



Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

Trabajo de Fin de Grado

SISTEMAS DE COSECHA DE ENERGÍA PARA SISTEMAS ELECTRÓNICOS AUTÓNOMOS

Miguel Casanova Gómez

Director: Juan Antonio Hernández Tamames

Director: Felipe Machado Sánchez

Índice

1	Resumen.....	2
2	Introducción.....	3
2.1	Arquitectura de un sistema de cosecha de energía.....	6
2.1.1	Sistema de captación de energía.....	7
2.1.2	Acondicionamiento.....	8
2.1.3	<i>Almacenamiento y regulador de tensión</i>	9
2.1.4	Aplicación.....	10
3	Objetivo.....	11
4	Solución técnica y resultados.....	12
4.1	Diseño.....	12
4.1.1	Diseño del sistema para producir vibraciones.....	13
4.1.2	Diseño del sistema de captación de energía.....	23
4.1.3	Sistema de acondicionamiento, almacenamiento y aplicación.....	25
4.1.4	Diagrama general del diseño de cosecha de energía.....	28
4.2	Resultados.....	29
4.2.1	Resultados obtenidos “en vacío”.....	30
4.2.2	Resultados obtenidos “con carga” de 470 Ω y 1 k Ω	34
4.2.3	Resultados obtenidos con la aplicación del sensor de temperatura.....	38
4.2.4	Posibles mejoras que se pueden aplicar al sistema.....	46
4.3	Líneas futuras. Cosecha de energía mediante radiofrecuencia.....	47
5	Conclusiones.....	49
6	Bibliografía.....	50
7	Apéndices.....	51
7.1	Metodología.....	51
7.1.1	Determinación del número de vueltas de la bobina empleada en el diseño.....	51
7.1.2	Configuración del sistema de acondicionamiento y almacenamiento.....	54
7.2	Anexos.....	56

1 Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en realizar el estudio y caracterización de un sistema capaz de captar energía mediante un sistema electromagnético que aproveche el movimiento de las vibraciones. Todo sistema electrónico que sea autónomo, se ve limitado por la duración de sus baterías. El hecho de aumentar su autonomía o incluso llegar a hacerla ilimitada, es lo que pretende el campo de investigación que recibe el nombre de “Cosecha de Energía” (“Energy Harvesting”).

En el inicio de este trabajo se realiza una pequeña introducción de algunos de los procedimientos que existen para aprovechar la energía disponible en el ambiente, haciendo hincapié en los sistemas electromagnéticos. Se enumeran algunos métodos y aplicaciones, así como el estado actual de las investigaciones y las líneas futuras que se prevén.

Una vez vistos los métodos de captura de energía, se explica a continuación el diseño del sistema para captar la energía disponible en los movimientos de vibración. Como punto de partida, se necesita un sistema capaz de generar diferentes ciclos de vibración. A partir de aquí, se somete al diseño a diferentes ciclos para poder comparar los resultados obtenidos.

Las potencias eléctricas obtenidas junto con los diferentes resultados, darán una idea de la viabilidad del diseño realizado. También se incluirán una serie de mejoras que se puedan aplicar en un futuro.

Por último, en este trabajo se incluye un diseño basado en la captura de energía mediante radiofrecuencia (basado en una patente de Nikola Tesla). Como en el anterior diseño, se mostrará el resultado obtenido, así como las posibles mejoras que se puedan hacer en el sistema de captación de energía.

2 Introducción.

Las baterías fueron la principal fuente de energía desde su invención en 1799 por Alessandro Volta hasta que se empezaron a instalar las redes eléctricas a finales del siglo XIX. En ese momento, las baterías pasaron a utilizarse para aplicaciones en sistemas móviles. En un principio estas baterías eran de gran tamaño. A medida que los dispositivos electrónicos se fueron haciendo más pequeños y requiriendo menos potencia, las baterías también disminuyeron su volumen. Como consecuencia a todo esto surge la aparición de un gran número de equipos electrónicos móviles que se usan hoy en día. Uno de los problemas es el gran uso que se está haciendo de las baterías ya que supone un peligro medioambiental. Además las baterías tienen un tiempo de uso limitado y por lo tanto deben ser reemplazadas cada cierto tiempo.

Hoy en día, el desarrollo en la fabricación de circuitos integrados ha promovido la creación de sistemas microelectrónicos que suponen una reducción considerable del tamaño de estos sistemas. El espacio permitido en estos sistemas para la integración de las baterías es bastante reducido, lo que limita la capacidad energética y por tanto la vida útil de las mismas. Por otro lado, el acceso a es estos circuitos para la sustitución de estas baterías resulta bastante complicado e implica una gran inversión de dinero si el proceso tiene que repetirse. Por ello, cuanto más se alargue el tiempo funcional de la batería de un sistema, menor es el coste.

El concepto de “cosecha de energía” (“energy harvesting”) generalmente está relacionado con el uso, almacenamiento y gestión de la energía del ambiente, y que es convertido principalmente en energía eléctrica para su uso en aplicaciones que requieren pequeña potencia. Este concepto no es nuevo, ya que se conocen procesos a gran escala que se utilizan desde hace bastante tiempo, como por ejemplo las instalaciones de paneles fotovoltaicos o de aerogeneradores. Pero la novedad ahora es su aplicación en el uso en el campo de la electrónica de baja potencia y de redes móviles. La primera reseña histórica como cosecha de energía es en el año 1826, cuando Thomas Johann Seebeck observó que una corriente circulaba por un circuito cerrado construido con dos materiales diferentes cuando estos se encontraban a diferente temperatura¹.

La energía captada puede provenir de diferentes fuentes como calor, movimiento, luz y muchas otras, pero sólo es útil si la energía generada por el sistema es mayor que las pérdidas que se producen por transferirla y gestionarla. Por ello los esfuerzos de investigación se llevan a cabo tanto en aumentar la energía captada en el ambiente, como en reducir las pérdidas del sistema.

¹ Farmer, Justin R.. *A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues*. M.S Thesis. Dept. Mech. Eng., Virginia Polytechnic Institute and State Univ. Blacksburg, VA; 2007.

Aunque los valores de la cantidad energía disponible en el ambiente son muy variables, a continuación se presenta una tabla con los valores típicos de potencia de tres tipos de fuente de energía diferentes²:

Tabla 1. Datos típicos de diferentes fuentes de energía.

Fuente	Condiciones	Densidad de potencia	Área o volumen	Energía/día
Vibración	1 m/s ²	100 μW/cm ³	1 cm ³	8,64 J (asumiendo vibración continua)
Solar	Exterior	7500 μW/cm ²	1 cm ²	324 J (luz disponible el 50% del tiempo)
Solar	Interior	100 μW/cm ²	1 cm ²	3,32 J (luz disponible el 50% del tiempo)
Térmico	ΔT= 5 °C	60 μW/cm ²	1 cm ²	2,59 J (asumiendo que calor disponible el 50 % del tiempo)

A continuación se presenta algún ejemplo de los sistemas de cosecha de energía:

- **Cosecha de energía basado en la energía solar:**

Se trata de la tecnología más utilizada en los sistemas de cosecha de energía, sobre todo en el caso de la energía fotovoltaica (ofrece 15000 μW/cm³ de densidad de potencia por volumen, considerando un rendimiento de la célula fotovoltaica de 15 % de eficiencia y una irradiación incidente de 100 mW/cm²)³. Una célula fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir energía de los fotones directamente en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico.

Para su implantación en los sistemas de cosecha de energía, las investigaciones en esta tecnología se esfuerzan en hacer que los sistemas sean lo más pequeños posibles. Por ejemplo, Brunelli realizó un análisis en detalle un sistema fotovoltaico autónomo cuya potencia alimenta a un sensor⁴.

