serie con la autoinducción ideal:

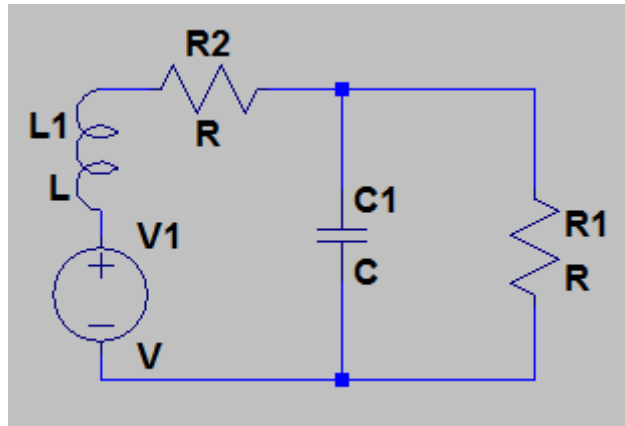


Imagen 53

En este nuevo esquema circuital, R2 es la resistencia en serie asociada a las pérdidas en la barra ferromagnética bobinada. En este caso, tendremos que las expresiones a las que llegamos son:

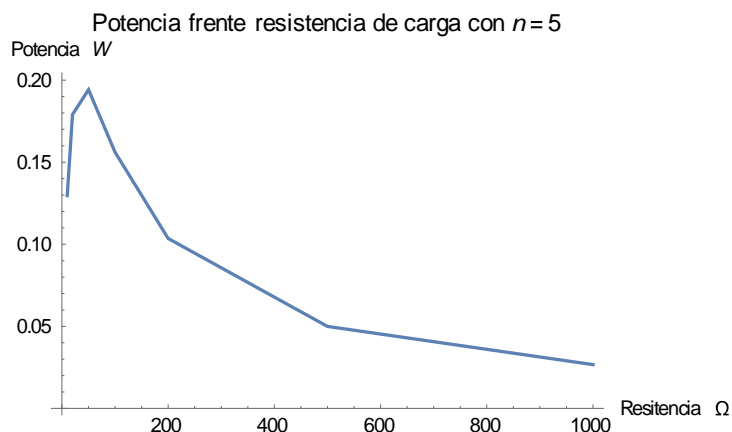
$$\begin{cases} i_R * R = i_C \left( -\frac{j}{\omega * C} \right) = -i_L(j * \omega * L + R_L) + k * n \\ i_L = i_R + i_C \end{cases}$$

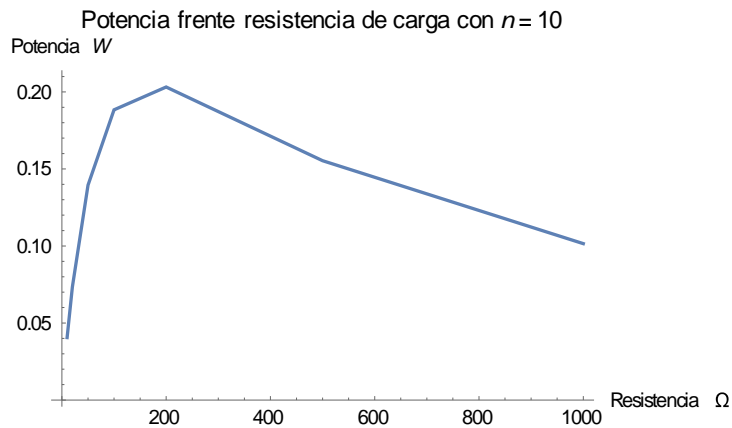
En las que si igualamos las partes reales e imaginarias a ambos lados de la igualdad, obtenemos unas expresiones de la parte real e imaginaria de la corriente compleja en la resistencia de carga:

$$\begin{cases} x = (\omega^2 * L^2 * k * n * R_L) / (\omega^2 * L^2 * R_L^2 + \omega^2 * L^2 + R_L * R) \\ y = \omega * L * k * n * (\omega^2 * L^2 + R_L * R) / (\omega^2 * L^2 * R_L^2 + (\omega^2 * L^2 + R_L * R)^2) \end{cases}$$

donde x e y son la parte real e imaginaria de  $i_R$ , respectivamente.

