



Escuela
Politécnica
Superior

Diseño de esquemas de computación autónoma para el desarrollo del Internet de las Cosas



Grado en Ingeniería en Sonido e Imagen
en Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor:

Paola Sánchez Pinedo

Tutor/es:

Higinio Mora Mora

Enero 2018



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Resumen

Hoy en día, el número de dispositivos inteligentes conectados crece a grandes velocidades y supone un consumo energético muy elevado. A esto añadimos que el Internet de las Cosas pretende hacer de nuestras ciudades del futuro las denominadas *Smart Cities*. Estas ciudades llenas de sensores elevarán este consumo energético de forma considerable y supondrán un gran gasto a nivel de mantenimiento si hacen uso de las baterías convencionales.

Por ello, cobra importancia el estudio de las tecnologías basadas en *energy harvesting*. Estas aplicaciones de recolección de energía nos permitirán obtener energía ilimitada y respetuosa con el medioambiente. Además, nos ahorrará el tener que sustituir microbaterías en los millones de sensores que habrá colocados por las ciudades, lo que reducirá costes y tiempo, además de reducir la contaminación. Con lo cual, debemos hacer un estudio de cuáles de estos métodos resultan más interesantes para las aplicaciones que componen una *Smart City* y, por lo tanto, en cuáles merece la pena invertir nuestro tiempo.

«A lo largo del espacio hay energía, y es una mera cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía.»

Nikola Tesla

Índice general

| | |
|---|----|
| Resumen | 2 |
| Introducción | 7 |
| Motivación y objetivos | 9 |
| Energía de cosechamiento | 10 |
| Estructura genérica de los sistemas <i>energy harvesting</i> | 11 |
| Fuente de alimentación | 11 |
| Captación y tratamiento | 11 |
| Almacenamiento | 12 |
| Almacenamiento en baterías o microbaterías | 12 |
| Almacenamiento en supercondensadores | 13 |
| Comparativa: baterías o supercondensadores | 14 |
| Métodos de recolección de energía | 17 |
| Generadores piezoeléctricos | 17 |
| Generadores electrostáticos | 18 |
| Generadores electromagnéticos | 20 |
| Generadores termoeléctricos | 22 |
| Generadores fotovoltaicos | 23 |
| Generadores RF (radiofrecuencia) | 24 |
| Aplicaciones reales | 26 |
| Aplicaciones con piezoeléctricos | 26 |
| Aplicaciones con electrostáticos | 27 |
| Aplicaciones usando electromagnetismo | 29 |
| Aplicaciones con termoeléctricos | 32 |
| Aplicaciones con fotovoltaicos | 34 |
| Aplicaciones con radiofrecuencia (RF) | 35 |
| Comparación de las aplicaciones: viabilidad | 40 |
| Comparación de las aplicaciones: energía | 45 |
| El Internet de las cosas y las <i>Smart Cities</i> | 55 |
| Conclusiones | 61 |
| Bibliografía | 63 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Imagen de una microbatería [13]..... | 13 |
| Figura 2 - Gráfica comparativa de tratamiento de energía en ambos dispositivos. [11] | 15 |
| Figura 3 - Modos de piezoeléctricos: opción a (izquierda) y opción b (derecha) [17]. ... | 17 |
| Figura 4 - Modelo genérico de un generador piezoeléctrico [11]. | 18 |
| Figura 5 – Tipos de generadores electroestáticos: (a) plano de superposición, (b) plano de cierre de hueco, (c) fuera de plano [17]. | 19 |
| Figura 6 - Ejemplo circuito genérico de un generador electroestático [10]. | 20 |
| Figura 7 - Dos tipos de generadores electromagnéticos [17]. | 21 |
| Figura 8 - Modelo genérico de un generador electromagnético [11]. | 21 |
| Figura 9 - Modelo genérico de generador termoeléctrico [11]. | 22 |
| Figura 10 - Esquema de un termopar (izquierda) y una termopila (derecha) [18]. | 23 |
| Figura 11 - Modelo genérico de un generador fotovoltaico [11]. | 24 |
| Figura 12 - Esquema de un sistema por radiofrecuencia [20]. | 25 |
| Figura 13 - Topes de gel de silicona colocados en los diferentes transductores piezoeléctricos [21]. | 26 |
| Figura 14 - Esquema del dispositivo de recolección de energía electroestático de la aplicación [26]. | 28 |
| Figura 15 - Esquema de la estructura del electrodo basado en un electreto angular [26]. | 29 |
| Figura 16 - Esquema del diseño del generador plano rotacional. [28]. | 30 |
| Figura 17 - Esquema del diseño del generador plano rotacional vista de sección. [5] ... | 30 |
| Figura 18 - Prototipo final del generador comparando el tamaño con una moneda [5]. | 31 |
| Figura 19 - Resultados con la prueba caminando (izquierda) y corriendo (derecha) [5]. | 31 |
| Figura 20 - Esquema del transductor termoeléctrico para aplicación en una muñeca [30]. | 33 |
| Figura 21 - Resultados del experimento en circuito abierto en reposo y movimiento [30]. | 33 |
| Figura 22 - Fotografía de la pulsera flexible en la muñeca [31]. | 34 |
| Figura 23 - Transmisión de potencia con el rúter original [32]. | 36 |
| Figura 24 - Resultados con el sensor de temperatura sin batería y con batería [32]. | 37 |
| Figura 25 - Resultados con la cámara sin batería y con batería [32]. | 38 |
| Figura 26 - Cargador USB por WiFi [32]. | 39 |
| Figura 27 – Algunos sistemas que forman una Smart City [42]. | 55 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 - Comparativa de características de baterías y supercondensadores. [16] | 15 |
| Tabla 2 - Energía obtenida en diferentes ambientes [31]. | 35 |
| Tabla 3 - Usuarios, dispositivos y rúter cercanos por cada vivienda del estudio [32]. .. | 38 |
| Tabla 4 - Resultados de WattUp 2015 [36]. | 40 |
| Tabla 5 - Resumen aplicaciones con ventajas y desventajas. | 42 |
| Tabla 6 - Valores recogidos de las figuras 24 y 25 para distancias específicas. | 50 |
| Tabla 7 - Resumen energético de las distintas aplicaciones mencionadas previamente. | 51 |

Introducción

El internet de las cosas es una forma de dar *vida* a los objetos cotidianos para que se puedan comunicar tanto entre ellos como con nosotros. Hace 30 años, esto parecería algo totalmente innecesario y quizás, imposible. Sin embargo, los dispositivos inteligentes han entrado de lleno en nuestras vidas y la comodidad que nos ofrecen en nuestro día a día hace impensable su desaparición. Según un estudio realizado por Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG) [1], a partir de la aparición del internet de las cosas alrededor de 2008, el uso de dispositivos creció considerablemente entre la población. De tal forma que empezaron a existir más dispositivos conectados que personas.

La entrada del internet de las cosas a nuestra vida vino acompañada de un desarrollo de los dispositivos muy rápido. Los teléfonos móviles pasaron de ser grandes aparatos que solo servían para llamar y mandar mensajes, a un rectángulo de menos de 1 cm de grosor que nos ofrece prácticamente lo mismo que un portátil. Además, en los últimos años se ha incrementado el uso de dispositivos como relojes inteligentes o cascos inalámbricos. Todos ellos forman parte de los dispositivos de bajo consumo energético o más conocidos como dispositivos ULP (*ultra low power*). Con ello, las baterías han tenido que adaptarse a los nuevos tiempos y ofrecer energía en unas medidas muy reducidas.

El primer problema que nos encontramos es que las baterías tienen fecha de caducidad y debido al pequeño tamaño de los dispositivos es muy complicado cambiarlas. Todo el mundo ha experimentado ese gran cambio en los teléfonos móviles, cuando la batería dejó de ser extraíble [2] y, por lo tanto, sustituible fácilmente si no funcionaba correctamente. En otras palabras, cuando la batería de cualquiera de mis dispositivos muera, tendré que enviar el dispositivo a cambiar la batería o comprar otro.

El segundo problema sería el alto consumo de energía por parte de un solo individuo o mejor dicho, la energía que debe obtener el individuo para su comodidad directa. La energía inconsciente que consume una persona al día durante su interacción en el mundo es muy alta, ya sea usando los semáforos de la calle, el ordenador en la oficina o con todos los electrodomésticos del hogar. La demanda energética en España es tan alta

que deben comprar energía a otros países [3]. Por otro lado, hay otra energía que consumimos de la que somos claramente conscientes.

Hoy en día hay muchas personas que en su día a día usan un *smartphone*, una *tablet*, una *smartband*, un *laptop*, etc.; todos ellos con necesidad de tener batería el tiempo que estamos fuera de casa. Toda esta dependencia lleva consigo una nueva responsabilidad: mantener mis dispositivos con batería suficiente. Esta dependencia ha llegado incluso a crear una nueva enfermedad para aquellos que el quedarse sin batería en su móvil, entre otras cosas, les produce ansiedad: nomofobia [4]. Los parches por parte de la sociedad ante este problema parece que fueron poner enchufes abundantes en aeropuertos, estaciones y lugares donde la gente tiene largas esperas. Además del uso de baterías externas o *powerbanks*.

Motivación y objetivos

Viendo la necesidad en la que se ha convertido disponer de energía las 24 horas del día y el gran uso de dispositivos inteligentes por parte de la población, se pretende estudiar una forma de autoabastecimiento de estos dispositivos que resulte interesante a nivel energético y a nivel de viabilidad de la implantación. El desarrollo de estos nuevos sistemas podría frenar la gran dependencia energética de fuentes agotables de energía y frenar el impacto ambiental que se produce en su obtención. Además de añadir la comodidad de tener energía libre del ambiente y no tener que depender de enchufes ni cables.

Partimos de las energías renovables en el mundo de los microvatios (μW) y estudiamos cómo obtienen la energía estos sistemas y qué diferentes formas hay para conseguirla del mundo que nos rodea. Además, estudiaremos algunas aplicaciones existentes de los métodos mencionados con el fin de comparar su aporte energético. Pese a las diferentes técnicas que existen, una de las más interesante es la energía por radiofrecuencia por su gran presencia en el entorno e independencia. Por último, se pretende estudiar qué futuro podría tener dentro de una *Smart City* estos métodos.

Energía de cosechamiento

El término *energy harvesting* hace referencia al proceso por el cual obtenemos energía del ambiente con el fin de acumularla o utilizarla para sistemas que tengan bajo consumo. Como todos sabemos cosechar es la acción que se realiza en la agricultura cuando se plantan semillas y se esperan a que maduren para recogerlas. Luego, recibe este nombre porque esperamos a que el dispositivo almacene cierta cantidad de energía para luego usarla en una función específica, véase calcular la temperatura del agua cada hora. No en todos los casos el sistema almacena la energía, a veces, simplemente la transforma y la transfiere [5].

Estos sistemas de bajo consumo pretenden ser totalmente autónomos, ya que se alimentan de energías residuales del ambiente y no de una fuente de alimentación eléctrica convencional. Además de que son capaces de administrar esa energía almacenada y suministrarla cuando sea necesario [6].

Estructura genérica de los sistemas *energy harvesting*

Los sistemas de recolección de energía suelen estar formados por cuatro partes independientemente del tipo de sistema, realizan las mismas funciones:

Fuente de alimentación

Aunque no están dentro del sistema de recolección en sí, necesitamos una fuente de energía con la que poder adaptar el diseño del resto del sistema.

Algunos de las fuentes de energía [7][8] más usados son:

- **Térmica.** La energía proviene de calentadores, fuentes de fricción o diferencias de temperatura.
- **Mecánica.** Estas fuentes son generadas por vibraciones o tensiones mecánicas.
- **Electromagnética o radiofrecuencias.** Estaciones base, Wifi, radio, TV, imanes, etc.
- **Medio ambiente.** Las más conocidas y las que ofrecen mayor cantidad de energía como son el viento, las corrientes de agua o la energía solar.
- **Lumínica o en forma de luz.** Energía capturada por sensores proveniente de las luces artificiales.
- **Cuerpo humano.** Energía proveniente de movimientos del cuerpo como caminar o de la temperatura corporal.

Captación y tratamiento

Necesitaremos un sistema que recoja la energía suministrada por la fuente. La energía podrá ser una corriente continua (DC) o una corriente alterna (AC). Las primeras generan una corriente y una tensión constante, y las segundas producen una señal no continua.

Cuando obtengamos esa energía necesitamos un elemento que transforme la energía obtenida en energía eléctrica útil, es decir, necesitamos modificar la energía que recibimos para que sea válida para la aplicación. El tipo de energía que es captada suele tener tres características que complican el sistema: una potencia no continua y con interrupciones, una potencia de media muy baja y una tensión de salida no regulada [6].

Por lo general, para poder suministrar la energía se tiene que convertir a corriente continua para poder usarla en el sistema y aplicación final. Según el tipo de corriente que queramos modificar tenemos:

- **Sistemas rectificadores AC / DC.** Si la corriente que está siendo captada es una corriente alterna tenemos que convertirla a corriente continua. El convertidor puede ser de media onda o de onda completa. La diferencia entre ambos es que el primero elimina la parte negativa o la positiva de la señal en alterna y el segundo lo que hace es transformarla a su inverso, es decir, lo señal positiva se vuelve negativa o viceversa [10].
- **Sistemas convertidores DC / DC.** Una vez conseguida la corriente continua, se tiene que conseguir que la tensión tenga el nivel necesario para poder alimentar a la aplicación. Estos convertidores se suelen usar para adaptar el voltaje a los requisitos del sensor o batería.

Almacenamiento

Un módulo que sea capaz de almacenar la energía recogida y administre su uso dependiendo del elemento que va a abastecer. En estos sistemas se suele obtener poca cantidad energía residual, luego se suele almacenar hasta tener la suficiente para que el sistema o la aplicación pueda actuar. Los dos sistemas más usados son:

Almacenamiento en baterías o microbaterías

Una batería es un elemento que se encarga de acumular energía eléctrica para luego usarla. Las baterías pueden ser de dos tipos recargables o no recargables, y a partir de ahí se pueden clasificar según los materiales con los que se fabrican. En este caso las baterías más apropiadas serían las recargables, dado que los sistemas de *harvesting* suelen tener pequeño tamaño y el cambio constante de baterías sería engorroso y difícil.

Si ahondamos en el tema de carga de batería y para saber en cuánto tiempo se recargaría la batería de nuestro sistema, debemos fijarnos en la velocidad de la misma que viene definida por la capacidad en miliamperios/hora (mAh). Si tengo una batería de 600 mAh tardaría en cargarla con una fuente de 600 A (amperios) un total de 1 hora. El tiempo va aumentando conforme bajemos los amperios [11].

En los últimos años ha cogido gran importancia fijarse en la capacidad de la batería por la necesidad de estar conectado en cualquier circunstancia. Por ejemplo, con el aumento del uso de *Powerbanks* o baterías portátiles. Los miliamperios/hora era un concepto más técnico, pero con las nuevas necesidades la población está más informada. Además, con el aumento de estas nuevas necesidades aparece el desarrollo de las microbaterías. Cada vez usamos más dispositivos pequeños, véase relojes inteligentes o un simple mp3 que va en la oreja, y necesitamos una batería muy pequeña con una capacidad de carga alta. Por esto, las microbaterías están siendo foco de estudio para satisfacer la demanda y lograr mejorar esta capacidad [12].

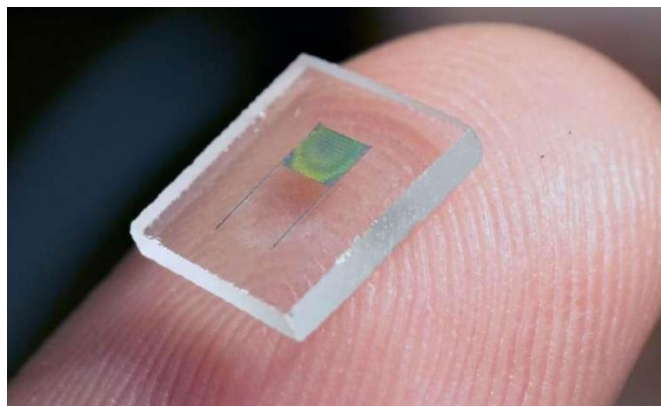


Figura 1 - Imagen de una microbatería [13].