Algunos de los materiales más empleados en la construcción de las células fotovoltaicas son el silicio cristalino(c-Si), multicristalino(mc-Si) y amorfo(a-Si), el arsénico de galio(GaAs), el fosforo de indio y galio (GaInP), la calcopirita (CIGS) y el telurio de cadmio(CdTe). La mayoría de las tecnologías, sufren un descenso brusco de generación de energía cuanto menor es la irradiación solar. En el caso de las tecnologías que emplean a-Si y CdTe sufren cambios muy pequeños al variar de una mayor irradiación a otra menor.⁵

² Beedy, Stephen; White, Neil. *Energy Harvesting for Autonomous Systems*. Artech House Series: 2010. pag. 2.

³ Beedy, Stephen; White, Neil. *Energy Harvesting for Autonomous Systems*. Artech House Series: 2010. pag. 46.

⁴ Brunelli, L. *Photovoltaics Scavenging Systems: Modeling and Optimization*, Microelectronics Journal, Vol. 40, 2009, pag. 1337-1344.

⁵ Beeby, Stephen; White, Neil. *Energy Harvesting for Autonomous Systems*, Artech House Series: 2010. pag. 83.

- **Cosecha de energía basado en la energía termoeléctrica:**

La diferencia de temperatura entre objetos y su entorno, permite extraer energía gracias a la transferencia de calor. Para poder conseguir energía eléctrica, existe la posibilidad de utilizar diversos métodos de conversión. Uno de ellos utiliza el efecto termoeléctrico asociado al calentamiento de la unión de dos materiales conductores diferentes, que pueden ser metales o semiconductores. Además, para el diseño de estos sistemas es fundamental la elección de los materiales correctos, que los contactos eléctricos y térmicos sean eficientes, y una geometría apropiada.

En la actualidad se está empleando mucho la diferencia de temperatura entre el cuerpo humano y el ambiente, que suele situarse en torno a 5-10°C, siendo el calor que desprende el cuerpo humano alrededor de 100W. Usando el sistema apropiado, se podría obtener una densidad de potencia en torno a 20-25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.⁶

Otra aplicación de estos sistemas es utilizar el calor residual de procesos industriales. Un ejemplo, es un sistema instalado en los vehículos, diseñado por la marca de coches BMW, capaz de generar hasta 200 W⁷.

- **Cosecha de energía basado en la energía de las vibraciones:**

Cualquier movimiento de vibración, desde el que produce un motor hasta el movimiento de una persona al caminar, puede ser aprovechado para generar energía eléctrica. Para la captura de este tipo de energía se pueden utilizar sistemas electromagnéticos, electrostáticos y piezoeléctricos.

En fundamento de los sistemas piezoeléctricos, se basa en la piezoelectricidad. Es decir, un cristal sometido a presión mecánica a lo largo de un eje, desarrolla una diferencia de potencial entre sus caras. Algún ejemplo de esta tecnología, es su implantación de sistemas en los zapatos, llegando a conseguir hasta 67 W de potencia en una persona de 68 kg⁸.

⁶ Starner, T., *Human-Powered Wearable Computing*, IBM Systems Journal, Vol. 35, No. 3 & 4, 1996, pag. 618-629

⁷ Fairbanks, J. *Thermoelectric Applications in Vehicle Status 2008*. Proc. of 6th European Conference of Thermoelectrics, Paris, France, Julio 2-4, 2008.

⁸ Staner, T. and J.A. Paradiso. *Human-Powered Wearable Computing*. IBM Systems Journal, Vol. 35, 1996, pag. 618-629

- **Cosecha de energía basado en la radiofrecuencia:**

Hoy en día las emisiones radioeléctricas son muy abundantes a lo largo de todo el espectro. Se trata de un tipo de energía emitida en todas las direcciones desde el centro emisor, y que puede ser aprovechada y almacenada. Debido a ello se trata de un tipo de energía con elevada disponibilidad y barata. Sin embargo, resulta algo más complejo a la hora de captar este tipo de energía y poder utilizarla que en los casos anteriores.

A continuación se muestra una serie de proyectos de cosecha de energía con diferentes resultados obtenidos ⁹:

Tabla 2. Ejemplo de algunos proyectos de cosecha de energía

Fuente de energía	Potencia calculada	Comentarios
Vibración de una persona corriendo	2,46 mW	-
Vibración	50 mW	Simulación
Vibración de una persona andando	0,95 mW	-
Térmica	18 μ W	-
Térmica	34 μ W	-
Radiofrecuencia	12,39 μ W	Simulación

2.1 Arquitectura de un sistema de cosecha de energía.

El auge de la tecnología de cosecha de energía se basa sobre todo en su utilidad en dispositivos autónomos, como por ejemplo los microsensores inalámbricos. Las redes inalámbricas de sensores autónomos, se está convirtiendo cada vez más en una solución muy atractiva para una gran variedad de aplicaciones. Estos sensores pueden dar información en tiempo real y de forma instantánea desde lugares remotos, incluso en ambientes hostiles.

Teniendo en cuenta que en estos dispositivos, la potencia que aporta es el factor limitante, la combinación de métodos de absorción de energía, junto con una gestión inteligente de las redes expandiría el mercado de estas aplicaciones.

⁹ Harb, Adna. *Energy harvesting: State of the art*. Science Direct 2011, pag. 2641-2654.

Además, los sistemas de “cosecha de energía” tienen cuatro partes fundamentales para poder captar y almacenar la energía. Se disponen en el siguiente orden:

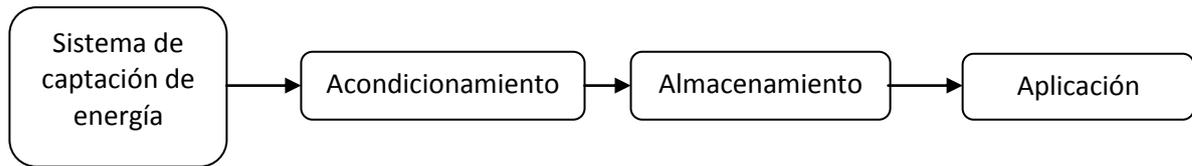


Figura 1. Esquema general de un sistema de cosecha de energía

2.1.1 Sistema de captación de energía:

Es el sistema que se encarga de captar cualquier tipo de energía (solar, electromagnética, termoeléctrica, piezoeléctrico, radiofrecuencia...) y de transformarlo en energía eléctrica. Por lo tanto es una de las partes fundamentales del diseño ya que se encarga de alimentar al resto de las partes del sistema.

Según la naturaleza de la señal generada por el sistema de captación, se pueden clasificar como fuentes de corriente continua (DC) o fuentes de corriente alterna (AC). Las fuentes de corriente continua producen una corriente y tensión continua. Por otra parte, las fuentes de energía de corriente alterna producen una señal alterna y oscilante en el tiempo.

Se pondrá mayor atención a los sistemas de captación de energía electromagnéticos, ya que será el utilizado en el diseño de este trabajo. Este sistema será capaz de generar energía aprovechando las vibraciones o movimientos de cualquier fuente que los genere. La vibración es un movimiento muy presente en el mundo que nos rodea y tiene la ventaja de estar disponible para su aprovechamiento en sistemas de cosecha de energía.

El diseño de captación de energía de este trabajo se basa en la Ley de Faraday:

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

Ecuación 1. Ley de Faraday.

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Ecuación 2. Ley de Faraday según el número de vueltas del inductor

El signo menos indica que la fuerza electromotriz inducida tiene un sentido que se opone al cambio que la provoca. Donde:

- ε es la fuerza electromotriz, y su unidad es el voltio.
- Φ es el flujo del campo magnético.

Por lo tanto, para que exista una fuerza electromotriz inducida, debe variar el flujo del campo magnético con el tiempo. Se puede ver apreciar también que la fuerza electromotriz inducida es proporcional al número de vueltas de la bobina por la variación de flujo del campo magnético.