Finalmente, utilizando la herramienta de cálculo numérico “Mathematica” obtendremos una lista de valores de la potencia disipada en la resistencia en función del valor de la resistencia de carga para un número de espiras fijo:





### 5.3.5 Justificación de la utilización del material ferromagnético

El último paso realizado es la justificación de por qué se utiliza el material ferromagnético. Para ello caracterizaremos la autoinducción de un número determinado de espiras, con la misma sección, con y sin material ferromagnético:

	con núcleo		sin núcleo	
f (kHz)	L ( $\mu$ H)	RI ( $m\Omega$ )	L ( $\mu$ H)	RI ( $m\Omega$ )
10	4,444	8,58	1,072	6,75
20	4,443	13,15	1,084	8,55
50	4,409	25,38	1,075	13,1
100	4,402	41,4	1,0694	19,5
200	4,462	98,6	1,077	35,9
500	4,815	1925	1,1475	429,3
1000	3,4437	10231	0,8657	2230
2000	2,9788	6534	0,739	1424

**Tabla 3**

Posteriormente, mediremos la potencia disipada por la resistencia de carga en función de si está introducido el núcleo ferromagnético o no.

En ambos casos, buscaremos la resonancia para que las medidas realizadas no presenten demasiada imprecisión, es decir, buscaremos el valor de la resistencia de carga que maximiza la potencia disipada y mediremos con y sin núcleo. Adicionalmente, mediremos a distintas distancias del emisor para ver la variación debido a la presencia del núcleo ferromagnético:

	distancia (cm)	Vout (V)	P (mW)
<b>con núcleo</b>	22	4,03	16,2409
	15	10,4	108,16
	10	20,25	410,0625
<b>sin núcleo</b>	22	0,0053	0,00002809
	15	0,0213	0,00045369
	10	0,065	0,004225

**Tabla 4**

## 6. Resumen y conclusiones

En los primeros apartados hemos analizado varios métodos de obtención de energía a partir de vibraciones mecánicas y gradientes de temperaturas, junto con sus ventajas y desventajas, además de sus posibles aplicaciones. En los últimos apartados hemos propuesto un posible método de obtención de energía utilizando las ondas electromagnéticas emitidas por aparatos que utilizamos en nuestra vida cotidiana.

Hemos estudiado el receptor resonante LC desde el punto de vista experimental y teórico. Comprobamos que era necesario la introducción del núcleo ferromagnético para que la autoinducción del bobinado fuera mayor y pudiéramos hallar la resonancia fácilmente. Además de aumentar la autoinducción del bobinado, podemos apreciar cómo, a la misma distancia y con la misma geometría en ambos casos, obtenemos un voltaje de salida mayor cuando la barra ferromagnética está introducida dentro del bobinado.

También se ha obtenido que el modelo teórico realizado concuerda con las medidas experimentales realizadas, tanto el desplazamiento del máximo hacia resistencias menores al disminuir el número de espiras del bobinado como la forma de la variación de la potencia disipada en función de la resistencia de carga. Hay que tener en cuenta que las posiciones de los máximos para el mismo número de espiras no concuerdan en las medidas experimentales y en el modelo teórico, debido a que en las medidas experimentales no se está teniendo en cuenta la resistencia asociada a los diodos que están presentes en el rectificador de onda completa y otros componentes utilizados, mientras que en el modelo teórico se tiene en cuenta la resistencia de carga asociada a todo el sistema que conectamos al resonador LC.

Con los valores de la potencia extraídos se podría alimentar sensores que necesiten una potencia del orden de mW. Adicionalmente, se podría almacenar la energía extraída para alimentar dispositivos que necesiten unos pocos vatios o décimas de vatio durante un determinado período de tiempo.

En las medidas experimentales realizadas en los apartados anteriores hemos utilizados campos más intensos que los que habría cerca de los aparatos que utilizamos en la vida cotidiana. Por tanto, no nos hemos encontrado con el problema del voltaje umbral de los diodos utilizados en el rectificador, es decir, la parte de la señal que se disipa en el rectificador no afectaba demasiado a la señal de salida. Para intensidades menores de campo de inducción magnética  $B$ , tendremos que la parte de la señal disipada en el rectificador puede que sea mayor que la señal que proviene del tanque resonador LC. Este sería uno de los problemas que nos encontraríamos con campos  $B$  menos intensos y, por tanto, tendríamos que buscar unos diodos apropiados para construir el rectificador de onda completa.