Almacenamiento en supercondensadores

El objetivo de un condensador, al igual que las baterías, es el de almacenar energía. En este caso un condensador está formado por dos placas de metal que están separadas por un dieléctrico, el cual puede ser líquido, gaseoso o sólido o la combinación de estas formas. Para calcular la capacidad de un condensador tenemos que hacer uso de la ecuación (1) [11].

$$C = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{D} \quad (11)$$

La capacidad del condensador (C) depende de la permitividad en el espacio (ϵ_o), la permitividad relativa del material dieléctrico (ϵ_r), el área de la superficie de cada placa o electrodo (A) y la distancia entre placas o electrodos (D). La permitividad nos indica cómo el campo eléctrico afecta al medio y viceversa [14]. Para obtener mayores

capacitancias se usan electrodos con mayor área en superficie y dieléctricos menos gruesos.

En este caso hablamos de supercondensadores o ultracondensadores, los cuales funcionan similar a un condensador electrostático común, pero tienen diferencias. Su principal diferencia es que poseen un electrolito para poder almacenar la carga electrostática. El electrolito es un líquido de tipo iónico, el cual posee alta conductividad y concentración iónica, además de permitirnos trabajar a voltajes en torno a los 3.5 V [15]. Estos supercondensadores se asemejan más a una batería que a un condensador porque almacenan energía por medio de iones y reacciones redox de superficie. La reacción redox ocurre cuando los electrones de los elementos químicos se transfieren y provocan cambios en sus estados de oxidación. Al disolver moléculas redox en el electrolito ocurre esta reacción en la que se crea una pseudocapacitancia, lo que permite que se aumente la capacitancia del supercondensador. Estos condensadores son cada vez más prometedores por las posibilidades de aumentar su capacitancia y voltaje.

Comparativa: baterías o supercondensadores

A la hora de comparar baterías y supercondensadores debemos fijarnos en dos características: densidad de energía y densidad de potencia. Estas dos características hacen que la elección entre uno de estos dos dispositivos sea algo compleja, puesto que ninguno de los dos es mejor que el otro. Como se podrá apreciar en la Tabla 1, las baterías tienen mucha más densidad de energía que los supercondensadores, pero mucha menos densidad de potencia. Por lo tanto, las baterías son capaces de almacenar mucha más energía, pero la transferencia de la misma fuera de la batería es menor.

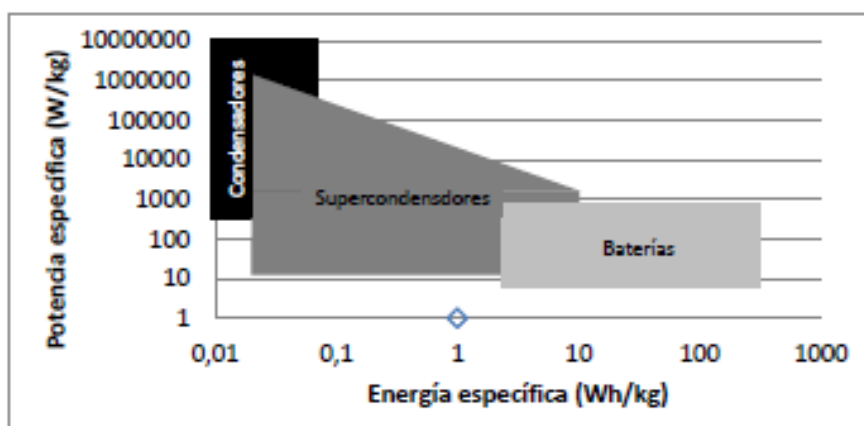


Figura 2 - Gráfica comparativa de tratamiento de energía en ambos dispositivos. [11]

Como podemos observar en la figura 2, la energía específica o densidad de energía es mucho mayor en las baterías. Sin embargo, la densidad de potencia se mantiene muy constante. En el caso de los supercondensadores esta densidad de potencia es una recta que disminuye. Cuanto mayor es la energía almacenada más baja es la potencia con la que se transfiere la misma.

Tabla 1 - Comparativa de características de baterías y supercondensadores. [16]

| | BATERÍAS | SUPERCONDENSADORES |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Densidad de energía | 20-100 Wh/Kg | 1-10 Wh/Kg |
| Densidad de potencia | 20-200 W/Kg | 1000-10000 W/Kg |
| Rango de energía | Hasta 100 MWh | |
| Rango de potencia | 1 kW-30 MW | |
| Capacidad | | 1-5000 F |
| Tensión de trabajo | | 1-500 V |
| Número de ciclos de carga y descarga | 1000-3000 | 1000000 |
| Tiempos de carga y descarga | X horas | X minutos y segundos |
| Rendimiento | 75%-99% | 95%-99% |
| Precio | Depende del material | Alto |

En la tabla 1 se presentan otras características interesantes de estos dos dispositivos. Se destaca la diferencia en número de ciclos de carga entre los dos dispositivos, puesto que los supercondensadores pueden cargarse y descargarse 500 veces más que las baterías. Además, los supercondensadores se cargan mucho más rápido que las baterías. Sin embargo, su descarga también es mucho más rápida. Luego, cabe pensar que, aunque sus ciclos de carga sean mucho mayores al mismo rendimiento, deberemos cargar los supercondensadores más veces. Por otro lado, en el caso de las baterías ciertos materiales son tóxicos y si estas sufren altas temperaturas o están viejas se pierde capacidad de almacenamiento. Al contrario, los supercondensadores no poseen elementos químicos, resisten a altas temperaturas manteniendo sus características y no necesitan mantenimiento.

Por lo tanto, vemos que una batería puede almacenar mucha más energía, pero la transfiere de una forma más lenta y constante. Un supercondensador puede almacenar mucha menos energía, pero la transfiere de una manera mucho más rápida. Luego, a la hora de decidir si usaremos batería o supercondensador tendremos que ver si nuestro sistema necesita energía de forma intermitente o de forma constante, pues que respecto a las otras características ambas tienen ventajas e inconvenientes.

Métodos de recolección de energía

En esta sección nos vamos a centrar en los métodos de recolección de energía para sistemas de bajo consumo energético más importantes.

Dentro de los métodos de recolección que recogen energía de las vibraciones o el movimiento, los más conocidos son los generadores piezoeléctricos, los generadores electrostáticos y los generadores electromagnéticos. Por otro lado, existen otros métodos con los que se obtiene energía a partir de cambios de temperatura o la luz que recibe un sensor.

Generadores piezoeléctricos

El efecto piezoeléctrico es la capacidad que tienen algunos materiales (cristales y algunas cerámicas) de generar potencial eléctrico. Un dispositivo piezoeléctrico es capaz de generar una tensión eléctrica o voltaje cuando es golpeado o deformado. Cuando se produce una de estas dos acciones, las cargas internas (positivas y negativas) del piezoeléctrico se reordenan y con ello se crea un potencial eléctrico [11]. Este potencial eléctrico es proporcional a la deformación que haya sufrido el piezoeléctrico y depende de la dirección en la que se aplica la deformación. Los sistemas piezoeléctricos suelen funcionar de dos maneras dependiendo la dirección en la que se aplica la deformación. En la figura 3 vemos la opción a), donde la fuerza se aplica en la misma dirección que la de polarización, como en la compresión de un bloque piezoeléctrico que tiene electrodos en las superficies superior e inferior. En la figura 3 vemos la opción b), donde la fuerza se aplica en el lateral y en dirección perpendicular a la dirección de polarización [17].

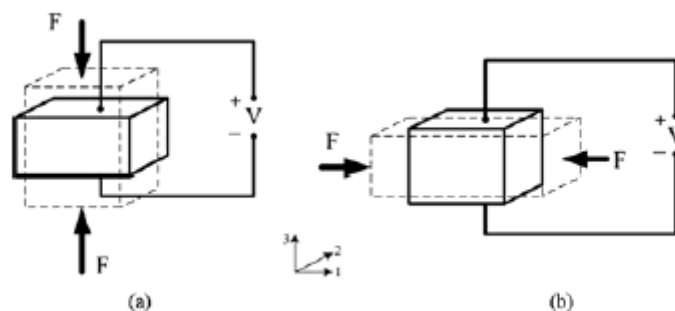


Figura 3 - Modos de piezoeléctricos: opción a (izquierda) y opción b (derecha) [17].

Un modelo básico de un generador que obtiene energía por medio de un dispositivo piezoeléctrico se puede observar en la figura 4. Posee una impedancia interna de tipo inductiva, suelen tener una fuente de tensión alterna y un condensador y resistencia conectados en serie.

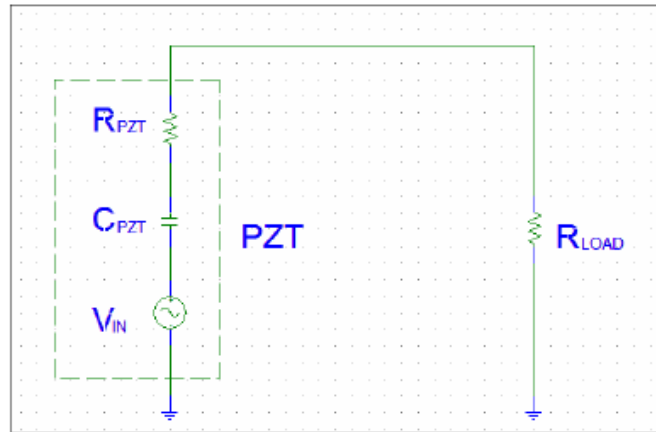


Figura 4 - Modelo genérico de un generador piezoeléctrico [11].

Los materiales piezoeléctricos suelen actuar como una fuente de energía de baja corriente y alto voltaje. El voltaje en circuito abierto se puede calcular con la ecuación (2) [11].

$$V_{OC} = - \frac{d \cdot t}{\epsilon} \cdot T \quad (2)$$

donde d es el coeficiente de deformación piezoeléctrica, t es el espesor del material piezoeléctrico, T es la tensión mecánica y ϵ es la constante dieléctrica del material piezoeléctrico. Esta salida suele ser en corriente alterna, luego deberá ser rectificadas, como se explicó en apartados anteriores, con un rectificador AC/DC.

Generadores electrostáticos

La base de este tipo de generador es un condensador variable que varía por vibraciones mecánicas. Para conseguir energía eléctrica de la energía mecánica, la carga del condensador se desplaza del condensador a un dispositivo de almacenamiento o a la carga. Este hecho ocurre a medida que disminuye la capacitancia o de forma continuada si la carga del condensador no está restringida [17].

Existen tres tipos de generadores electrostáticos:

- a. El plano de superposición o in-plane overlap, donde varía el área de solapamiento entre los dedos del electrodo. Figura 5a.
- b. El plano de cierre de hueco o in-plane gap closing, donde varía el espacio entre los dedos del electrodo. Figura 5b.
- c. El fuera de plano o out-of-plane gap closing, donde varía el hueco entre dos grandes placas de electrodos. Figura 5c.

Los tres tipos pueden funcionar tanto en ciclos de carga limitada como en ciclos de voltaje limitado. Normalmente se suele trabajar con ciclos de voltaje limitado porque proporcionan mayor energía que los otros. Sin embargo, el nivel de energía de los ciclos de carga limitada se puede igualar a los de voltaje al añadir un condensador en paralelo con el condensador principal del sistema de recolección de energía. Esto se consigue si el condensador en paralelo se aproxima al infinito, limitando el voltaje del otro condensador.

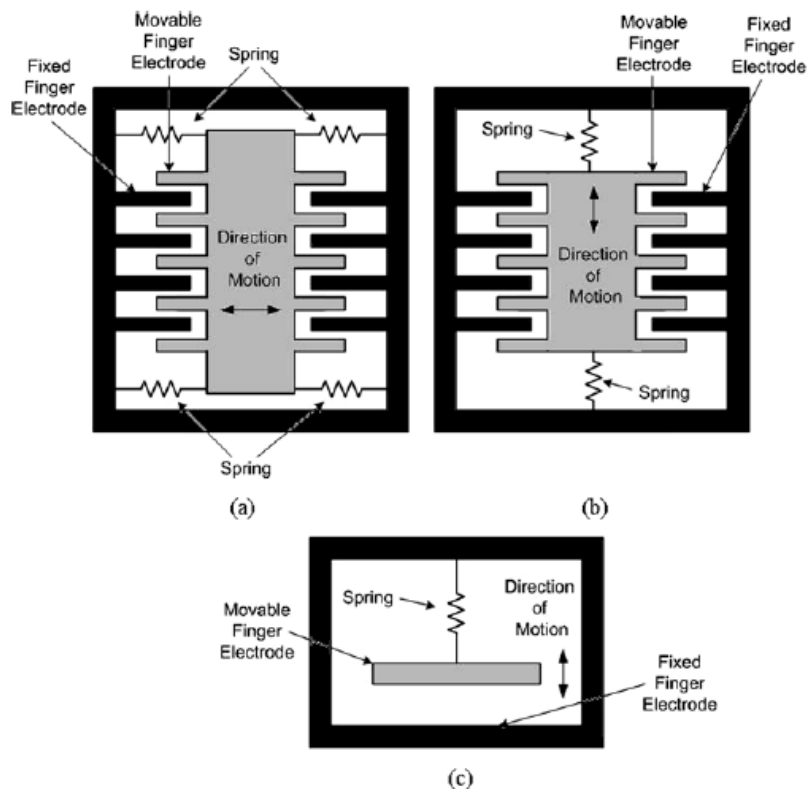


Figura 5 – Tipos de generadores electrostáticos: (a) plano de superposición, (b) plano de cierre de hueco, (c) fuera de plano [17].

En la figura 6 podemos ver un ejemplo de un generador electrostático que usa carga limitada. Podemos ver el condensador en paralelo (C_{par}) que limitaría la tensión máxima, el condensador de almacenamiento (C_L), el condensador variable (C_V) que sería uno de los tres tipos mencionados antes y una carga (V_{in}) que puede ser una batería o un condensador cargados.

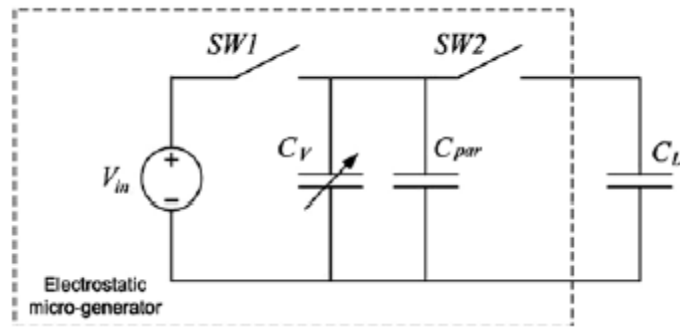


Figura 6 - Ejemplo circuito genérico de un generador electrostático [10].

Lamentablemente, estos generadores tienen que tener una tensión o carga inicial de polarización para poder funcionar. Además, su impedancia de salida suele ser muy alta, luego no son muy útiles como fuente de alimentación.

Generadores electromagnéticos

Este método se basa en la ley de inducción electromagnética de Faraday, la cual defiende lo siguiente: el voltaje inducido en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie cualquiera con el circuito [19]. Dicho de otra forma, si el flujo magnético en una

superficie delimitada por un conductor cambia, se generará una corriente eléctrica inducida en un circuito cerrado.