Con esta idea básica, se utilizará el movimiento de la vibración para mover un imán y éste a su vez se situará en el interior de una bobina. El movimiento del imán produce la variación del flujo magnético, y además, al estar situado dentro de una bobina construida con material conductor, se inducirá una fuerza electromotriz inducida, que más tarde se almacenará como energía. En este caso, la energía producida se utilizará para alimentar un sensor instalado en un sistema capaz de comunicarse mediante radiofrecuencia con otros dispositivos

2.1.2 Acondicionamiento:

La energía que se genera mediante los captadores de energía tiene tres características iguales para todos los casos:

- La tensión de salida no está regulada y no puede emplearse directamente para alimentar circuitos eléctricos.
- Puede que no proporcionen una potencia continua e ininterrumpida.
- Generan una potencia media muy baja (entre los 60 y los 7500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, según los datos de la Tabla 1).

Por todo esto, es necesario un bloque intermedio que se encargue de la administración de la energía. Se trata de un sistema que adapta y convierte la energía (rectificador, convertidor, procesador).

Como la corriente generada puede ser continua o alterna, se tiene los sistemas rectificadores de AC/DC y los convertidores DC/DC:

- **Rectificador AC/DC**

La gran mayoría de las aplicaciones finales de pequeña potencia necesitan un suministro de corriente continua. Por lo que si se genera una corriente alterna, se necesita un convertidor de este tipo, que puede ser de media onda o de onda completa, siendo este último el que mejor aprovecha la potencia. La configuración básica es un puente de diodos:

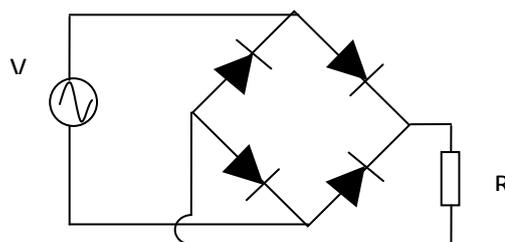


Figura 2. Ejemplo de rectificador AC/DC. Puente de diodos

- *Convertidor DC/DC*

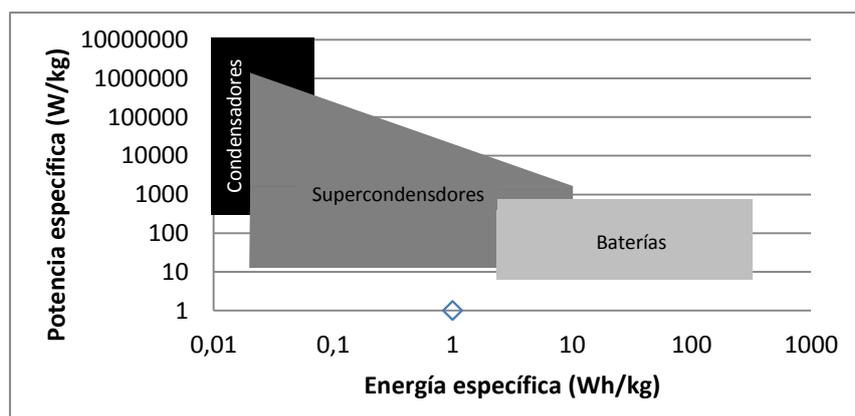
Una vez conseguida la corriente continua, se tiene que conseguir que la tensión tenga el nivel necesario para poder alimentar a la aplicación.

Además de lo anterior, el sistema de cosecha de energía precisa de una **unidad de control**, cuya función principal es acondicionar la potencia de salida para transmitir la máxima potencia al resto del sistema. Asegura el pico máximo de potencia en todo momento mediante esquemas de rastreo, ya que este valor cambia constantemente según la magnitud de la fuente de energía. También se encarga de maximizar la eficiencia del sistema y reducir las posibles pérdidas. Para ello, este sistema mide la potencia captada por el sistema de captación y lo compara con los requisitos de la aplicación.

2.1.3 Almacenamiento y regulador de tensión:

Tiene dos funciones principales: almacenar energía en las baterías y suministrar la potencia regulada a la aplicación. Hoy en día existen varias alternativas para almacenar la energía en los sistemas de cosecha de energía siendo los más empleados son los supercondensadores y las microbaterías.

A la hora de elegir un tipo u otro para el diseño del sistema de cosecha de energía, se tiene que tener en cuenta la potencia y la energía específica como se indica a continuación¹⁰:



Gráfica 1. Comparación de las diferentes formas de almacenar energía según la potencia y la energía específica.

¹⁰ Beedy, Stephen; White, Neil. *Energy Harvesting for Autonomous Systems*,. Artech House Series: 2010. pag 215.

También hay que tener en cuenta los materiales más empleados en la fabricación de las baterías¹¹:

Tabla 3. Resumen de los materiales utilizados para la construcción de microbaterías.

Nombre	Densidad de energía (Wh/kg, mWh/cm ³)	Voltaje de operación (V)	Ventajas	Desventajas
Níquel- Zinc (Ni-Zn)	60, 120	1,6	Reciclable y respetuosa con el medioambiente. Gran velocidad de carga y descarga.	La propagación de la dendrita del zinc y del cambio de la forma del electrodo, reducen el ciclo de vida.
Manganeso alcalino recargable (RAM)	145, 400	1,5	Respetuosa con el medioambiente. Coste bajo de los materiales.	La propagación de la dendrita del zinc y del cambio de la forma del electrodo, reducen el ciclo de vida.
Zinc- óxido de plata (Zn-Ag ₂ O)	105, 180	1,5	Gran densidad de potencia. Potencial de descarga plana.	Elevado precio de la plata. La propagación de la dendrita del zinc y del cambio de la forma del electrodo, reducen el ciclo de vida.
Ion Litio (Li-ion)	150, 400	3-4,2	Potencial de descarga plana. No tiene "efecto memoria"	Necesitan una regulación estricta de la carga y descarga. Sensible con la humedad y riesgo de inflamabilidad

En los últimos años se está desarrollando un tipo de batería de litio de película fina, similares a las baterías de litio mencionada en la Tabla 3, pero con un espesor del orden de unos pequeños micrómetros. Las grandes ventajas que presentan son¹²:

- El área que ocupan, menor a 1mm².
- La capacidad de 0,1 a 5 mAh.
- Soportan temperaturas desde -40°C a 150°C.

Por último, hay que señalar la función del **regulador de tensión**. Se trata de convertidores DC/DC lineales que mantienen un voltaje constante a la salida para distintas resistencias de carga. Para la generación de esta tensión siempre se parte de una mayor. Siendo la mínima diferencia de tensión entre la entrada y la salida de este regulador el "dropout".

2.1.4 Aplicación:

El uso final que se va hacer la energía producida. La aplicación para los sistemas de cosecha de energía puede estar formada por cualquier dispositivo que no necesite una potencia de alimentación muy elevada. Por ejemplo, un sensor que de información en tiempo real.

¹¹ Linden, H. D., *Handbook of Batteries*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 2010.

¹² Duclot, M. and J.Souquet, *Glassy Materials for Lithium Batteries: Electrochemical Properties and Devices Performances*. Journal of Power Sources, Vol 97-98, Junio 2001, pag. 610-615

3 Objetivo.

El objetivo de este trabajo se centra en conocer los principios fundamentales de los sistemas de cosecha de energía, así como las partes que los componen, las distintas fuentes de alimentación, y el uso que se hace para este tipo de tecnologías. También se dará a conocer alguna serie de proyectos realizados hasta el día de hoy para saber la situación actual de esta tecnología.

Una vez que se conoce los principios fundamentales de un sistema de cosecha de energía, se realizará un diseño basado en la captación de energía que proviene del movimiento de las vibraciones. Se realizará el análisis y el estudio de este diseño en dos partes diferentes con la siguiente finalidad:

- Por un lado, analizar los datos de corriente eléctrica a la salida del sistema de captura de energía para saber cuánta energía se está produciendo.
- Y por otro lado, los datos de potencia y carga de las baterías al conectar el diseño a una aplicación, en este caso un sensor de temperatura que se comunica con radiofrecuencia con otro dispositivo, como por ejemplo un ordenador.