Otro problema con el que nos encontramos fue la disponibilidad de barras de material ferromagnético con distintas geometrías. Debido a esta limitación, sólo se ha podido realizar medidas con una barra de sección  $1,5 \times 0,5 \text{ cm}^2$ . Resultaría interesante comprobar el efecto que tendría la geometría en el proceso de extracción de energía, al igual que probar con distintos materiales ferromagnéticos.

También resultaría interesante realizar medidas a distintas frecuencias del orden de decenas de kHz, así como estudiar cómo afectan los métodos del almacenamiento de energía (supercondensadores y baterías).

Tras analizar todos los inconvenientes que podrían aparecer en posteriores análisis, podemos concluir que con los valores utilizados de campo magnético y con unas distancias de unos 20 cm sería posible la extracción de energía utilizando el método propuesto. Faltaría comprobar la eficacia de este método en frecuencias del orden de decenas de kHz e implementar algún método de almacenamiento para poder utilizar la energía extraída para alimentar algún dispositivo que necesite una potencia mayor.



## 7. Bibliografía y referencias

- [1] Henry A. Sodano, Daniel J. Inman and Gyuhae Park, **Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices**, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 2005 16: 67
- [2] Youngsu Cha, Woojin Chae, Hubert Kim, Horace Walcott, Sean D. Peterson, Maurizio Porfiri, **Energy harvesting from a piezoelectric biomimetic fish tail**, *Renewable Energy* 86 (2016) 449e458
- [3] J W Sohn, S B Choi, D Y Lee, **An investigation on piezoelectric energy harvesting for MEMS power sources**, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 2005 219: 429
- [4] Songye Zhu, Wen-ai Shen, You-lin Xu, **Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing**, *Engineering Structures* 34 (2012) 198–212
- [5] K Ylli, D Hoffmann, A Willmann, P Becker, B Folkmerand Y Manoli, **Energy harvesting from human motion: exploiting swing and shock excitations**
- [6] D.M.Rowe, **Handbook of Thermoelectrics**
- [7] <http://solarsystem.nasa.gov/rps/home.cfm>
- [8] X.F.Zheng, C.X.Liu, Y.Y.Yan, Q.Wang, **A review of thermoelectrics research – Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32(2014)486–503
- [9] Ashwin Date, Abhijit Date, Chris Dixon, Aliakbar Akbarzadeh, **Progress of thermoelectric power generation systems: Prospect for small to medium scale power generation**, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33(2014)371–381
- [10] A.P.Perez-Marín, A.F.Lopeandía, Ll.Abad, P.Ferrando-Villaba, G.Garcia, A.M.Lopez, F.X.Muñoz-Pascual, J.Rodríguez-Viejo, **Micropower thermoelectric generator from thin Si membranes**, *Nano Energy*(2014) 4, 73–80
- [11] SangCheol Moon, Gun-Woo Moon, **Wireless Power Transfer System with an Asymmetric 4-Coil Resonator for Electric Vehicle Battery Chargers**
- [12] Werachet Khan-ngern and Heinz Zenkner, **Wireless Power Charging on Electric Vehicles**, *Proceedings of the International Electrical Engineering Congress* 2014
- [13] S. Y. Hui, **Planar Wireless Charging Technology for Portable Electronic Products and Qi**
- [14] Chih-Cheng Huang, Yuan-Kang Wu, Chun-Liang Lin, **Transmission of Power and Data for Contactless Dynamic Charging**
- [15] **InformeTec\_20012001\_05\_11**, informe técnico del ministerio de sanidad
- [16] D. John Doyle, **The Rise and Fall of the Nuclear Pacemaker**
- [17] S. Barmada, M. Tucci, M. Raugi, M. Dionigi, P. Mezzanotte, **Experimental Validation of a Hybrid Wireless Power Transfer - Power Line Communication System**
- [18] Steven R Anton, Henry A Sodano, **A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006)**, *Smart Mater. Struct.* 16 (2007) R1–R21