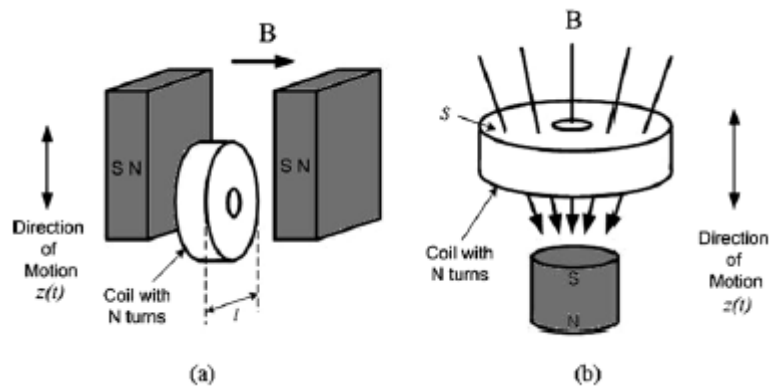


Figura 7 - Dos tipos de generadores electromagnéticos [17].

Los generadores electromagnéticos se componen de una bobina que hace la función de conductor y unos imanes que producen el campo magnético. Se puede obtener la energía de dos formas, figura 7, por el desplazamiento de los imanes o por el de la bobina. En el caso de la figura 7a, el campo magnético no cambia, sino que se genera por el movimiento de los imanes y la bobina. En el caso de la figura 7b, el campo magnético cambia según la distancia de la bobina respecto del imán.

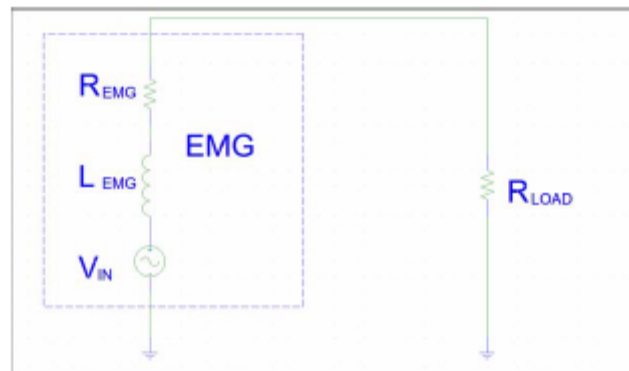


Figura 8 - Modelo genérico de un generador electromagnético [11].

El modelo de generador electromagnético se asemeja mucho al de un generador piezoeléctrico (figura 4), pero en este caso la impedancia interna es inductiva. Podemos ver un ejemplo de un circuito de un generador electromagnético en la figura 8. Éste se compone de una fuente de tensión de tipo alterna, conectada en serie con la impedancia inductiva y una resistencia.

Generadores termoeléctricos

La conversión de energía térmica en energía eléctrica es posible gracias a una propiedad en el material: efecto Seebeck. Este fenómeno ocurre cuando inducimos un voltaje (V) en proporción a un gradiente de temperatura aplicado (ΔT) como se muestra en la ecuación (3) [18]:

$$V = \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

donde α es el coeficiente de Seebeck. Dicho de otra forma, cuando dos uniones hechas por conductores diferentes se mantienen a una temperatura diferente, se produce una tensión entre ellas.

Por lo general, el efecto Seebeck se usa para medir temperaturas. Sin embargo, se puede desarrollar una corriente de salida suficiente para encender algún sensor o dispositivo. Por ejemplo, por medio de un voltaje en corriente continua en serie con una resistencia interna, como podemos ver en la figura 9. En el caso de que la resistencia de carga (R_{LOAD}) fuera una batería o un condensador, habría que añadir un diodo entre el generador y la carga para que no llegue la energía de la batería al generador termoeléctrico cuando la energía no se este acumulando. Cuando la resistencia de carga es igual a la resistencia del generador termoeléctrico, la potencia del sistema será máxima [11].

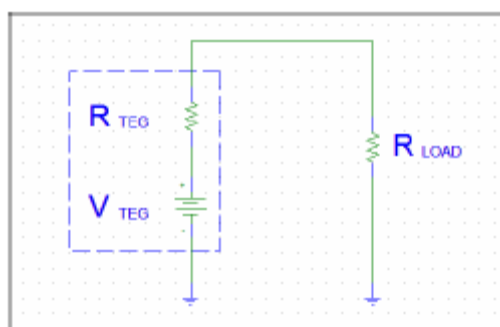


Figura 9 - Modelo genérico de generador termoeléctrico [11].

Los transductores térmicos suelen estar formados por varios termopares conectados en serie y térmicamente en paralelo, a lo que llamamos termopila. Se puede ver en la figura 10 un termopar a la izquierda [18].

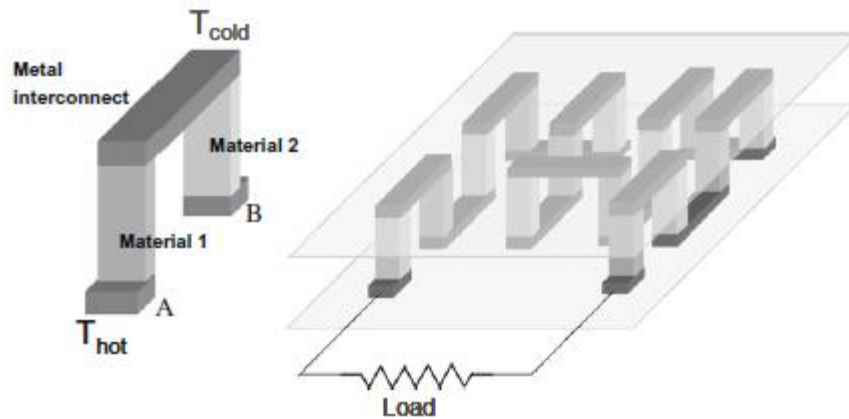


Figura 10 - Esquema de un termopar (izquierda) y una termopila (derecha) [18].

Consta de dos columnas o pilares de materiales diferentes (semiconductores) conectadas por un material metálico. Si la parte baja y la parte alta de los pilares se encuentra a diferente temperatura, se produce una tensión entre las partes bajas de ambos pilares (A y B) tal y como se explica en el efecto Seebeck. Los termopares se colocan entre una placa caliente y una fría como en la figura 10, donde podemos ver una termopila en la derecha.

Generadores fotovoltaicos

Este método obtiene energía por medio de células solares, las cuales se basan en el efecto fotoeléctrico para lograrlo. Este fenómeno ocurre cuando los fotones o partículas de la luz, chocan con los electrones de cierto metal arrancando sus átomos. Cada fotón posee una cantidad de energía que al chocar con el electrón es absorbida por este mismo. Se produce un movimiento de los electrones dando lugar a que se genere una corriente eléctrica, si el movimiento no se produce la energía se disipa en calor [11].

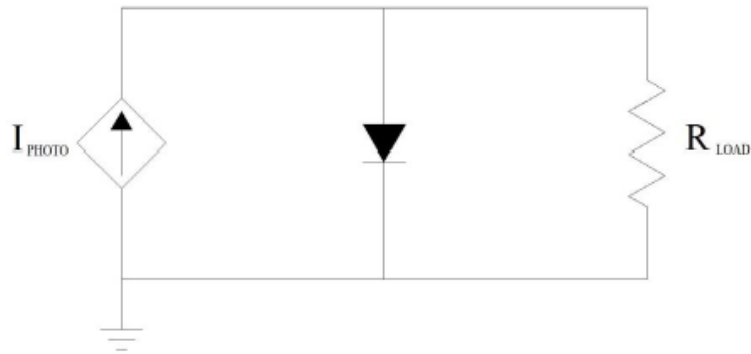


Figura 11 - Modelo genérico de un generador fotovoltaico [11].

Un ejemplo de circuito de una célula solar puede ser el de la figura 11. Este circuito se compone de una fuente de corriente (I_{PHOTO}) que está en paralelo con un diodo y una resistencia de carga (R_{LOAD}). Esta resistencia interna no tiene un valor constante, sino que va en función de la intensidad que se obtenga de la fuente solar y el consumo de corriente. Su valor oscila de los 10 a los 10000 ohmios, un rango mucho más amplio que el de las resistencias en baterías [11].

Generadores RF (radiofrecuencia)

Un método que podría ofrecer grandes posibilidades es la recolección de energía por medio de radiofrecuencia proveniente de servicios de telecomunicaciones, como son GSM o señales WiFi.

Por lo general, estos sistemas se componen de una antena receptora, una red de adaptación de la señal y un rectificador de la misma. Este sistema se suele denominar como *rectena*. Cuando las ondas electromagnéticas llegan hasta la antena, esta las captura y mediante un circuito de adaptación logra amplificar y ajustar el voltaje que recibe para transformarlo a corriente continua en el rectificador [20].

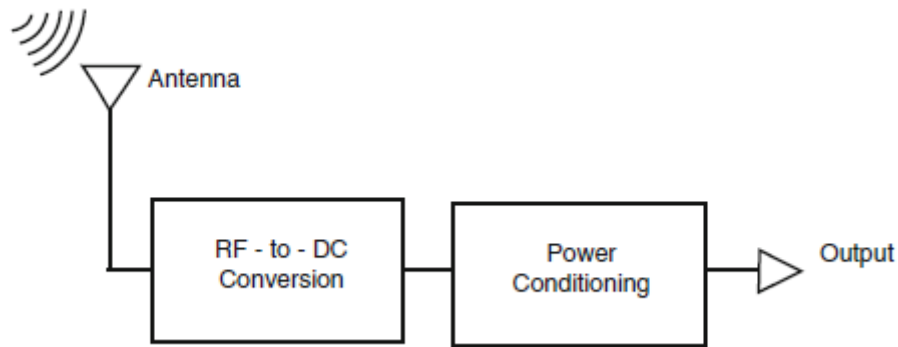


Figura 12 - Esquema de un sistema por radiofrecuencia [20].

Las estaciones radioemisoras abundan por todo el territorio y podrían proporcionar una fuente de energía continua y estable. Si pensamos en que un teléfono móvil es una fuente de energía por radiofrecuencia y vemos la cantidad que hay a nuestro alrededor, vemos lo fácil que sería obtener energía a todas horas. Sin embargo, los sistemas que existen hoy en día no logran captar un nivel de densidad de potencia alto, puesto que, si no se encuentra el emisor de radiofrecuencia muy cerca del receptor, la señal pierde potencia. En el caso de una estación base GSM a una distancia entre 25 y 100 metros, los niveles de densidad de potencia son de entre 0,1 a 1 mW/m² [18]. En el caso de WLAN serían valores aún menores. Estos valores no son suficientes para poder abastecer inalámbricamente a sensores algo alejados.

Pese a estos valores, la captación de energía se usa bastante en sistemas pasivos de identificación de radiofrecuencia (RFID) o a corta distancia, para recargar GPS.

Aplicaciones reales

A continuación, vamos a explicar algunos ejemplos de aplicaciones en las que se han usado estos métodos para conseguir energía limpia e ilimitada. Estos ejemplos son algo más básicos o simples teniendo en cuenta el impacto real al que podrían llegar este tipo de dispositivos [20]. Podrían mejorar edificios, el medio ambiente, el sistema de salud o simplemente nuestro día a día, sólo por la información que aportan y el ahorro energético que permiten.

Aplicaciones con piezoeléctricos

El método por medio de sensores piezoeléctricos es uno de los que más aplicaciones tiene. Una de las aplicaciones que parece más interesante para el futuro es la creación de una placa que al ser pisada genere energía. Una aplicación basada en este diseño usa piezoeléctricos de tipo PZT (Titanato de Zirconio y Plomo) y se obtiene energía por la presión de los mismos [21]. Uno sólo de estos transductores genera de 10 a 20 voltios y de 100 a 200 μA , por ello, se conectaron 200 de estos transductores en paralelo para aumentar la corriente obtenida. Además, se observó que se producía una caída de voltaje porque la presión que sufría la baldosa o superficie al ser pisada no era igual en toda su área y los transductores no obtenían grandes corrientes. Para solucionarlo se colocaron topes de gel de silicona en el centro de los transductores para que se presionaran todos los transductores al pisar en la superficie. Se pueden observar los topes de silicona en la figura 13. La potencia total que obtenían al pisar la superficie era de 450 mW y se dieron cuenta que la potencia obtenida era mayor si la presión del piezoeléctrico era continua. Finalmente, consiguieron cargar una batería de polímero de litio de 600mAh en un tiempo aproximado de 7 horas.



Figura 13 - Topes de gel de silicona colocados en los diferentes transductores piezoeléctricos

[21].

Una idea similar es la implantación de un transductor piezoeléctrico en el interior de un zapato que genera energía al caminar [22]. El transductor se colocaría en la suela del zapato y con cada pisada transmitiría energía, en este caso, a una batería de litio de un teléfono móvil. Los resultados del experimento con esta aplicación fueron capaces de cargar la batería con capacidad de 800mAh en casi 3 horas cuando una persona va caminando y en 2 horas cuando una persona va corriendo. Tanto en este caso como en el anterior se alteró la corriente generada por el transductor para mejorar los resultados con el uso de diodos Schottky o transistores Darlington. El primer caso hace uso de diodos Schottky por su rapidez de conmutación y su baja caída de voltaje de 0.3 V, lo que reduce gastos de energía. Los transistores Darlington se encargan de amplificar la corriente ya transformada en corriente continua.

Otras aplicaciones en las que se ha experimentado el uso de piezoeléctricos hacen uso de las carreteras permitiéndonos almacenar la energía cinética de los coches en movimiento. Un ejemplo es el estudio de la energía que son capaces de almacenar los transductores piezoeléctricos al colocarlos debajo del pavimento [23]. También podríamos aprovechar los *clics* que generamos en el ratón de nuestro ordenador y recoger energía de los movimientos que hace nuestro dedo en esa actividad [24] o recoger la energía cinética de la caída de las gotas del agua de la lluvia [25].

Aplicaciones con electrostáticos

En el caso de las aplicaciones por transductores electrostáticos nos encontramos con dos tipos: sin electrodo y con electrodo. Los primeros necesitarían una fuente externa para polarizar el condensador al inicio de cada ciclo y el segundo permite mayor independencia, ya que las capas de electreto adheridas al condensador permiten tener cargas polarizadas durante algún tiempo [26].

La primera aplicación no se aplica a ningún aspecto de la vida real, aunque se realiza un experimento para comprobar sus capacidades [27]. Se trata de un dispositivo de $13 \times 18 \text{ mm}^2$ basado en el esquema "out-of-plane gap closing" o cierre de espacio fuera del plano, el cual está formado por dos placas paralelas que han sido fabricadas usando técnicas de fabricación MEMS (Figura 14). Es un proceso por el cual la placa de

óxido de silicio (SiO_2) es modificada hasta su forma final para su uso en la aplicación. La placa superior que funcionará como sistema resonante y que esta sujeta por 4 vigas en voladizo o “cantilever beams” y la placa inferior estará recubierta por un material electreto llamado CYTOP. Además, se han creado unos topes entre ambas placas para evitar un colapso electrostático cuando haya altas aceleraciones de vibración.

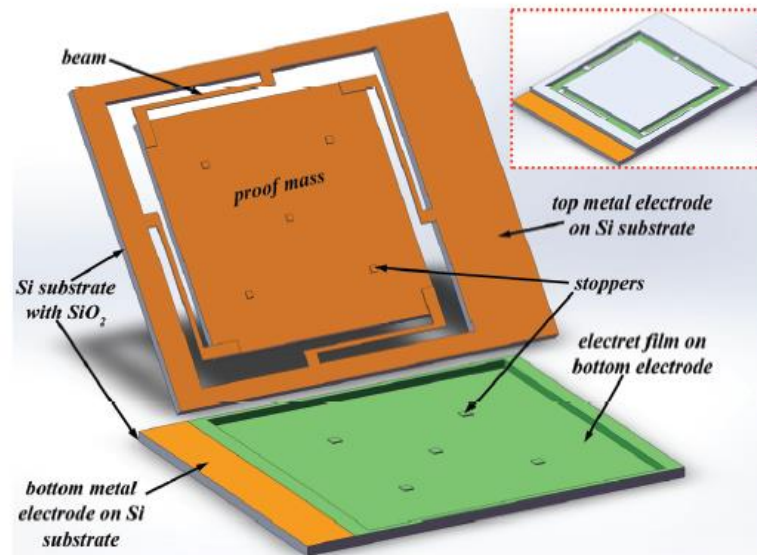


Figura 14 - Esquema del dispositivo de recolección de energía electrostático de la aplicación [26].