El hecho de analizar los datos recogidos en ambos casos, permite conocer en profundidad este tipo de sistemas, así como los posibles problemas que pueden darse y las mejoras que pueden introducirse a la hora de diseñarlo.

Por último, otro objetivo que se persigue con este trabajo es conocer el pasado, el presente y el futuro de los sistemas de cosecha de energía. En este último caso, con el diseño de un sistema de cosecha de energía basado en radiofrecuencia, se da a conocer alguna de las líneas futuras que se están desarrollando en la actualidad.

4 Solución técnica y resultados

El sistema de cosecha de energía diseñado será capaz de poder generar energía aprovechando los movimientos de vibración. Por lo tanto, se necesita un diseño que estará dividido en dos partes bien diferenciadas:

1. Por un lado se necesita un sistema que produzca los movimientos de vibración. Este sistema es necesario para someter al sistema de cosecha de energía a diferentes ciclos de vibración.
2. Y por otro lado, se necesita el propio sistema de cosecha de energía. En este caso será el encargado de transformar los movimientos de vibración producidos y transformarlos en energía.

4.1 Diseño

Se ha planteado un diseño que consta de dos partes diferentes:

- a) El sistema que se encarga de producir vibraciones que se divide en:
 - Motor de corriente continua; para poder generar los movimientos de vibración. Este motor debe ser controlado de tal manera que genere diferentes ciclos de vibración. Y la estrategia utilizada para controlar la velocidad del motor es la "modulación por ancho de pulso" (PWM).
 - Placa FPGA; se trata de un dispositivo digital programable, que será la encargada de generar esa señal mediante "modulación por ancho de pulso". Esta estrategia se utiliza para generar diferentes ciclos de vibración y diferentes patrones de velocidad del motor.
 - Circuito complementario; ya que la potencia que le llega al motor no es la suficiente, se necesita un circuito que sea capaz de proporcionar la potencia necesaria.
- b) El sistema de captación de energía; está formado por una bobina, un imán, dos muelles y la propia estructura donde se instalarán todos estos elementos. Es el que se encarga de generar la energía. Estará unido al motor de corriente continua mediante un sistema de correa, para poder aprovechar los movimientos de vibración generados por el propio motor.

A continuación se muestra un esquema sencillo en el que se recogen las partes fundamentales del diseño:

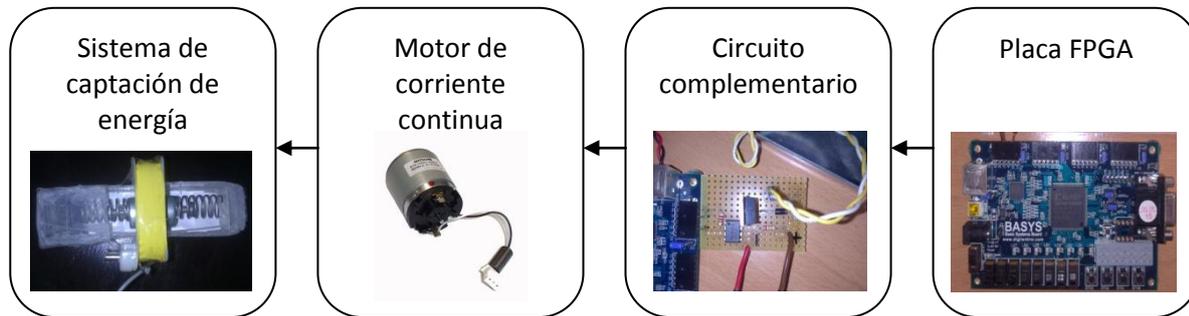


Figura 3. Esquema básico del diseño

4.1.1 Diseño del sistema para producir vibraciones.

En primer lugar es necesario diseñar un sistema que sea capaz de realizar diferentes movimientos de vibración.

Para el diseño de este sistema se ha utilizado un motor de corriente continua (modelo C8941-60001). Las principales características se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 4. Características del motor de corriente continua C8941-60001

Motor de corriente continua. Modelo C8941-60001	
Tensión nominal (V)	18
Rango de voltaje (V)	6-8
Velocidad sin carga (rpm)	7500
Corriente sin carga (mA)	100

El motor irá incorporado en una estructura con correas donde posteriormente se incorporará el propio sistema electromagnético de cosecha de energía (el imán y la bobina). La estructura está diseñada de modo que el propio peso del sistema electromagnético hace que baje cuando el motor no está funcionando. Por lo tanto, sólo hay que mover el motor en una dirección para generar la vibración.

Además hay que señalar que el motor de corriente continua no sería capaz de generar diferentes movimientos de vibración por sí sólo. Por lo tanto, se precisa controlar el motor para que pueda generar diferentes ciclos de vibración. Existen diferentes estrategias para controlar o variar la velocidad del motor.

Entre ellas está la "modulación por ancho de pulso"(PWM), que es la utilizada en este diseño. Para ello se ha utilizado una placa FPGA (dispositivo digital programable) en el que se integrará el motor de corriente continua y un circuito para controlar mediante PWM (modulación por ancho de pulso) este mismo motor.

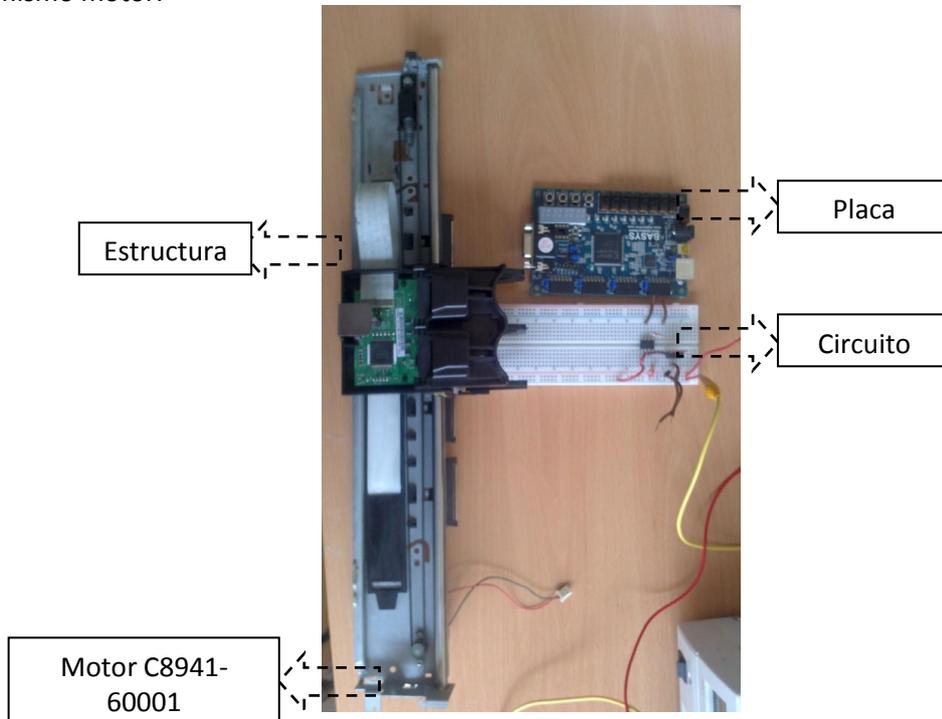


Imagen 1. Diseño del sistema para producir vibraciones.

4.1.1.1 PWM (Modulación por ancho de pulso)

La modulación por ancho de pulso (*pulse width modulation*: PWM) es un tipo de control que se puede utilizar para el control de motores eléctricos de corriente continua mediante un circuito de potencia adecuado que se explicará más adelante. Los parámetros fundamentales son el periodo (T) y el ciclo de trabajo (D). El ciclo de trabajo indica el tiempo que la función vale uno respecto al tiempo total (el periodo). A continuación se muestra tres ejemplos para dejar claro estos dos conceptos:

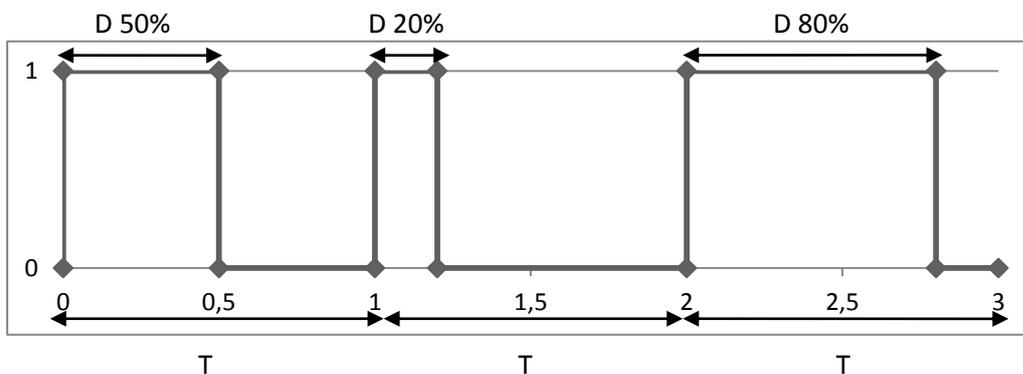


Figura 4. Señal PWM que se le ha cambiado el ciclo de trabajo

Si el periodo del "PWM" es suficientemente pequeño, el motor de corriente continua no notará las variaciones de la tensión y el resultado es que el motor recibirá una tensión promedio dada por el ciclo de trabajo.

En el diseño para generar movimientos de vibración, la velocidad del motor irá desde el 0 hasta el valor 7. Es decir, cuando valga 0 el motor no funcionará, y cuando sea 7 el motor funcionará a su máxima velocidad como se muestra en los siguientes ciclos de trabajo:

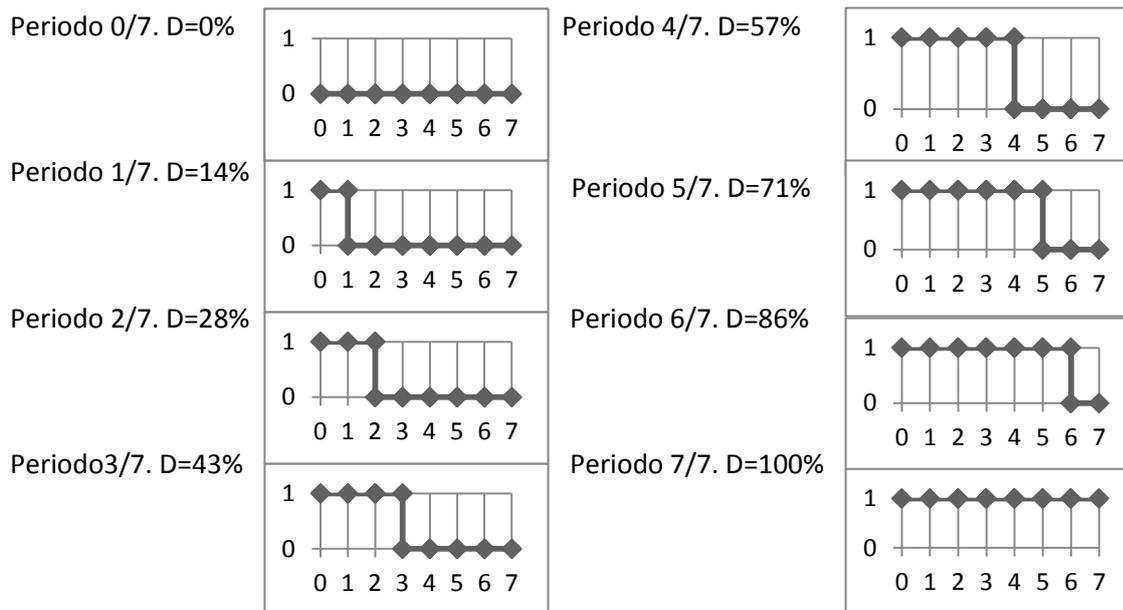


Figura 5. Distintos ciclos de trabajo para el motor de corriente continua

A la hora de tomar los datos para el diseño de cosecha de energía se ha elegido un ciclo de trabajo en el que el motor trabaje a su máxima potencia, es decir, cuando $D=100\%$.

Ahora bien, no solamente se necesita un motor que esté trabajando a su máxima velocidad. También se necesita un circuito para que lo haga funcionar en ciclos de apagado y encendido, de tal manera que moverá de arriba hacia abajo el sistema electromagnético de cosecha de energía, realizando movimientos o ciclos de vibración. Este circuito se explicará en el apartado 4.1.1.2 "Diseño del circuito de control de velocidad y potencia del motor de corriente continua".

Para saber las diferentes cantidades de energía que se pueden extraer con este sistema, se han establecido diferentes ciclos de vibración. La configuración de los diferentes ciclos de vibración se puede realizar manualmente sobre la placa FPGA. En esta placa aparece reflejado en un pequeño monitor los números correspondientes a las distintas configuraciones del movimiento del motor.

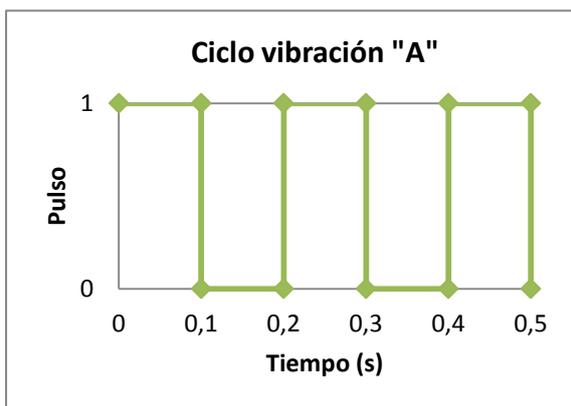
A continuación se muestra un ejemplo en el que el tiempo de encendido y apagado sería 1 décima de segundo y la velocidad del motor sería la posición 7 en una escala del 0 al 7:



Imagen 2. Ejemplo de configuración en la placa FPGA

Los ciclos correspondientes a distintos movimientos de vibración y trabajando con la máxima velocidad del motor, se representan a continuación:

- a) Ciclo de vibración "A". El motor de corriente continua funcionará 1 décima de segundo apagado y 1 décima de segundo encendido:



Gráfica 2. Ciclo vibración "A"

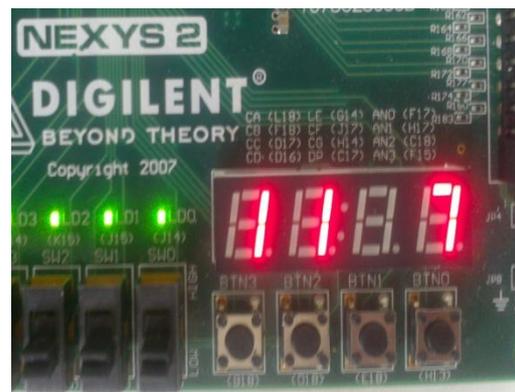
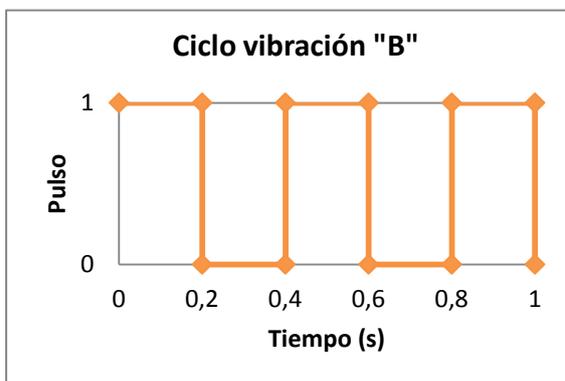


Figura 6. Configuración manual para ciclo de vibración "A"