Finalmente, las placas se unen por los bordes de óxido de silicio (SiO_2), manteniendo un espacio en la zona del electreto y la masa resonante para que se permita el movimiento de esta última. Cuando la masa resonante se mueva por una vibración externa cualquiera, la capacitancia que existe entre ambas placas variaría, aumentando gracias al electreto adherido a la placa inferior. Para el experimento se ha colocado el dispositivo en un agitador mecánico para producir esa vibración externa y se ha decidido una resistencia de carga de $16\text{ M}\Omega$. El resultado es una potencia de salida media de $2.22\text{ }\mu\text{W}$ cuando se aplica una vibración con aceleración de 10.5 m/s^2 a una frecuencia de resonancia de aproximadamente 160 Hz .

La segunda aplicación de este tipo de transductor también hace uso de los electretos y se quiere enfocar a implantes cardiacos y neuronales los cuales son dependientes de baterías y deben cambiarse cada cierto tiempo. En este caso se basan en

un esquema angular como se puede observar en la figura 15 [26]. Ahora la capacitancia está compuesta por dos capacitancias: una proveniente de cierre de espacio o “gap closing” en los picos del electrodo y otra proveniente de la variación del espacio y de la superposición del área en los laterales.

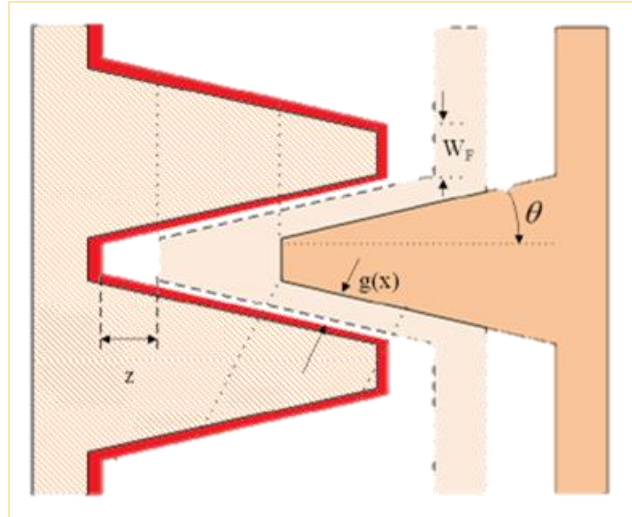


Figura 15 - Esquema de la estructura del electrodo basado en un electreto angular [26].

De esta forma la capacitancia aumenta de forma considerable respecto a la anterior aplicación. El electreto usado es de óxido de silicio (SiO_2) y el ángulo óptimo que han elegido en este experimento es de $5,74^\circ$. El dispositivo tiene unas medidas de $2,5 \times 3,5 \text{ mm}^2$ y es capaz de recoger $9.6 \mu\text{W}$. Luego con un tamaño mucho menor y aplicando otra topología en el transductor electrostático es capaz de generar mucha más energía.

Aplicaciones usando electromagnetismo

Para esta aplicación se ha hecho uso de una aplicación anterior [28] que ha sido mejorada después [5]. La aplicación es un diseño de un sistema rotacional plano no resonante. Se basa en un generador de flujo axial destinado a pequeña escala, estos generadores suelen tener múltiples pares de polos, imanes permanentes y bobinas. El generador que habían propuesto primeramente está formado por un rotor y un estator. El rotor está formado por múltiples pares de polos de imán permanente (PM). Este tipo de imán nos permite mantener una parte del campo magnético creado con el movimiento una vez este ha dejado de realizarse. El rotor se encarga de inducir voltaje al estator cuando se encuentra girando. El estator es una bobina plana apilada en capas y con geometría radial [28]. La

masa añadida al lado del rotor se coloca para forzar el movimiento externo cuando la persona portando el dispositivo se mueve, de esta forma se aseguran de que el rotor reciba movimiento y comience a moverse [5]. En la figura 16. podemos ver un esquema del generador de la primera aplicación, el diseño es igual para ambos casos.

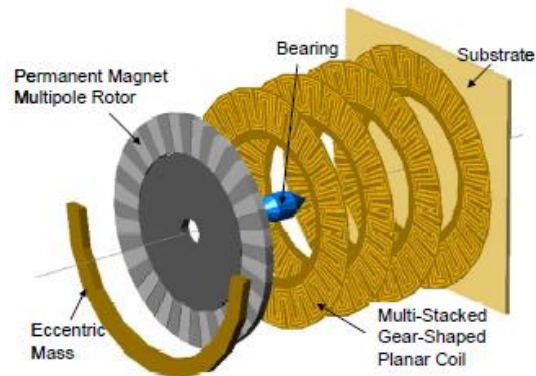


Fig. 1: Simplified schematic of the proposed design.

Figura 16 - Esquema del diseño del generador plano rotacional. [28]

Para fabricar la bobina plana se crearon 10 capas de poliimida (PI) flexible con un revestimiento en cobre que tuvieron un grosor final de 480 μm . Cada capa se conectó individualmente con el objetivo de realizar pruebas y ver resultados. En cuanto al rotor estará compuesto por 20 imanes permanentes (10 pares de polos) dispuestos a cada lado de la bobina plana como se observa en la figura 17 Los imanes estarán montados en dos discos de polimetilmetacrilato (PMMA) que están montados sobre un eje central. En el exterior de ambos discos se colocarán dos masas de 1 gramo cada una. En la figura 18 podemos ver el prototipo final.

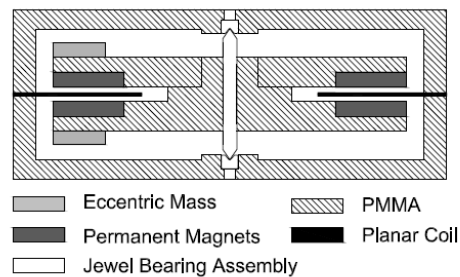


Figure 5: Prototype assembly schematic

Figura 17 - Esquema del diseño del generador plano rotacional vista de sección. [5]



Figura 18 - Prototipo final del generador comparando el tamaño con una moneda [5].

A la hora de probar el generador se han realizado dos pruebas, una caminando y otra corriendo. Además, se ha colocado el dispositivo en diferentes partes del cuerpo: cadera, tobillo, rodilla, pecho, parte superior del brazo y codo. Con un dispositivo de recolección de datos se ha recogido el voltaje generado. Por otro lado, se ha decidido colocar el dispositivo verticalmente en el cuerpo del individuo porque así percibirá mejor el movimiento actuando como la oscilación de un péndulo [5].

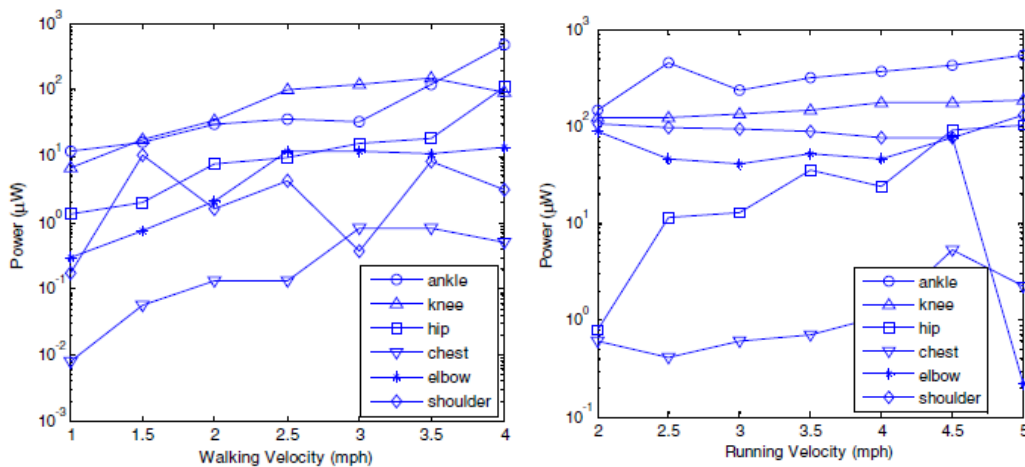


Figura 19 - Resultados con la prueba caminando (izquierda) y corriendo (derecha) [5].

En la figura 19 podemos ver a la izquierda los resultados finales de energía recogidos caminando y la derecha los resultados corriendo. Los resultados se muestran en función de la velocidad expresada en milla por hora (mph o mi/h) [29]. Para convertir de millas por hora a kilómetros por hora (km/h)) sólo tenemos que multiplicar el valor de las millas por hora por 1'609344. Para fijarnos en los resultados vamos a coger un valor caminando, por ejemplo 3 mph (4'8 km/h) y uno corriendo, por ejemplo 5 mph (8 km/h).

En la prueba caminando vemos que cuando posicionamos el dispositivo en la rodilla o el tobillo obtenemos valores mayores de $50 \mu\text{W}$ y cuando lo posicionamos en las extremidades superiores como el pecho los valores son mucho más bajos, rondando los $0.4 \mu\text{W}$. Para el resto los valores están por encima de los $5 \mu\text{W}$, aunque en la parte superior del codo ha ocurrido una bajada justo a los 4.8 km/h que podría ser un caso aislado porque el resto de resultados para esa posición son más elevados, tanto más lento como más rápido. El valor máximo obtenido en este caso es posicionando el dispositivo en el tobillo para una velocidad de 4 mph (6.4 km/h), este valor está por encima de los $470 \mu\text{W}$.

En la prueba corriendo podemos observar que los resultados son bastante similares en todos los casos, excepto para el caso del pecho cuyos resultados no superan $2 \mu\text{W}$ para una velocidad de 8 km/h . Asimismo, para el caso de la cadera los valores han ido en aumento, pero se aprecia una bajada muy pronunciada cuando nos acercamos a los 8 km/h . Esto también podría ser debido a causas externas, aunque no puedo confirmarlo. En los otros casos los valores a 8 km/h se mantienen por encima de los $100 \mu\text{W}$ y el valor máximo lo encontramos para el tobillo, otra vez, con un valor de unos $600 \mu\text{W}$.

Por lo tanto, el lugar óptimo para situar este dispositivo sería el tobillo dado que ahí es donde más energía se recoge.

Aplicaciones con termoelectricos

Las aplicaciones que hacen uso de transductores termoelectricos pueden ser de dos tipos: rígidas o flexibles. En el caso de la siguiente aplicación se hace uso del método flexible puesto que se pretende adherir un sistema con termoelectricos a la muñeca haciendo uso de la temperatura corporal [30]. Como se puede observar en la figura 20 se trata de un total de 24 patas termoelectricas que se dividen en módulos de dos. En total son 12 módulos que se han conectado eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo. Además, se ha utilizado una placa de circuito impreso flexible (FPCB) donde irán conectados los termoelectricos. Esta capa ha sido creada con huecos para mejorar la flexibilidad del dispositivo y se añadido debajo una fina capa de poliimida (PI) que funciona como aislante entre la muñeca y el dispositivo. El dispositivo tiene unas medidas de $43 \times 13 \text{ mm}^2$.

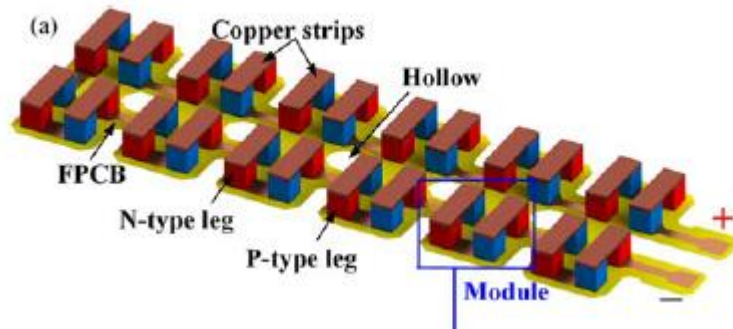


Figura 20 - Esquema del transductor termoeléctrico para aplicación en una muñeca [30].

Para el experimento realizado en circuito abierto se hace uso de la diferencia de temperaturas entre el exterior que será la fuente fría y la piel del individuo que será la fuente caliente y se medirá en dos situaciones. La primera situación es con el individuo en completo reposo y la segunda es añadiendo un movimiento del individuo tras estar en reposo. Las condiciones son de 27°C la temperatura del individuo y 19°C la temperatura ambiente, y la duración del experimento es de 1 minuto y 20 segundos. Los resultados obtenidos se observan en la figura 21, donde se aprecia que la segunda situación nos aporta un voltaje más alto que la primera. En la situación en reposo se obtienen valores constantes en torno a los 3 mV y en la situación en movimiento se obtiene un gran cambio al comienzo del movimiento y una fase constante durante el movimiento con valores en torno a los 10,5 mV.

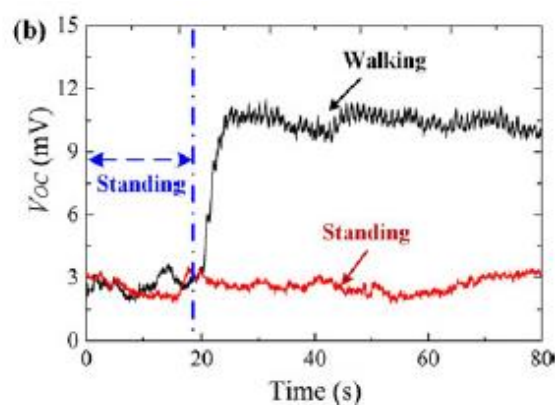


Figura 21 - Resultados del experimento en circuito abierto en reposo y movimiento [30].

En la realización del experimento real se ha conectado un diodo emisor de luz (LED) que requiere un voltaje mínimo de 20 mV y un circuito DC-DC que posee un regulador para la salida de tensión (VLDO). Además, un transformador hará crecer los valores de

tensión ofrecidos por los transductores hasta 100 veces. Se ha seleccionado un valor de salida del VLDO de 2.2 V. En este caso la aplicación tiene unas medidas mayores por la adhesión del circuito ($68 \times 18 \text{ mm}^2$) y se ha probado con una temperatura exterior de 10°C y una temperatura corporal de 27°C . El resultado es favorable y el led se enciende, luego habría que incrementar el número de módulos termoeléctricos para aumentar esa tensión y que pudiera ofrecer el mismo resultado a temperaturas menos diferentes entre ambiente y piel humana.

Aplicaciones con fotovoltaicos

Las aplicaciones que hacen uso de placas fotovoltaicas que son más conocidas son las destinadas a grandes superficies. En nuestro caso, como hemos comentado anteriormente, nos centramos en las aplicaciones a menor escala ya que nos interesan aplicaciones totalmente autónomas. La siguiente aplicación se trata de una pulsera, como en la aplicación del transductor termoeléctrico, que se ha diseñado con fines médicos [31]. La pulsera está diseñada con células solares flexibles sobre una lámina de cobre electrolítico (ED) a la que se ha adherido a una capa de poliimida (PI) para el lado que está en contacto con la piel humana.



Figura 22 - Fotografía de la pulsera flexible en la muñeca [31].

Por un lado, se ha conectado un microcontrolador para procesar y transmitir la información ofrecida por los sensores mediante tecnología Bluetooth. Por otro lado, se ha conectado un circuito integrado para controlar pérdidas y mejorar la eficiencia del circuito y se ha almacenado la energía en una batería de litio. Esta batería transmite un voltaje nominal de 3.7 V que es convertido por el circuito integrado a un voltaje de 3.3V. En la figura 22 se puede ver esta aplicación que determina la frecuencia cardíaca y el

oxígeno en sangre cada hora. Respecto a los resultados que genera la aplicación, se han realizado pruebas en tres escenarios diferentes: con luz interior, con luz exterior y con luz exterior en un día soleado.