- b) Ciclo de vibración "B". El motor de corriente continua funcionará 2 décimas de segundo apagado y 2 décimas de segundo encendido:

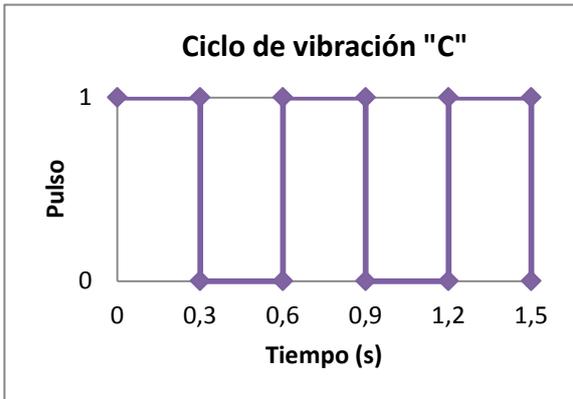


Gráfica 3. Ciclo vibración "B"



Figura 7. Configuración manual para ciclo de vibración "B"

- c) Ciclo de vibración "C". El motor de corriente continua funcionará 3 décimas de segundo apagado y 3 décimas de segundo encendido:



Gráfica 4. Ciclo vibración "C"

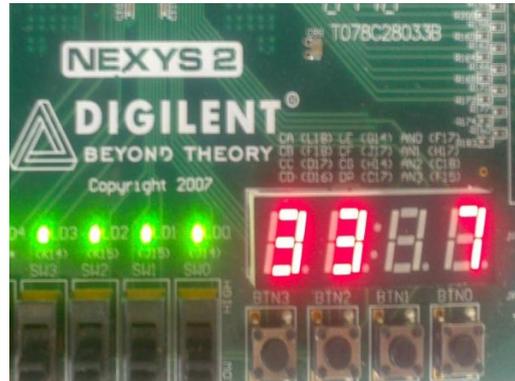
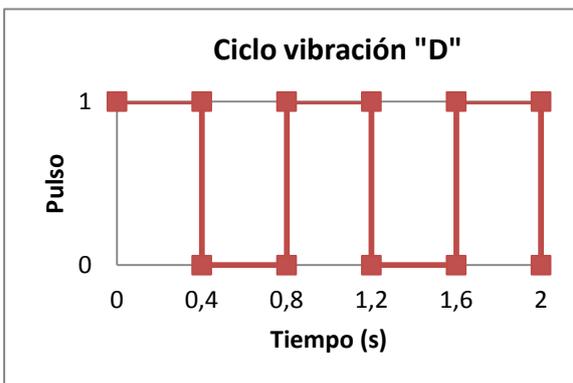


Figura 8. Configuración manual para ciclo de vibración "C"

- d) Ciclo de vibración "D". El motor de corriente continua funcionará 4 décimas de segundo apagado y 4 décimas de segundo encendido:



Gráfica 5. Ciclo vibración "D"

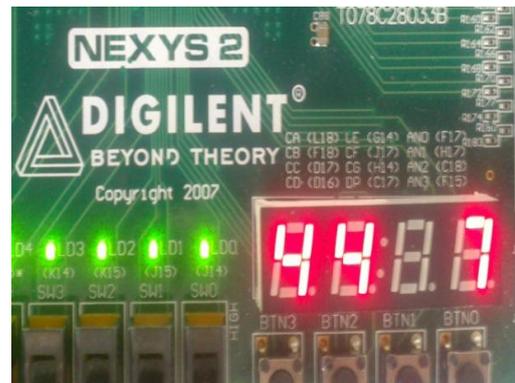
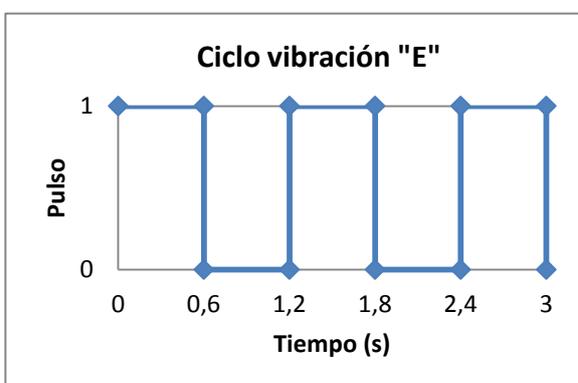


Figura 9. Configuración manual para ciclo de vibración "D"

- e) Ciclo de vibración "E". El motor de corriente continua funcionará 6 décimas de segundo apagado y 6 décimas de segundo encendido:



Gráfica 6. Ciclo vibración "E"

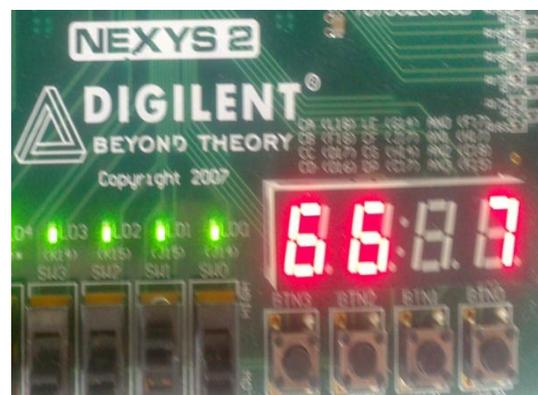


Figura 10. Configuración manual para ciclo vibración "E"

4.1.1.2 Diseño del circuito de control de velocidad y potencia del motor de corriente continua

Una vez configurada la placa FPGA con los diferentes ciclos de vibración que se van realizar para la toma de datos, es necesario diseñar un circuito para controlar la velocidad del motor de corriente continua. Este circuito además debe de proporcionar la potencia necesaria y evitar la sobretensión de los componentes.

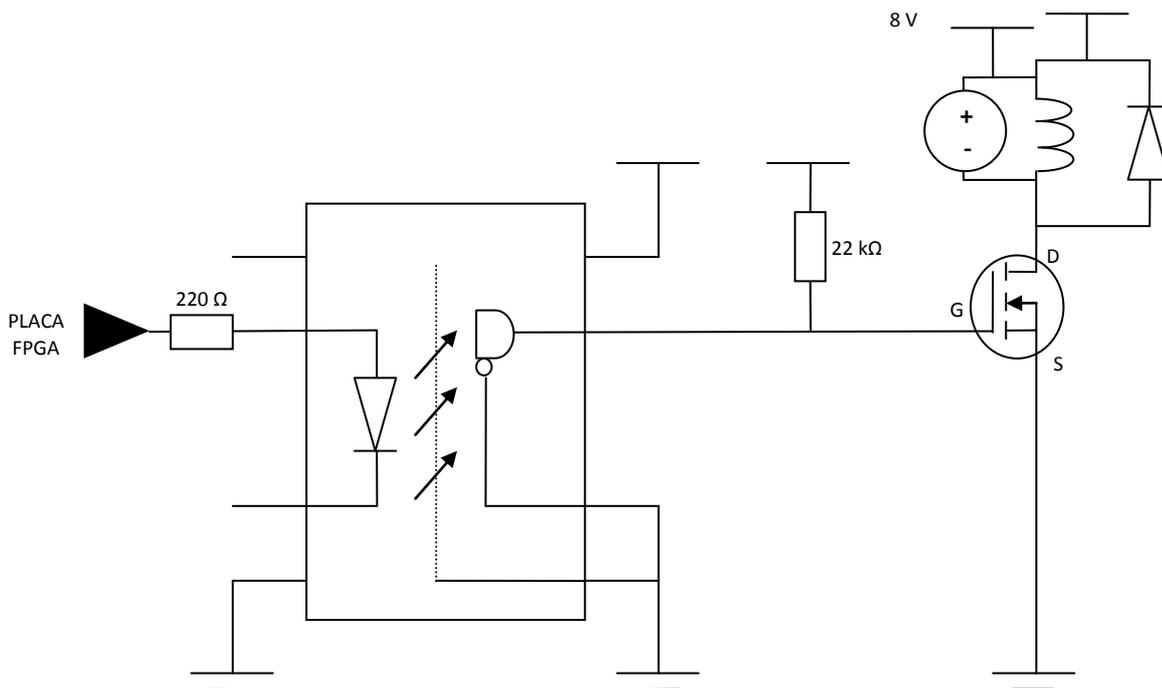


Figura 11. Esquema del circuito

El circuito diseñado para ello está formado de los siguientes componentes principales:

1. **Optoacoplador.** La función de este componente es aislar eléctricamente varias partes del circuito que se consideran de elevado valor económico, en el caso de este diseño se quiere aislar eléctricamente la placa FPGA. Para ello evita el contacto eléctrico utilizando la señal óptica. que repercute sobre la placa FPGA. La luz se transforma en señal eléctrica y el transistor acoplado dentro del optoacoplador se encarga de amplificar esta magnitud.