Tabla 2 - Energía obtenida en diferentes ambientes [31].

| | Illumination (Lux) | Extracted Power (mW) |
|--------------------------|--------------------|----------------------|
| Luz interior | 500 | 0'15 |
| | 1000 | 0'32 |
| Luz exterior día nublado | 5000 | 1'33 |
| Luz exterior día soleado | 10000 | 16'5 |

En la tabla 2 se pueden apreciar los resultados obtenidos en la batería teniendo en cuenta la energía que consume el circuito integrado. Por otro lado, tenemos que tener en cuenta la energía consumida por la aplicación. En este caso se calcula la energía consumida al medir el oxígeno en sangre una vez cada minuto, lo cual consume $321,16 \mu\text{w}$ y dura solo 5 segundos. El resto del tiempo la energía consumida en reposo será de $4,81 \mu\text{w}$. Por otro lado, una vez cada hora se enviará el resultado por Bluetooth. Finalmente, la energía media consumida es de $324 \mu\text{w}$, lo que determina que la aplicación proporcionaría energía suficiente para llevar a cabo las mediciones en escenarios por encima de los 1000 lux.

Aplicaciones con radiofrecuencia (RF)

Lo interesante de las aplicaciones de este tipo es la cantidad de puntos WiFi a nuestro alrededor y el provecho que podríamos sacar de ellos. La siguiente aplicación se basa en un sistema WiFi para abastecer sensores, una cámara y un sensor de temperatura, y posteriormente abastecer un vecindario [32]. El primer problema que se encuentran es que las transmisiones vía WiFi no se realizan de manera continua, luego los cosechadores de energía no reciben el mínimo voltaje para funcionar. En una prueba

inicial con el rúter original se observa que no se obtienen los 300 mV mínimos para que un convertidor DC-DC funcione (Figura 23).

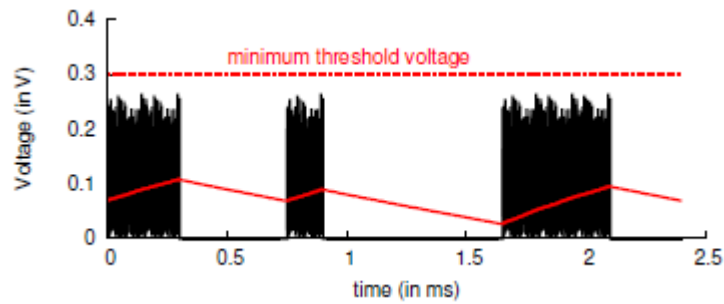


Figura 23 - Transmisión de potencia con el rúter original [32].

Por ello, se deciden a crear un dispositivo capaz de alimentar estos sensores a partir de las transmisiones WiFi existentes: PoWifi. Este dispositivo permite crear esa transmisión continua de señal añadiendo pequeños paquetes de señal UDP (*User Datagram Protocol*) en varios canales WiFi sin alterar la señal usada para los clientes del router. Este dispositivo sólo añadirá el extra necesario cuando no se cumplan los niveles mínimos para el recolector de energía. De esta forma cuando se transmita señal a un cliente WiFi (valor mínimo de 300 mV), no se añadirán paquetes extra, luego la señal no se verá alterada y el WiFi funcionará de manera normal. Además, los paquetes añadidos por PoWifi se realizan a 54 Mbps, una velocidad bastante alta que permite un tiempo corto de ocupación por parte de los paquetes en el canal por el que se están transmitiendo, evitando alterar así la transmisión habitual de paquetes.

Por otro lado, han diseñado un recolector de energía capaz de recibir energía de los diferentes canales WiFi en la banda 2'4 GHz minimizando las pérdidas de señal cuando ésta es reflejada al incidir debido a desajustes de impedancia. Si la antena y el recolector de energía tienen diferente impedancia, perderemos energía RF. La solución es añadir una red de adaptación antes del rectificador y el convertidor DC-DC para que la impedancia se ajuste a la de la antena lo máximo posible, debido a que este valor no es constante. Se pretende adaptar el convertidor DC-DC para que tome parte en esa adaptación limitando la variación de la impedancia que viene del rectificador. Finalmente, la red de adaptación permitirá que el circuito permita igualar las

impedancias del rectificador y de una antena de 50Ω , consiguiendo reducir las pérdidas de energía a menos de 0.5 dB, lo cual es un buen resultado.

Las pruebas de este dispositivo se han realizado con un sensor de temperatura y una cámara, ambos envían sus resultados con un microcontrolador. Las pruebas se han realizado de dos formas distintas. Una primera prueba con los dispositivos sin batería, y una segunda prueba con los dispositivos disponiendo de una batería. Para cada caso se ha hecho uso de un convertidor DC-DC diferente.

En el caso de la prueba sin batería se precisa de un convertidor capaz de funcionar desde los 0V, luego se hará uso del mínimo voltaje suministrado por el rúter que es de 300 mV. Una vez el convertidor almacene los 2'4 V necesarios para que los sensores funcionen, ésta será transmitida a los mismos. En el caso de la segunda prueba, se ha instalado un chip que contiene, entre otras cosas, un convertidor que aumenta el voltaje, una cargador o batería y un convertidor DC-DC que reduce la señal.

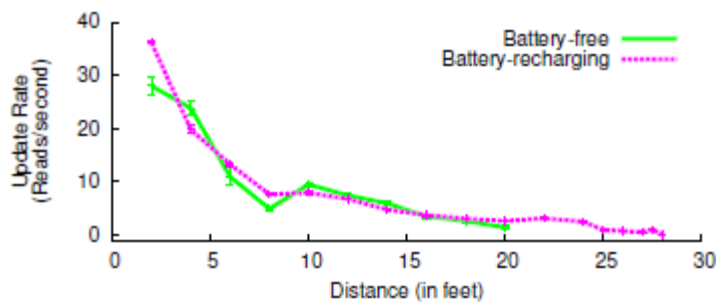


Figura 24 - Resultados con el sensor de temperatura sin batería y con batería [32].

Los resultados de las pruebas o experimentos se pueden observar en la figura 24 para el caso del sensor de temperatura y en la figura 25 para el caso de la cámara. En el caso del sensor de temperatura se ha medido cada cuanto tiempo se realiza una medición de la temperatura y envío de esta información. Se observa que la opción con batería puede ser usada por encima de los 8'5 m respecto del rúter y la opción sin baterías alcanza hasta los 6 m. Por otro lado, los valores de las mediciones por segundo en distancias (entre 1.2 m y 6 m) medias son prácticamente iguales.

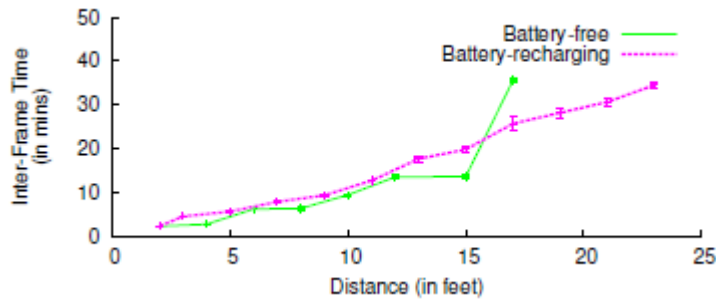


Figura 25 - Resultados con la cámara sin batería y con batería [32].

En el caso de la cámara se ha medido el intervalo de tiempo necesario para poder realizar varias fotografías, es decir, el tiempo entre toma y toma, con respecto a la distancia del rúter. Los resultados nos muestran resultados similares al sensor de temperatura. En ambos casos los resultados son similares, pero, la distancia para que funcione aumenta en el caso del dispositivo con batería. En el caso de no tener batería, la cámara funcionaría hasta a una distancia de 5.2 m del rúter y sería capaz de capturar una foto cada 35 minutos. En el caso de tener batería podría estar a 7 m y capturar fotos en un intervalo de tiempo similar al anterior. Además, se realiza un experimento posicionando el PoWiFi al otro lado de paredes de distintos materiales respecto de la cámara, pero a una distancia muy cercana (1.5 m). El resultado es un funcionamiento similar que aumenta el tiempo entre fotografías en materiales más absorbentes.

El último estudio realizado está pensado para implementar PoWiFi a una mayor escala y que sea capaz de abastecer diferentes casas haciendo uso de un único rúter genérico. Se han instalado rúters PoWiFi en un total de 6 casas para analizar su capacidad durante 24 horas y a unos pocos metros del rúter original. Se ha decidido usar el canal 1 para el suministro de internet y todos los canales (1,6,11) para la transmisión de paquetes. En la tabla 3 se pueden observar los dispositivos que harán uso de ese WiFi en cada casa y otros rúters cercanos al mismo para estudiar su interferencia.

Tabla 3 - Usuarios, dispositivos y rúter cercanos por cada vivienda del estudio [32].

| Home # | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------|----|---|----|----|----|----|
| Users | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| Devices | 6 | 1 | 6 | 4 | 2 | 6 |
| Neighboring APs | 17 | 4 | 10 | 15 | 24 | 16 |

El estudio se centra en la ocupación de los paquetes en los canales mencionados. Los resultados son una alta ocupación en todos los hogares (en algunos por encima del 100%) y un reparto de paquetes no equitativo. Algunas veces en unos hogares había mayor ocupación en un canal, lo que reducía la ocupación en otros hogares de ese canal. Respecto a la experiencia de usuario, prácticamente todos los usuarios percibieron un servicio normal, sin ninguna diferencia. Un usuario tuvo problemas de conexión durante un corto periodo, pero deducen que es debido a factores externos porque el router original también tuvo problemas de señal.



Figura 26 - Cargador USB por WiFi [32].

Por otro lado, crearon una pequeña antena con un USB para poder cargar dispositivos que se puede ver en la figura 26. Se comprobó que situando la antena a unos 6 cm del router PoWiFi se consigue una corriente de 2.3mA y una carga de 40% al cabo de 2 horas y media. Ciertamente es que este resultado no es lo ideal, pero podría ser el principio de cargadores ambientales mucho más eficientes.

Otra aplicación mucho más avanzada es la desarrollada por un *startup* llamada Energous [33]. Esta empresa ha desarrollado *Wattup Mid Field*, un transmisor que permite enviar señales de radiofrecuencia (RF) a múltiples dispositivos y cargarlos a distancia. Los dispositivos deberán tener un receptor específico instalado para poder cargarse con las señales enviadas del transmisor, este receptor será de un tamaño sumamente pequeño para poder ser instalado en móviles o audífonos. Esta transmisión sólo se realizaría cuando el dispositivo necesitará carga, en otro momento se mantendría en modo de espera [34]. Es la primera aplicación que obtiene certificación de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC), por tanto, la que está más cerca de ocupar nuestros hogares. Según últimas noticias podría permitirnos cargar nuestros dispositivos a unas distancias de hasta 0.9 m [35].

Existe un informe de Underwriters Laboratories (UL) donde prueban la transmisión de energía de WattUp en el año 2015 [31]. Aunque la información es relativamente antigua, no hemos encontrado información sobre los resultados actuales de WattUp de una fuente más fiable. En la tabla 4 podemos ver los resultados transmitiendo a un solo dispositivo y a múltiples dispositivos al mismo tiempo en diferentes distancias.

Tabla 4 - Resultados de WattUp 2015 [36].

| | Prueba un dispositivo | Prueba múltiples dispositivos |
|------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Distancia | Potencia media | Potencia media |
| 0 – 1'5 m | 5'5 W | 6 W |
| 1'5 – 3 m | 3'7 W | |
| 3 – 4'5 m | 1'06 W | |

Como podemos observar su potencia media es bastante alta, mucho más que la aplicación de PoWifi.

Comparación de las aplicaciones: viabilidad

Primero vamos a comparar las aplicaciones en cuanto a su viabilidad para implantarse en el día a día. En la tabla 5 podemos ver una tabla resumen de las aplicaciones que hemos comentado y posibles ventajas y desventajas que encontramos en ellas. En primer lugar, haciendo referencia a las aplicaciones mediante piezoeléctrico, al haber buscado dos aplicaciones dependientes de un movimiento humano nos encontramos con una ventaja/desventaja. Por un lado, es ventajoso controlar cuando obtienes energía, pero por otro el suministro de energía sólo se obtiene con un trabajo nuestro. En el caso de la primera aplicación podríamos instalar estas baldosas en un suelo público y obtener energía de los viandantes, como ya hace la empresa *Pavegen* [37]. Desconocemos las características de la aplicación de *Pavegen*, pero en este caso, la aplicación 1 necesita de muchos transductores y genera mayor energía en pisadas controladas. Si instalamos este dispositivo en una vía pública lo que obtendrá serán

numerosas pisadas en cortos periodos de tiempo, luego la energía que suministrará no será máxima. En el caso de la aplicación 2 su obtención de energía parece más enfocada a un uso privado, ya que se instala en el zapato de un individuo. Esta aplicación nos parece más interesante ya que, aunque dependa de lo que usemos el dispositivo podría cargar dispositivos más pequeños, como un móvil o una pulsera inteligente, luego la necesidad de energía será en momentos específicos. Aun así, si necesitamos energía y no nos apetece caminar, dispone de un condensador que va recogiendo energía para suministrarla cuando no se esté en movimiento. En el caso de los electrostáticos en comparación con las demás aplicaciones lo más interesante es su tamaño. Sin embargo, los resultados de energía, como veremos más adelante, son muy bajos. A pesar de todo, la aplicación 4 parece factible para instalar en implantes humanos debido a su tamaño y a que cumple las exigencias de energía que necesitan esos dispositivos. Siguiendo dentro de las aplicaciones que funcionan por movimientos o vibraciones, tenemos la aplicación 5 basada en un generador electromagnético. Esta aplicación como veremos a continuación ofrece una cantidad de energía altas pese a su pequeño tamaño. Al igual que las aplicaciones del piezoeléctrico su energía depende de lo que nos movamos, ya que se coloca en zonas del cuerpo. A diferencia de la aplicación 2, este dispositivo no tiene una batería lo cual lo hace altamente independiente, pero nos limita obtener energía si no estamos en movimiento.

Ahora vamos a ver esas aplicaciones cuya obtención de energía no depende de un movimiento nuestro o externo. Las aplicaciones 6 y 7 han creado una pulsera que obtiene energía de las diferencias de temperatura y de la luz, respectivamente. Ambas nos parecen muy cómodas y nada engorrosas de llevar puestas, por sus materiales flexibles y su tamaño. Sin embargo, el que la energía depende de factores externos hace que sus resultados puedan ser muy variables. En el caso de la aplicación 6 se obtenía mayor energía con grandes diferencias de temperatura, cosa que no siempre es posible dado que hay lugares que la temperatura ambiente es bastante alta. En la aplicación 7 al estar destinada a medir el oxígeno en sangre se ha provisto de una batería que controla el suministro de energía, luego es posible que cuando no exista luz suficiente para recoger energía la batería pueda suministrarla.

Tabla 5 - Resumen aplicaciones con ventajas y desventajas.

| N.º | Aplicación | Generador | Ventajas | Desventajas |
|-------|---|----------------|--|--|
| 1[21] | Baldosa o base que se sitúa en el suelo y produce energía al ser pisada. | Piezoeléctrico | <ul style="list-style-type: none"> - La energía depende de lo que usemos el dispositivo. - La energía recogida es similar en cada uso. | <ul style="list-style-type: none"> - La energía depende de lo que usemos el dispositivo. - Difícil implantación a gran escala. - Necesita muchos transductores (200). - Pisadas intermitentes no producen la misma energía. - Tamaño: baldosa |
| 2[22] | Piezoeléctrico incrustado dentro de un zapato que recoge energía con cada pisada. | Piezoeléctrico | <ul style="list-style-type: none"> - La energía depende de lo que usemos el dispositivo. - La energía recogida es similar en cada uso. - Fácil implantación. - Posee un condensador para suplir energía cuando el dispositivo no | <ul style="list-style-type: none"> - La energía depende de lo que usemos el dispositivo. |

| | | | | |
|-------|--|--------------------|---|--|
| | | | <p>está recogiendo energía.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño: cabe dentro de un zapato. | |
| 3[27] | <p>Electreto con esquema de espacio fuera de plano que recoge energía al vibrar.</p> | Electroestático | <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño: $13 \times 18 \text{ mm}^2$ | <ul style="list-style-type: none"> - Resultados de energía bajos. - No hay pruebas en entorno real. |
| 4[26] | <p>Aplicación para implantes cardiacos y neuronales formada por un electreto con esquema angular que recoge energía al vibrar.</p> | Electroestático | <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño: $2'5 \times 3'5 \text{ mm}^2$ - Energía suficiente para implantes cardiacos y neuronales: $\sim 10 \mu\text{W}$. | <ul style="list-style-type: none"> - Resultados de energía bajos para otras aplicaciones. |
| 5[5] | <p>Generador de flujo axial que se sitúa en diferentes zonas del cuerpo y genera energía con el movimiento.</p> | Electro-magnético. | <ul style="list-style-type: none"> - Tamaño: 2 cm^3. - Funciona sin batería. - La energía depende de lo que usemos el dispositivo. | <ul style="list-style-type: none"> - La energía depende de lo que usemos el dispositivo. - No tiene batería. |

| | | | | |
|-------|---|--------------------|---|--|
| 6[30] | Pulsera que genera energía con las diferencias de temperatura entre el exterior y el cuerpo humano. | Termoeléctric o | <ul style="list-style-type: none"> - Flexible. - Tamaño: 68 x 18 mm^2 - Dispositivo cómodo (pulsera). | <ul style="list-style-type: none"> - Depende de la temperatura exterior y la del ser humano. - Resultados variables. |
| 7[31] | Pulsera que mide el oxígeno en sangre usando la energía proveniente de células fotovoltaicas. | Fotovoltaico | <ul style="list-style-type: none"> - Flexible. - Tamaño: pequeño (pulsera). - Dispositivo cómodo (pulsera). - Batería incluida para controlar el suministro de energía. | <ul style="list-style-type: none"> - Depende de la luz que recibe. - Resultados variables. |
| 8[32] | PoWifi. Dispositivo que altera la señal de un rúter original para enviar energía a otros dispositivos. | RF | <ul style="list-style-type: none"> - No altera la señal wifi original. | <ul style="list-style-type: none"> - Resultados dependen de la distancia. - Dependencia de otro rúter. |

| | | | | |
|-------|--|----|--|--|
| 9[33] | Wattup. Dispositivo que envía energía a un dispositivo que previamente tiene instalado un receptor. | RF | <ul style="list-style-type: none"> - Altos niveles de potencia. - Funciona en multidispositivo. - Tecnología avanzada. [38] | <ul style="list-style-type: none"> - Falta información sobre la tecnología. - Difícil integración. |
|-------|--|----|--|--|

Por último, tenemos las dos aplicaciones por radiofrecuencia. La aplicación 8 podría abastecer perfectamente sensores de temperatura y cámaras sin alterar la transmisión de paquetes original. Sin embargo, sus resultados dependen de la distancia a la que se encuentra el dispositivo y de un rúter externo. En teoría, han probado que abastecería diferentes casas sin problema alguno, pero no hay gráficas que recojan estos resultados. Es el mismo caso que la aplicación 9, la cual está muy avanzada en cuanto a permisos para salir al mercado [38] pero tenemos poca información relevante a sus características o resultados. Esta aplicación tiene la desventaja de que hay que adaptar los dispositivos que quieras cargar con un receptor.

En definitiva, respecto a sus características y no sus capacidades energéticas, las aplicaciones más interesantes serían las de radiofrecuencia sobre todo por su capacidad para cargar en multidispositivo. Sin embargo, las aplicaciones como piezoeléctricos, electromagnéticos o fotovoltaicos parecen muy interesantes destinadas a situaciones específicas en las que el tamaño de la aplicación sea importante.

Comparación de las aplicaciones: energía

Ahora vamos a calcular los vatios(W) y los vatios/hora (Wh) que generan las aplicaciones que hemos comentado anteriormente para compararlas. En la tabla 7 podemos ver los vatios en un instante y los vatios-hora que producen estas aplicaciones respecto a los experimentos que se han realizado.

Los vatios-hora miden la cantidad de energía que se transmite en una hora [39]. En la aplicación 1 [21] nos dicen que la aplicación es capaz de cargar una batería de 600mAh en 7 horas, luego vamos a ver a cuantos vatios-hora (Wh) corresponde. Un amperio-hora (Ah) es la corriente que fluye durante una hora y para cargar una batería de litio necesitamos entre 5V y 7 V, según se indica en [21]. Consiguen un voltaje de 6V y una corriente de 85mA. La batería que usaron en el experimento es de 600mAh y para calcular los vatios-hora (Wh) haremos uso de la ecuación (5) que se basa en la ecuación (4), donde la potencia (W) es igual a la corriente (A) por el voltaje (V) [39], pero añadiendo la unidad de tiempo (horas).

$$P = V \cdot I \quad (4)$$

$$W \cdot h = V \cdot A \cdot h \quad (5)$$

$$W \cdot h = 6 (V) \cdot 600m (A \cdot h) = 3600mWh$$

El resultado son 3600 mWh que podemos pasar a vatios-hora con la ecuación (6). Este resultado serán los vatios que necesita la batería para cargarse en 1 hora [33].

$$m \cdot W \cdot h = 10^{-3} \cdot W \cdot h$$

$$P = W \cdot h (totales) = 3600 \cdot 10^{-3} \cdot W \cdot h = 3'6 W \cdot h \quad (6)$$

$$P = W \cdot h (en 1 hora) = \frac{3'6 W \cdot 1 h}{6'4 \cdot h} = \mathbf{0'5625 Wh} \quad (7)$$

Ahora tenemos los vatios-hora necesarios para cargar esa batería de 600mAh, cómo la aplicación tardó 6'4 horas en realizar esta tarea debemos dividir el valor de vatios entre ese valor para calcular los vatios-hora reales que es capaz de suministrar. El resultado se puede ver en la ecuación (7). Para calcular los vatios en un instante usaremos la siguiente ecuación:

$$P = \frac{0'5625 Wh}{3600 s} = \mathbf{156'25 \mu W}$$

En la aplicación 2 se usa un dispositivo en un zapato y se realizan dos experimentos reales, uno caminando y otro corriendo [22]. Se realiza la misma prueba que antes, el tiempo que tardaría en cada situación en cargar una batería de 800mAh que

necesita un voltaje de 4'2V para ello. Hacemos uso de las ecuaciones anteriores para calcular los vatios-hora caminando y corriendo:

$$P = W \cdot h = 4'2 (V) \cdot 800m (A \cdot h) = 3360m W \cdot h$$

$$P = W \cdot h (totales) = 3360 \cdot 10^{-3} \cdot W \cdot h = 3'36W \cdot h$$

- Resultado en el experimento caminando:

$$P = W \cdot h (en 1 hora) = \frac{3'36 W \cdot h}{2'6 \cdot h} = \mathbf{1'29 W \cdot h}$$

$$P = \frac{1'29Wh}{3600 s} = \mathbf{358'3\mu W}$$

- Resultado en el experimento corriendo:

$$P = W \cdot h (en 1 hora) = \frac{3'36 W \cdot h}{1'8 \cdot h} = \mathbf{1'86 W \cdot h}$$

$$P = \frac{1'86Wh}{3600 s} = \mathbf{516'66\mu W}$$

En la aplicación 3 se ha obtenido la potencia media de salida que se obtiene al variar la aceleración creada por la máquina vibradora [27]. Además, se ha hecho un experimento con vibraciones aleatorias durante un periodo de tiempo. En el documento se indica que la potencia de salida media son de 2'22 μW a una aceleración de 10.5 m/s^2 [27]. Suponiendo que este resultado fuera similar en cada instante de tiempo y asumiendo que es la potencia que se transmite cada segundo, podemos calcular los vatios-hora con la ecuación 8. El resto de pruebas se calculan con la misma ecuación. Lamentablemente, no se realizaron pruebas en una situación real.

$$P = W \cdot h = 2'22\mu W \cdot 3600 segundos = 7992\mu W \cdot h (8)$$

En la aplicación 4 se ha realizado una simulación en MATLAB con la que se obtienen 9'6 μW con un desplazamiento máximo al vibrar [26]. No proporcionan otro tipo de pruebas, así que no podemos calcular los vatios-hora. Sin embargo, si asumimos un desplazamiento máximo durante un tiempo prolongado podríamos calcular un valor relativamente aproximado de vatios-hora.

$$P = W \cdot h = 9'6\mu W \cdot 3600 segundos = \mathbf{34560\mu W \cdot h}$$

Respecto a la aplicación 5 se trataba de un dispositivo posicionado en diferentes zonas del cuerpo que obtenía energía a través de un generador electromagnético [5]. Para comparar con las otras aplicaciones usaremos los resultados máximos que se obtenían al posicionar el dispositivo en el tobillo. Si suponemos que estos valores son los vatios en un instante del tiempo, véase segundos, podemos calcular los vatios-hora con la siguiente ecuación:

- Vatios-hora caminando:

$$P = W \cdot h = 470\mu W \cdot 3600 \text{ segundos} = \mathbf{1'69 W \cdot h}$$

- Vatios-hora corriendo:

$$P = W \cdot h = 600\mu W \cdot 3600 \text{ segundos} = \mathbf{2'16 W \cdot h}$$

En la aplicación 6 tenemos dos pruebas, una en circuito abierto y otra real. La del circuito abierto se realiza de dos formas diferentes como ya sabemos, una en reposo y otra en reposo y luego caminando. En esta prueba la diferencia de temperatura era de 8 °C. Vamos a calcular los vatios-hora en reposo y lo del movimiento para comparar su energía. El voltaje medido en circuito abierto (V_{OC}) es de 3mV en reposo y 10'5mV caminando.

$$R_{in} = \frac{(V_{OC} - V_L) \times R_L}{V_L} \quad (9)[30]$$

Para calcular la potencia de salida (P_L) debemos usar la ecuación (9) que depende del valor V_{OC} y la resistencia de carga (R_L), que nos dicen que vale 1Ω [30]. Previamente usaremos la ecuación (10) para calcular la resistencia interna (R_{in}) del generador. Para ello necesitamos el voltaje de carga que podemos averiguarlo porque suele ser 1.8 veces menor que el valor del voltaje en circuito abierto [25].

$$P_L = \frac{V_{OC}^2}{(R_{in} + R_L)^2} \cdot R_L \quad (10)[30]$$

- Resultado en la prueba parado:

$$V_L = \frac{V_{OC}}{1'8} = \frac{3mV}{1'8} = 1'67mV$$

$$R_{in} = \frac{(V_{OC} - V_L) \cdot R_L}{V_L} = \frac{(3 - 1'67) \cdot 1}{1'67} = 0'796\Omega$$

$$P_L = \frac{V_{OC}^2}{(R_{in} + R_L)^2} \cdot R_L = \frac{(3 \cdot 10^{-3})^2}{(0'796 + 1)^2} \cdot 1 = 2'79 \mu W$$

- Resultado en la prueba andando:

$$V_L = \frac{V_{OC}}{1'8} = \frac{10'5 mV}{1'8} = 5'8 mV$$

$$R_{in} = \frac{(V_{OC} - V_L) \cdot R_L}{V_L} = \frac{(10'5 - 5'8) \cdot 1}{5'8} = 0'81 \Omega$$

$$P_L = \frac{V_{OC}^2}{(R_{in} + R_L)^2} \cdot R_L = \frac{(10'5 \cdot 10^{-3})^2}{(0'81 + 1)^2} \cdot 1 = 33'6 \mu W$$

Ahora tenemos calculada la potencia que se obtiene en un momento determinado. Vamos a calcular la energía que produce en ambas pruebas. Teniendo la potencia en un momento y el tiempo durante el cual se transfiere esa cantidad de vatios podemos calcular los vatios-hora usando la ecuación (11).

$$P(W \cdot h) = P(W) \cdot h \quad (11)$$

- Resultado en vatios-hora para la prueba parado:

$$\text{Duración de la prueba} = 80 \text{ segundos} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ segundos}} = 0'02 \text{ horas}$$

$$P(W \cdot h) = P(W) \cdot h = 2'79 \mu W \cdot 0'02 \text{ horas} = 0'0558 \mu Wh$$

- Resultado en vatios-hora para la prueba andando:

$$\text{Duración de la prueba} = 60 \text{ segundos} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ segundos}} = 0'016 \text{ horas}$$

$$P(W \cdot h) = P(W) \cdot h = 33'6 \mu W \cdot 0'016 \text{ h} = 0'5376 \mu Wh$$

Para el caso de la aplicación 7 se ha creado una pulsera que mide el oxígeno en sangre cada minuto [31]. He decidido no calcular los vatios-hora en este caso porque la luz que reciba la aplicación puede ser muy variable a lo largo del tiempo. Sin embargo, podemos calcular cuanta energía necesita la pulsera para funcionar y ver en que rango debería estar la luz en todo momento.

La aplicación consume una media de $324 \mu W$ al día, luego calcular los vatios-hora será solo dividir este valor con factores de conversión mediante la ecuación (12).

$$P = W \cdot h = 324\mu W \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 13'5\mu Wh \quad (12)$$

Se observa que con una luz entre los 5000 y los 10000 lux se podría abastecer esta pulsera para que funcionará enviando información cada hora.

En la aplicación 8 teníamos un rúter que añadía paquetes a la transmisión del rúter original [32]. En esta aplicación se hicieron pruebas con sensores sin batería y con batería. En este caso sólo vamos a calcular las pruebas sin batería, ya que nos interesan más las aplicaciones autosuficientes y que no dependan de baterías. Además, los cálculos se realizarán en unas distancias específicas para comparar los valores con otras aplicaciones: 1'5, 3 y 4'5 metros. Para ello hemos buscado en las figuras 24 Y 25 los valores que corresponden para cada caso. En la tabla 6 se puede ver recogido estos valores. El cálculo de metros a pies ya se realizó anteriormente en base al documento [29].

Tabla 6 - Valores recogidos de las figuras 24 y 25 para distancias específicas.

| Distancias | | Sensor de temperatura | Cámara |
|------------|------|-----------------------|---------------------------|
| metros | pies | Lecturas/segundo | Minutos entre foto y foto |
| 1'5 | 4 | 20 | 4 |
| 3 | 9 | 8 | 10 |
| 4'5 | 15 | 5 | 15 |

Para calcular los vatios necesarios para los sensores sabemos que el sensor de temperatura consume 2'77 μ J en cada lectura y la cámara 10'4mJ en cada foto. Luego sabiendo que 1 vatio también se puede expresar en julios el segundo (J/s) [24], podemos calcular cuántos vatios totales consume. Vamos a hacer los cálculos para la primera distancia, el resto de distancias serán del mismo modo calculadas. Como sabemos los julios que se necesitan para una lectura y el número de lecturas que se hacen en un segundo, podemos calcular los vatios necesarios en un segundo (Ecuación 13).

- Sensor de temperatura:

$$P(1 \text{ lectura}) = 1 \cdot 2'77\mu = 2'77\mu W$$

$$P(20 \text{ lecturas al segundo}) = 20 \cdot 2'77\mu = 55'4\mu W \text{ al segundo} \quad (13)$$

$$P(W \cdot h) = 55'4\mu \cdot 3600 \text{ segundos} (1h) = 199440\mu Wh$$

Para el caso de la cámara se tarda un tiempo en hacer una fotografía, luego calcularemos los vatios que recibe la cámara a cada segundo en función de los minutos que ha tardado en prepararse para ello mediante la ecuación (14).

- Sensor con cámara:

$$P(1 \text{ lectura}) = 1 \cdot 2'77\mu = 2'77\mu W$$

$$P(4 \text{ minutos/foto}) = \frac{J}{s} = \frac{10'4m}{4 \text{ minutos} \cdot 60 s} = 43'33\mu W \text{ (al segundo)} \quad (14)$$

$$P(W \cdot h) = 43'33\mu \cdot 3600 \text{ segundos} (1h) = 155988\mu Wh$$

Los cálculos de vatios-hora son orientativos, ya que no es seguro que la transmisión de energía sea invariable.

Tabla 7 - Resumen energético de las distintas aplicaciones mencionadas previamente.

| N.º | Método | Prueba | Potencia (µW) | Potencia/hora (Wh) |
|-------|-----------------|---|------------------|-----------------------|
| 1[21] | Piezoeléctrico | Carga batería 600mAh | 156'25 | 0'5625 |
| 2[22] | Piezoeléctrico | Caminando (3-4 km/h) | 333'33 | 1'29 |
| | | Corriendo (10-12 km/h) | 516'66 | 1'86 |
| 3[27] | Electroestático | Máquina que simula vibración a 9'9 m/s ² | 4'04 | 0'014544 |
| | | Máquina vibratoria a frecuencia aleatoria a 10'5 m/s ² | 2'22 | 0'007992 |

| | | | | |
|-------|-------------------------------------|--|---------|----------------------|
| | | Máquina vibratoria a 14'1 m/s ² | 6'81 | 0'024516 |
| 4[26] | Electroestático (electreto angular) | Desplazamiento máximo de 20µm | 9'6 | 0'03456 |
| | | Máquina en vibraciones aleatorias | 2'2 | 0'00000118 |
| 5[5] | Electromagnético | Caminando (6'4 km/h) | 470 | 1'69 |
| | | Corriendo (8km/h) | 600 | 2'16 |
| 6[30] | Termoeléctrico | Parado | 2'79 | 0'000000558 |
| | | Andando | 33'6 | 0'0000005376 |
| 7[31] | Fotovoltaico | Dentro (500 – 1000lux) | 210 | |
| | | Fuera sin sol (5000 lux) | 1330 | |
| | | Fuera con sol (10000 lux) | 16500 | |
| | | Pulsera | 324 | 0'0000135 (necesita) |
| 8[32] | Radiofrecuencia WiFi | Sensor temperatura sin batería | | |
| | | A 1.5 metros | 55'4 | 0'199440 |
| | | A 3 metros | 22'16 | 0'079776 |
| | | A 4.5 metros | 13'85 | 0'04986 |
| | | Cámara sin batería | | |
| | | A 1.5 metros | 43'33 | 0'155988 |
| | | A 3 metros | 17'33 | 0'0624 |
| | | A 4.5 metros | 11'55 | 0'0416 |
| 9[33] | Radiofrecuencia WiFi | De 0 a 1'5 metros | 5500000 | |
| | | De 1'5 a 3 metros | 3700000 | |
| | | De 3 a 4'5 metros | 1060000 | |

Primero vemos que en el caso de aplicaciones que dependen del movimiento a mayor movimiento nos encontramos con mayor potencia. Esto también ocurre cuando aumentamos la aceleración a la misma frecuencia en las aplicaciones electroestáticas. Si variamos la frecuencia los valores disminuyen pese a aumentar la aceleración de vibración. Este caso es de los que ofrece menores valores energéticos juntos con la aplicación 6. Esta aplicación parece aumentar su valor al estar en movimiento el ser humano que lleva la pulsera, pero recordando que los valores que se muestran son en microvatios, la diferencia es muy pequeña. Esta pequeña diferencia se aprecia mejor en la columna en vatios-hora y suponemos que se debe principalmente a que cuando andamos la energía corporal aumenta y la exterior percibida es menor. Aun así, como hemos comentado antes esta aplicación junto a la aplicación 3 podría usarse en situaciones específicas como el medidor de oxígeno en sangre que sólo necesita $10\mu\text{W}$ para funcionar. Sin embargo, podríamos decantarnos mejor por una aplicación basada en fotovoltaicos como es la aplicación 7, cuya energía recogida es mayor que estas dos últimas comentadas. Incluso en habitaciones interiores, abasteciendo de luz artificial, nos ofrece valores mucho más superiores, en microvatios, que la aplicación con termoeléctricos o electroestáticos.

Ahora si comparamos las dos aplicaciones que se posicionan en el cuerpo y que recogen energía exclusivamente del movimiento, aplicaciones 2 y 5, vemos que sus resultados son muy similares. En el caso caminando de la aplicación electromagnética obtenemos un valor muy próximo a la aplicación con piezoeléctrico, incluso cuando la primera va a una velocidad superior. Sin embargo, en la situación corriendo, aunque el piezoeléctrico se estudia a 12 km/h, la energía en el generador electromagnético a 8km/h es algo más mayor.

Respecto a las aplicaciones por radiofrecuencia observamos diferencias muy considerables. Esto puede ser debido a que la aplicación 8 iba destinada a cargar sensores y sus requerimientos energéticos no eran tan altos. Claramente la aplicación 9 es mucho más interesante para un uso más grande. Esta aplicación está destinada a abastecer energéticamente a los múltiples dispositivos que hay en un hogar y por ello esos valores tan altos. Es posible que el hecho de tener receptores especiales en los dispositivos ayude a aumentar esos valores de energía. Ambos casos pierden bastante la cantidad de energía

conforme se alejan del dispositivo. Aunque ambas parecen bastante similares la aplicación 9 está mucho más avanzada a nivel de implantación y parece estar más cerca de cumplir las exigencias energéticas de los consumidores [38].

En conclusión, como a nivel de viabilidad, las aplicaciones por radiofrecuencia parecen las más interesantes para someter a estudios por la gran cantidad de energía que podemos recoger. Es posible que con repetidores podamos replicar la señal y mantener los niveles energéticos a distancias más lejanas. Por otro lado, las aplicaciones con electromagnéticos o piezoeléctricos podrían explotarse más a nivel individual ya que, aunque no son tan altos sus niveles energéticos sí que serían suficientes para un dispositivo pequeño. Además, las aplicaciones con electromagnetismo no dependen de señales exteriores para funcionar lo que añade aún más interés para seguir estudiando aplicaciones posibles con esta tecnología. El resto de aplicaciones ofrecen valores de energía muy bajos, pudiendo estar destinados a aplicaciones muy específicas como medidores de oxígeno en sangre o pulsómetros.

El Internet de las cosas y las *Smart Cities*

El Internet de las cosas es una nueva tecnología basada en la comunicación entre objetos o entre objeto y usuario, que permite la adquisición de datos y el tratamiento de la misma con el objetivo de introducir, aún más, el internet en nuestro día a día. Con este tipo de aplicaciones obtenemos una gran información de nuestro alrededor o de nosotros mismos que anteriormente no teníamos, lo que nos permite mejorar nuestro papel diario tanto a nivel personal como a nivel social [40].

El concepto de *Smart City* incluye una versión eficiente, sostenible, inteligente y de calidad de las ciudades que tenemos actualmente mediante el uso de las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC) [41]. Una ciudad que aprovecha la información pública para mejorar sus servicios y su calidad. Además, el concepto de *Smart City* pretende ir ligado a una ciudad “abierta”, que dote a la gente de la información recogida por todos esos sensores para crear conciencia y donde los ciudadanos puedan ser escuchados por las administraciones públicas para que se realicen cambios necesarios.

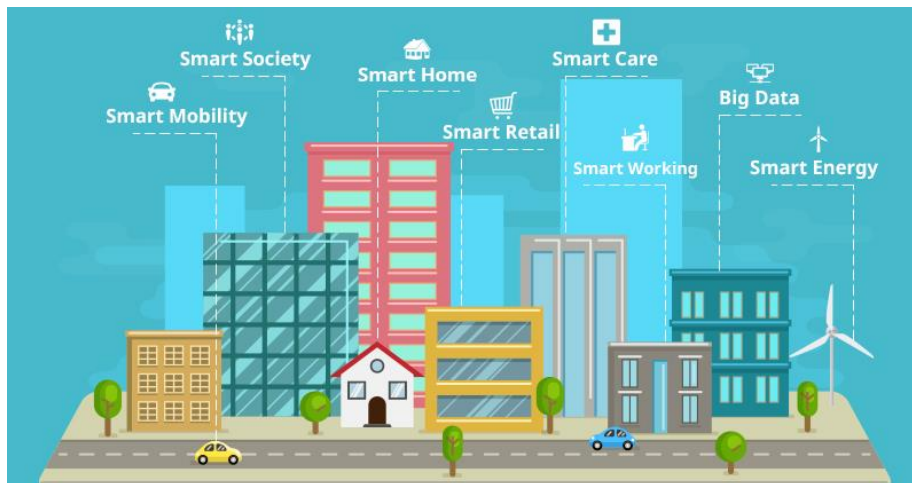


Figura 27 – Algunos sistemas que forman una *Smart City* [42].

Algunos de los aspectos que puede abarcar y mejorar este concepto, junto con el internet de las cosas, son: automatización de casas e industrias, asistencia a ancianos, control eficiente de la energía, control de salud a nivel individual, gestión del tráfico o distribución inteligente de la red eléctrica. [40].

Según Endesa, el modelo ideal de *Smart City* debería incluir los siguientes subsistemas [41]:

1. **Smart Grids.** Se trata de un sistema de distribución eléctrica totalmente inteligente y basado en un modelo bidireccional, en lugar de unidireccional. En este caso además de recibir energía como consumidores, también podríamos producirla para otros consumidores. Además, el sistema cuenta con un centro de servicios que controlaría todo nuestro consumo y recibiría una gran cantidad de datos en tiempo real. Podríamos hacer uso de métodos de *energy harvesting* y de ese modo, reduciríamos considerablemente el consumo de energía convencional; y, además, podríamos reducir nuestras facturas.

Con ello se pretende aumentar la confianza y la calidad en el suministro de energía eléctrica, permitiendo que se detecten y soluciones los problemas de forma rápida y eficaz y dando prioridad a servicios más importantes, como los de emergencia. Además, se busca un uso más eficiente y equilibrado por parte del consumidor y una reducción de los problemas ambientales.

2. **Smart Metering.** Unido al aspecto anterior existirán contadores de la luz inteligentes que permitan al consumidor tener conciencia y a su vez, ahorrar en sus facturas o hacer uso de sus fuentes de energía propias.
3. **Smart Buildings.** Se pretende que todos los edificios tengan sus instalaciones totalmente gestionadas por sistemas remotos y automatizadas. Los sistemas de climatización, iluminación, seguridad, telecomunicaciones, multimedia, etc.; estarán pensados para ahorrar energéticamente, ser más seguros, útiles y accesibles.
4. **Smart Sensors.** Son la base de toda Smart City, proporcionan información tanto a las administraciones del gobierno como al ciudadano. Esta información puede ser de tipo ambiental, tráfico, movimiento, contaminación, control de consumos, tratamiento de residuos, etc. Esta área es la de mayor importancia dado que es la clave para montar todos los sistemas de una Smart City. Existen una gran cantidad de sensores con aplicación en muchos aspectos de nuestra sociedad, algunos ejemplos de aplicaciones ordenados según el tema al que van relacionado son [43]:

- a. **Smart Cities.** Control de plazas de aparcamientos, control de las condiciones de un edificio, controles de ruido ambiente, control de las emisiones electromagnéticas de estaciones, control de atascos y descongestionamiento del mismo, uso de luces públicas inteligentes, gestión del recogido de basuras en función de los niveles de basura en cada contenedor, etc.
- b. **Smart Environment.** Detección de fuegos instalando sensores en bosques, control de la contaminación, control de la humedad del suelo, vibraciones o densidad de la tierra para detectar y conocer posibles patrones peligrosos como terremotos.
- c. **Smart Water.** Control de la calidad del agua potable, control de vertidos químicos en ríos y mares, control de los niveles de contaminación del mar, control de niveles de agua y ríos y lagos para controlar variaciones e irregularidades.
- d. **Seguridad y emergencias.** Detección de gases contaminantes o explosivos en industrias o fábricas de químicos, control de niveles radioactivos por parte de centrales nucleares, localizador GPS para emergencias médicas o individuos peligrosos.
- e. **Logística y control industrial.** Mejora de la calidad del servicio de envío de paquetes con controles de vibración, abertura de contenedores, localizador individual de paquetes. Control por parte de las industrias de su contaminación al exterior.
- f. **Agricultura y granjas inteligentes.** Control de las condiciones de la tierra, el aire, la humedad y demás para proporcionar las mejores condiciones para los cultivos.
- g. **Domótica y automatismos en hogares.** Control remoto de temperatura, gasto energético, persianas, seguridad, agua, en definitiva, de todos los elementos dotados de internet en la casa. Desde el móvil se podrán activar o desactivar funciones, así como consultar datos recogidos de nuestro hogar. Sistemas de detección de movimiento y cámaras para mejorar la seguridad, ya implantados. Neveras inteligentes con control de

alimentos, lavadoras conectadas al smartphone y un sinnúmero de electrodomésticos que son controlados desde nuestro teléfono móvil.

- h. Salud. Detección de posibles accidentes en personas mayores o dependientes que viven solas, control de constantes vitales en personas débiles o con un alto esfuerzo deportivo en tiempo real.
5. EMobility. Aunque no vaya tan relacionado con el uso del internet de las cosas, en una Smart City se pretende un gran uso del transporte público y transportes no contaminantes como las bicicletas que mejoren la calidad ambiental. Además, se pretenden usar automóviles de 0 emisiones, compartir coches e instalar suficientes puestos de recarga eléctrica para coches eléctricos.
 6. TIC. Las tecnologías de la información y la comunicación ya presentes en nuestro día a día serán el factor clave junto con los sensores del desarrollo eficiente de las ciudades inteligentes. Y es que esta gran cantidad de sensores y de información y esa eficiencia e inteligencia que buscamos en los servicios debe ser gestionada y computada correctamente. Toma un factor crucial la computación en la nube que nos permitirá liberar de trabajo de procesamiento a los dispositivos y generar información y servicios más eficaces por medio de servicios en la nube.

La computación en la nube nos permite cumplir las exigencias de aplicaciones más potentes usando infraestructuras en la nube. Con ello, nos permiten unir diferentes sensores o aplicaciones para crear sistemas más complejos y ampliar la recolección de datos. El dispositivo o sensor se conecta a la nube por medio del Mobile Cloud Computing (MCC) que permite trasladar parte del procesamiento de los dispositivos a un servidor remoto en la nube. [44] Uno de sus inconvenientes es la poca seguridad de transmitir datos por la red. Por ejemplo, si estamos grabando a un bebé dormido y enviando ese video a una aplicación en un teléfono móvil, no podemos permitir que esas imágenes sean accesibles a cualquier persona.

En el momento que conectas varios sensores o dispositivos que deben ofrecer una respuesta en tiempo real como es el caso anterior, cobra gran importancia la calidad del servicio y la rapidez [45]. Por eso es importante estudiar métodos de computación en la nube que permitan a aplicaciones en tiempo real tratar y

enviar la información de calidad y de forma eficiente, teniendo en cuenta cuales son las prioridades.

7. *Smart Citizen*. Un factor importante es la concienciación y la participación por parte de los ciudadanos para que este sistema funcione. El ciudadano debe ser partícipe de esa gestión eficiente de la energía, del reciclaje, del uso de transportes limpios, de generar su propia energía limpia, de ahorrar en consumos de agua o luz, de aportar información para incrementar la inteligencia de la Smart City. Esta nueva tecnología no pretende cambiar nuestras ciudades, pretende cambiar nuestro modo de vida.

Además, nos parece interesante incluir otros sistemas que incluyan la mejora de los servicios públicos o las administraciones públicas.

Un sistema muy interesante para introducir en la sociedad sería uno que fomente la mejora de la accesibilidad de una ciudad para personas con discapacidades [46]. Una aplicación que facilita la comunicación de los ciudadanos con el gobierno y que, además, mejora la calidad de una ciudad por medio de un sistema de computación en la nube. Se trata de una aplicación que nos permite como viandantes (con o sin discapacidad) registrar los sitios donde encontramos problemas o dificultades en nuestras rutas. Además, permite recomendar rutas a las personas con alguna discapacidad para que eviten estos puntos y hacer más fácil su desplazamiento. Con ello se pretende ayudar a otros usuarios de la aplicación y, además, tratar estos datos en la nube para notificarlos en una aplicación web diseñada para la administración del gobierno que esté a cargo de la accesibilidad urbana. La persona a cargo podrá ver las rutas registradas con sus correspondientes puntos de dificultad de movilidad y anotar las medidas que se van a llevar a cabo para solucionarlo, lo cual se notificará a las personas que introdujeron estos lugares.

Por ejemplo, un sistema de monitorización de atletas en tiempo real que permita el control de sus constantes vitales y envíe esa información a los asistentes sanitarios [47]. También podríamos aplicar este sistema a el día a día para la asistencia sanitaria de personas mayores. Con ello podríamos evitar muertes debidas a sobreesfuerzo o desmayos por deshidratación.

Otro ejemplo sería un pequeño invento que haría la vida más cómoda es una alarma que tiene acceso al horario de los trenes y si un tren se retrasa o es cancelado, te deja dormir unos minutos más [48]. ¿No mejoraría el día no tener que estar esperando al tren o directamente ir a la estación para nada? Lo mismo podríamos aplicar a aviones o metros. ¿Y si fuera a la inversa? ¿Y si la aplicación viera que existe un atasco enorme en tu ruta diaria y sabiendo otra ruta alternativa te despertara 10 minutos antes para que no llegues tarde? Conseguiríamos no llegar tan tarde y despejar ese atasco por los otros usuarios que también evitaron esta ruta.

Hace ya un tiempo que Google ya ha implantado el aviso de atascos [49]. No tienes siquiera que calcular una ruta en Google Maps, te avisa directamente de que en X autovía hay atasco de X tiempo. Y esto es gracias al internet de las cosas y todos los GPS de los usuarios de Google que están atascados con su coche enviando información en tiempo real.

El papel que juega la recolección de energía ambiente para los sensores es muy importante dentro del desarrollo de las Smart Cities. Primero por el gran despliegue de sensores que se pretende implantar y las cantidades de energía que pueden llegar a consumir. Segundo por lo complicado de tener que sustituir baterías de todos esos sensores, las cuales serían microbaterías. Tercero porque forman parte del sistema eficiente y sostenible que se quiere lograr. De este modo, todo el sistema de sensores podría funcionar mediante energías limpias e inagotables y avanzaríamos hacia una sociedad menos dependiente de combustibles fósiles o energía nuclear, los cuales dañan nuestro aire, nuestras aguas, nuestro ecosistema y nuestra salud [50].

Conclusiones

En definitiva, ha quedado patente una gran necesidad energética actual y en los próximos años debido al gran aumento de dispositivos del Internet de las Cosas. Estos dispositivos cada vez necesitan baterías más potentes y más pequeñas, lo que hace complicado remplazarlas y, por lo tanto, recorta su tiempo de vida y aumenta nuestros gastos. En un futuro próximo el objetivo es que las ciudades sean inteligentes y sean capaz de monitorizar su entorno mediante sensores o dispositivos inteligentes que recojan información. Con este objetivo aumenta la gran demanda energética ya existentes y se une la problemática del gasto y la contaminación que suponen las baterías.

Por ello, vemos una clara necesidad en la investigación de métodos que favorezcan el uso de energías limpias y renovables, que ayuden a implantar nuestras ciudades sostenibles y eficientes sin hacer uso de combustibles fósiles u otros sistemas contaminantes. *Energy harvesting* es la tecnología más adecuada para los dispositivos inteligentes de la Smart City, debido a que está destinada a aplicaciones de tamaño reducido y que pueden ser totalmente independientes. Además, en algunos casos el valor energético recogido por las aplicaciones es capaz de cargar múltiples dispositivos, lo que nos lleva a pensar que, con un poco de investigación, estos métodos podrían proveer demandas más altas de energía. Además, la instalación de estos dispositivos sería muy sencilla y sin cables, lo que ahorraría costes de instalación y materiales, sin contar el ahorro energético que supone no tener que comprar energías no renovables.

En el estudio de las aplicaciones analizadas hemos concluido que la energía por medio de radiofrecuencia parece la que mejor podría satisfacer nuestro día a día. Esto es debido a la gran cantidad de puntos WiFi que solemos encontrar en grandes ciudades. Se podría aprovechar todos estos lugares para transmitir energía. Por otro lado, las aplicaciones por medio de piezoeléctricos nos parecen interesantes a la hora de promover el movimiento o ejercicio físico para obtener energía. Las aplicaciones por electromagnetismo podrían estar destinadas a todos los sensores colocados en lugares donde no existan tanto puntos WiFi o para dispositivos de uso personal como pulseras o audífonos. El resto de aplicaciones tienen muy baja energía y dependen de factores externos, lo que no los hace

tan confiables a la hora de invertir en el estudio de los mismos. Sin embargo, ha quedado patente que serían capaces de abastecer pequeñas aplicaciones.

Por último, una vez resuelto el problema energético que supondría poner en marcha la implantación de las ciudades inteligentes o Smart Cities, tendríamos que concienciar a la población de un cambio en su forma de vida y en cómo funcionan las ciudades. Se pretende tener una ciudad eficiente, inteligente, sostenible y respetuosa con el medio ambiente y con ello, unos ciudadanos que busquen ese objetivo. Las Smart Cities recogerán millones de datos que nos servirán para ser mejores ciudadanos si los tenemos en cuenta. Podremos controlar nuestros consumos energéticos, de agua y nuestras emisiones. Por eso, aunque ya estemos implantando ciertos conceptos de una Smart City, como pueden ser sensores de contaminación en ciudades grandes o el compartir información entre ciudadanos sobre la calidad de las calles, debemos tener un cambio en nuestra forma de vida, dar prioridad a ciertos aspectos que antes no teníamos en cuenta y tener un compromiso con el resto de ciudadanos.

Bibliografía

1. EVANS, D. Internet de las cosas como la próxima evolución de Internet lo cambia todo. 2011.
2. M. Jesús. El día que las baterías extraíbles murieron [en línea] [fecha de consulta: 15 de agosto de 2017] Disponible en: <https://andro4all.com/2017/02/baterias-extraibles-android>
3. RTVE.es. España, el segundo país con mayor dependencia energética entre los grandes de la UE [en línea] [fecha de consulta: 15 de agosto de 2017] Disponible en: <http://www.rtve.es/noticias/20160204/espana-segundo-pais-mayor-dependencia-energetica-entre-mas-grandes-ue/1296673.shtml>
4. CORBIN, J.A. Nomofobia: la creciente adicción al teléfono móvil [en línea] [fecha de consulta: 15 de agosto de 2017] Disponible en: <https://psicologiyamente.net/clinica/nomofobia-adiccion-telefono-movil>
5. ROMERO, E.; NEUMAN, M. R.; WARRINGTON, R. O. Rotational energy harvester for body motion. En Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011 IEEE 24th International Conference on. IEEE, 2011. p. 1325-1328.
6. CASANOVA GÓMEZ, Miguel. Sistemas de cosecha de energía para sistemas electrónicos autónomos. 2013.
7. P SILJESTRÖM GALIANA, Paola, et al. Diseño de una "rectenna" en la banda WiFi de 2.45 GHz para aplicaciones de captación de energía electromagnética: energy harvesting. 2015.
8. PENELLA, M. T.; GASULLA, M. A review of commercial energy harvesters for autonomous sensors. En Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE. IEEE, 2007. p. 1-5.
9. GARCIA VILA, Francesc; VEGA GONZÁLEZ, Sergio. Estudio de los sistemas de recolección de energía (Energy Harvesting) y diseño de una aplicación. 2013. Tesis de Licenciatura. Universitat Politècnica de Catalunya.
10. BARREDA, G.G.; SALCEDO, E.D. Rectificadores de media onda y onda completa. Universidad Nacional de San Agustín, 2013.
11. FARMER, Justin Ryan. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues. 2007.

12. PIKUL, James H., et al. High-power lithium ion microbatteries from interdigitated three-dimensional bicontinuous nanoporous electrodes. *Nature communications*, 2013, vol. 4, p. 1732.
13. PEREZ, D. Microbaterías para conseguir chips diminutos [en línea] [fecha de consulta: 15 de agosto de 2017] Disponible en: <http://omicro.no.elespanol.com/2015/05/microbaterias-para-conseguir-chips-diminutos/>
14. MARTIN. Permittividad [en línea] [fecha de consulta: 20 de agosto de 2017] Disponible en: <http://campoelctrico5a.blogspot.com.es/2010/11/permitividad.html>
15. NAVALPOTRO, P. Nuevo Concepto de Electrolitos tipo Redox para Supercondensadores [en línea] [fecha de consulta: 20 de septiembre de 2017] Disponible en: <http://www.energy.imdea.org/events/2015/nuevo-concepto-de-electrolitos-tipo-redox-supercondensadores>
16. GIL, Isaac. Diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido basado en baterías y supercondensadores para su integración en microrredes eléctricas: Capítulo 2. Baterías y supercondensadores. Universidad de Sevilla, 2016.
17. J. KÁZMIERSKI, Tom y BEEBY, Steve. *Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications*. Springer, 2011.
18. VULLERS, R. J. M., et al. Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics*, 2009, vol. 53, no 7, p. 684-693.
19. SORDIASHIE, Evans. Electromagnetic harvesting to power energy management sensors in the built environment. 2012.
20. EMILIO, Maurizio Di Paolo. *Microelectronic Circuit Design for Energy Harvesting Systems*. Springer International Publishing, 2017.
21. PATIL, Akshay; JOSHI, Shreyas; VASAIKAR, Apurva; JADHAV, Mayur; BRITTO, Elton. Energy Harvesting using Piezoelectricity: Renewable and sustainable energy conversion using Piezoelectric transducers. 2015 International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015).
22. PANDEY, Harsh; KHAN, Ishan; GUPTA, Arpan. Walking based wearable mobile phone charger and lightning system. En *Medical Imaging, m-Health*

- and Emerging Communication Systems (MedCom), 2014 International Conference on. IEEE, 2014. p. 407-411.
23. XU, Xiaochen, et al. Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2017.
 24. CHA, Youngsu, et al. Flexible piezoelectric energy harvesting from mouse click motions. *Sensors*, 2016, vol. 16, no 7, p. 1045.
 25. AL AHMAD, Mahmoud. Piezoelectric water drop energy harvesting. *Journal of electronic materials*, 2014, vol. 43, no 2, p. 452.
 26. AHMED, Suhaib; KAKKAR, Vipin. An Electret-Based Angular Electrostatic Energy Harvester for Battery-Less Cardiac and Neural Implants. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, p. 19631-19643.
 27. ZHANG, Yulong, et al. Electret-based electrostatic energy harvesting device with the MEMS technology. En *Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, 2016 12th IEEE/ASME International Conference on. IEEE, 2016. p. 1-6.
 28. ROMERO, E.; NEUMAN, M. R.; WARRINGTON, R. O. Kinetic energy harvester for body motion. *PowerMEMS 2009*, 2009, p. 237-240.
 29. THOMPSON, Ambler; TAYLOR, Barry N. Guide for the Use of the International System of Units (SI). Special Publication (NIST SP)-811, 2008.
 30. SHI, Yaoguang, et al. Design and Fabrication of Wearable Thermoelectric Generator Device for Heat Harvesting. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, vol. 3, no 1, p. 373-378.
 31. JOKIC, Petar; MAGNO, Michele. Powering smart wearable systems with flexible solar energy harvesting. En *Circuits and Systems (ISCAS)*, 2017 IEEE International Symposium on. IEEE, 2017. p. 1-4.
 32. TALLA, Vamsi, et al. Powering the next billion devices with Wi-Fi. En *Proceedings of the 11th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*. ACM, 2015. p. 4.
 33. ENERGOUS. Energos receives industry-first fcc certification for over-the-air, power-at-a-distance wireless charging [en línea] [fecha de consulta: 2 de enero de

- 2017] Disponible en: <https://ir.energous.com/press-releases/detail/596/energous-receives-industry-first-fcc-certification-for>
34. PING TEST. WattUp: the first FCC distance wireless charging system [en línea] [fecha de consulta: 2 de enero de 2018] Disponible en: <http://ping-test.net/news/hardware/fcc-energous-wattup-wireless-charging/>
35. TARANTOLA, A. FCC approves first wireless 'power-at-a-distance' charging system [en línea] [fecha de consulta: 2 de enero de 2018] Disponible en: <https://www.engadget.com/2017/12/26/fcc-approves-first-wireless-power-at-a-distance-charging-syste/>
36. HECKROTTE, M. Electromagnetic wireless power delivery test and measurement report for Wattup GEN1-20 transmitter and Diamond receivers. UL Verification Services INC. Número del informe: 15U22048-E1. Noviembre,2015.
37. PAVEGEN. Pavegen [en línea] [fecha de consulta: 5 de enero de 2018] Disponible en: <http://www.pavegen.com/>
38. WIGGERS, K. Energous will bring true wireless charging to the masses later this year [en línea] [fecha de consulta: 5 de enero de 2018] Disponible en: <https://www.digitaltrends.com/mobile/energous-miniature-wattup-ces-2017/>
39. ELECTRONICS TUTORIALS. Electrical Units of Measure [en línea] [fecha de consulta: 5 de enero de 2018] Disponible en: http://www.electronicstutorials.ws/dccircuits/dcp_3.html
40. ZANELLA, Andrea, et al. Internet of things for smart cities. IEEE Internet of Things journal, 2014, vol. 1, no 1, p. 22-32.
41. ENDESA EDUCA. Smart Cities [en línea] [fecha de consulta: 10 de enero de 2018] Disponible en: https://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/
42. USER S. Smart Cities To Accelerate Growth In India - Efficient. Sustainable. Utopian [en línea] [fecha de consulta: 13 de enero de 2018] Disponible en: <http://www.sicomindia.com/blog/105-smart-cities-to-accelerate-growth-in-india-efficient-sustainable-utopian>
43. LIBELIUM. 50 Sensor Applications for a Smarter World [en línea] [fecha de consulta: 13 de enero de 2018] Disponible en: http://www.libelium.com/resources/top_50_iot_sensor_applications_ranking/

44. COLOM, José Francisco, et al. Collaborative building of behavioural models based on internet of things. *Computers & Electrical Engineering*, 2017, vol. 58, p. 385-396.
45. MORA MORA, Higinio, et al. Flexible framework for real-time embedded systems based on mobile cloud computing paradigm. *Mobile Information Systems*, 2015, vol. 2015.
46. MORA, Higinio, et al. Interactive cloud system for the analysis of accessibility in smart cities. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 2016, vol. 11, no 3, p. 447-458.
47. MORA, Higinio, et al. An IoT-Based Computational Framework for Healthcare Monitoring in Mobile Environments. *Sensors*, 2017, vol. 17, no 10, p. 2302.
48. DEFEO, Christian. Energy Harvesting and the Internet of Things. En *Green Information Technology*. 2015. p. 151-160.
49. ARDIONS, A. Google Maps avisará de atascos en la próxima actualización [en línea] [fecha de consulta: 15 de enero de 2018] Disponible en: <https://androidphoria.com/novedades/google-maps-avisa-de-atascos>
50. MYPROFECIENCIAS. Energía renovable y no renovables [en línea] [fecha de consulta: 15 de enero de 2018] Disponible <https://myprofetecnologia.wordpress.com/2011/02/12/energa-renovable-y-no-renovables/>