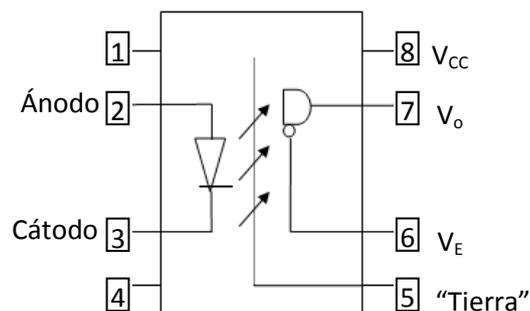
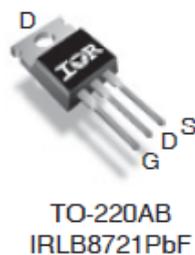


Figura 12. Diagrama del optoacoplador utilizado en el diseño

El funcionamiento general de este componente es transformar la señal eléctrica que le llega en señal óptica. Para ello tiene un diodo que cumple esta función. Una vez transmitida la señal luminosa, se vuelve a convertir en señal eléctrica a la salida del optoacoplador. La conversión de señal eléctrica a luminosa y a la inversa, permite aislar ciertas partes del diseño que se consideran más costosas económicamente. Por lo tanto, para el diseño del circuito, la característica principal que debe de tener el optoacoplador es la rapidez de transmitir la señal eléctrica.

La salida de voltaje en el pin 7 (V_0) es la que se utilizará para conectarlo al transistor. En pin 6 se conecta a “tierra” porque se habilita en el optoacoplador poniendo un cero lógico (según lenguaje binario). En el caso del pin 5, también irá conectado a “tierra” ya que es la “tierra” del propio circuito.

2. **Transistor.** La función de este componente es proporcionar la corriente necesaria al motor, es decir es un amplificador de la señal digital proporcionada por la FPGA:



G	D	S
Puerta	Drenaje	Fuente

Figura 13. Transistor utilizado en el diseño

Hay que señalar que se trata de un transistor de canal N (condiciona el sentido de la corriente de la puerta S a G), y se representa de la siguiente manera:

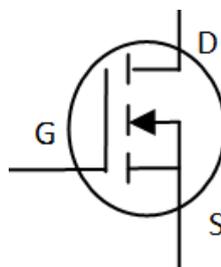


Figura 14. Transistor canal N

El hecho de utilizar este tipo de transistor se debe a que soporta un rango de valores de voltaje bastante amplio. Además el encapsulado de este tipo de transistores proporciona una mejor disipación del calor que otros tipos de transistores.

3. Diodo. La función del diodo en este circuito es evitar los picos de tensión en la bobina al cambiar la corriente de sentido instantáneamente. El diodo permitirá o no el paso de corriente dependiendo del sentido de la misma:

- Si la corriente pasa a través del diodo de ánodo a cátodo, el diodo permite el paso de la corriente:

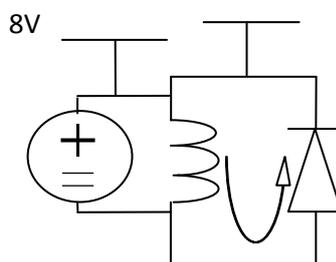


Figura 15. Diodo conduce corriente

- Si la corriente pasa a través del diodo de cátodo a ánodo, el diodo no permite el paso de la corriente:

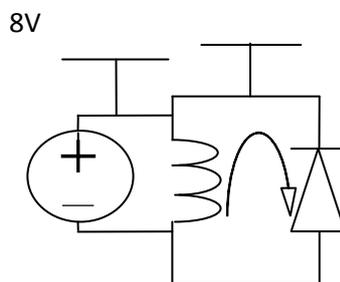


Figura 16. Diodo no conduce corriente

Por lo tanto, la función de este diodo es:

- Permitir el paso de corriente almacenada en la bobina o motor.
- Impedir el paso de corriente cuando el transistor está en "cortocircuito".

4. **Resistencias.** El circuito incorpora dos resistencias con dos funciones diferentes:

- La primera resistencia de 220Ω evita que se produzcan daños en la placa FPGA, es decir sobre los equipos más valiosos económicamente. Se coloca al inicio del optoacoplador para que en caso de sobretensiones, protege y evita que pase elevadas corrientes hacia la FPGA.
- La segunda resistencia de $22K\Omega$ recibe el nombre de resistencia "Pull-Up". Se encarga de elevar la tensión a la salida del optoacoplador.

Una vez explicados los componentes más importantes del circuito, se explicará el funcionamiento del mismo. Para poder analizarlo, se partirá de la señal emitida por la placa FPGA hacia el circuito. Siendo la señal de la placa FPGA una señal binaria, en la que el 0 no emite señal, y el 1 si que la emite. Además hay que señalar es que la alimentación al circuito se hace con una fuente de alimentación de corriente continua de 8 V.

La función del transistor tiene un papel fundamental. Se comportará como un interruptor, permitiendo o no, el paso de corriente. El paso de corriente dependerá de la señal de salida de la placa FPGA o mejor dicho de la salida de tensión del optoacoplador.

Por lo tanto, en este circuito el transistor trabajará en la zona conocida como "corte" y en la zona de "saturación". Es decir, no pasará nada de corriente a través del transistor, y en el caso contrario, pasará la corriente, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores resumidos del funcionamiento del circuito

FPGA	LED (optoacoplador)	V_{out} (optoacoplador)	V_{GS}	Actuación transistor	V_T (T. Umbral)	Motor
0	OFF	0	~ 0 V	Corte	1,35-2,38V	Apagado
1	ON	1	8 V	Saturación		Encendido

Se estudiará los dos casos por separado:

1. Cuando la señal de la placa FPGA que le llega al circuito es 0, quiere decir que a través del optoacoplador no pasa nada de corriente. Por lo tanto, el led del optoacoplador que se encarga de emitir la señal luminosa, estará apagado. Debido a esto, la tensión de salida del optoacoplador (V_{out}) será 0 V. No circulará casi corriente por la resistencia ya que:

$$I_R = \frac{8V}{22K\Omega} = 0,36 \text{ mA}$$

Como la tensión en la puerta del transistor es cero, se sitúa por debajo de la tensión umbral V_T , que es la tensión mínima necesaria para que el transistor conduzca. Por lo tanto se comporta como un “circuito abierto” y el motor estará apagado:

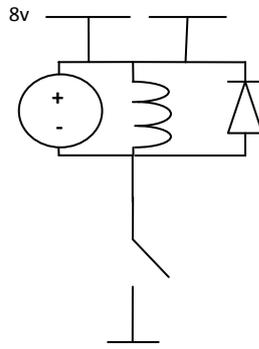


Figura 17. Transistor en “corte”

2. En el caso contrario, cuando la señal digital de la FPGA que llega al circuito es 1, el transistor actúa en “cortocircuito”. La tensión es superior que el umbral del transistor (V_T). De esta manera, el motor funciona y estará encendido:

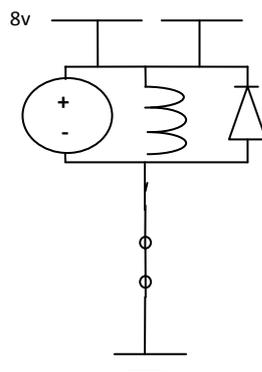


Figura 18. Transistor en “saturación”

A continuación se puede observar el resultado de todo el diseño planteado anteriormente muestra. En primer lugar se diseñó el circuito en la placa de prototipos, pero para conseguir un circuito más fiable y cómodo de manejar, el circuito se soldó en una placa más pequeña:

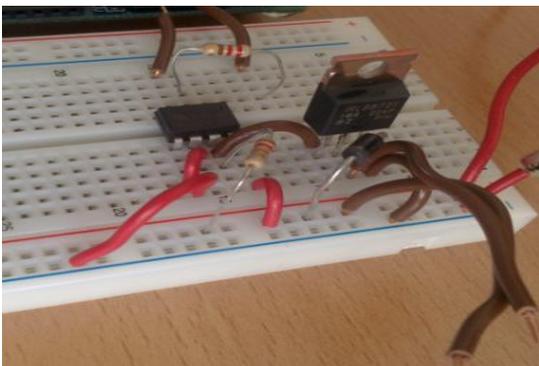


Figura 20. Circuito integrado en una placa prototipo

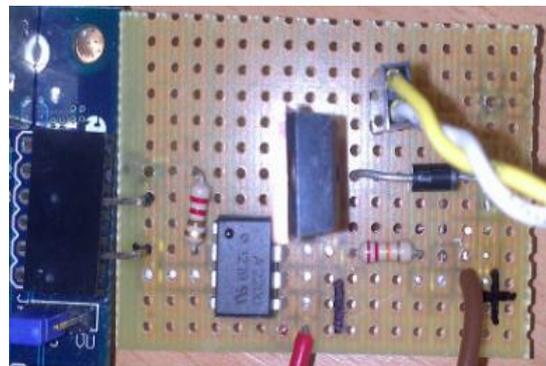


Figura 19. Circuito integrado en una placa pequeña

4.1.2 Diseño del sistema de captación de energía.

El diseño del sistema de captación planteado consiste en introducir un imán unido a un par de muelles en el interior de una estructura de PVC, la cual estará rodeada por una bobina. La bobina quedará fijada a la estructura de PVC, mientras que el imán y los muelles quedarán sin fijar dentro de la misma estructura. De esta manera, el imán se moverá dentro de la bobina rápidamente, y generará energía según la Ecuación 1. Ley de Faraday.

A continuación se muestran las representaciones de las diferentes partes del diseño definitivo del sistema de captación de energía:

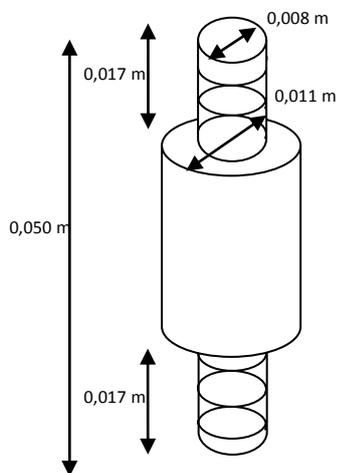


Figura 22. Representación del imán y los muelles

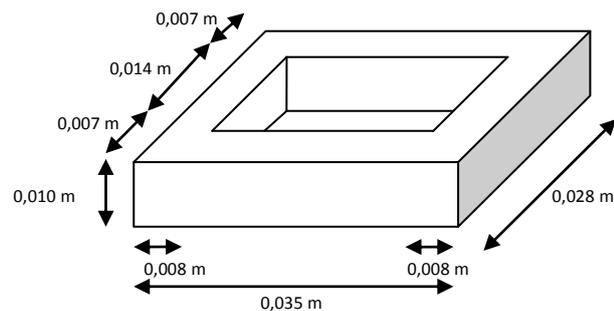


Figura 21. Representación de la bobina

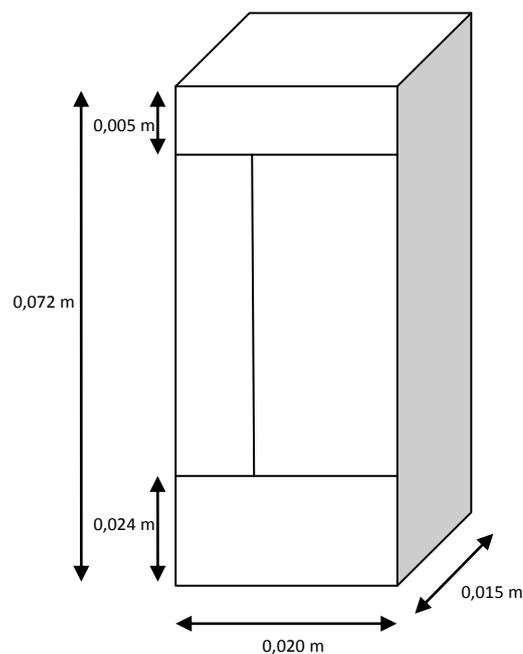


Figura 23. Representación de la estructura de PVC

Siendo el resultado final del diseño:



Imagen 3. Diseño del sistema de captación de energía

A continuación se explica de forma más detallada cada componente:

1. **Imán.** Es un imán cilíndrico recto, cuyo material es el neodimio. Las dimensiones son de 0,016 m de altura y una base circular de 0,011m de diámetro.
2. **Bobina de material conductor.** Se trata de una bobina de cobre enrollada de tal manera que por cuyo interior se instalará el imán que se ha explicado en el anterior punto. En un principio resulta intuitivo utilizar una bobina cuyo número de vueltas sea elevado, pero podría elevar demasiado el precio del diseño.
La bobina empleada en el diseño, se reutilizó de un transformador el cual estaba en desuso. La ventaja de este tipo de bobinas es su diseño compacto, ya que siendo de pequeño tamaño contienen un gran número de vueltas. El problema fue que el número de vueltas de esta bobina era desconocido. En el subapartado “7.1.1 Determinación del número de vueltas de la bobina empleada en el diseño”, se explica la metodología para encontrar el número de vueltas de la bobina, que resulto ser aproximadamente 2984 vueltas.
3. **Muelles.** Se emplean dos muelles, uno en cada base del imán, cuyas dimensiones son de 0,017m de alto y 0,008 m de diámetro.

Por último, para que el sistema de generación de energía pueda producir electricidad, tiene que estar integrado junto con el sistema que genera el movimiento de vibración como se muestra en la siguiente imagen:

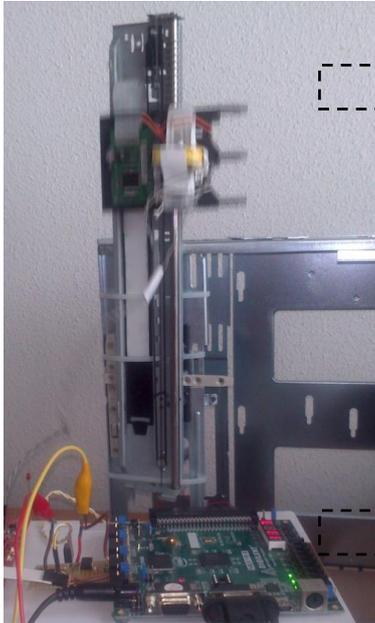


Imagen 6. Integración del sistema de generación de energía en el sistema de generación de vibraciones



Imagen 4. Detalle del sistema de generación de energía



Imagen 5. Detalle del sistema de generación de vibraciones.

4.1.3 Sistema de acondicionamiento, almacenamiento y aplicación.

La última parte del diseño consiste en el sistema de acondicionamiento, almacenamiento y la propia aplicación de la cosecha de energía. Para las dos primeras partes (acondicionamiento y almacenamiento) se ha utilizado un mismo sistema universal llamado CBC-EVAL-09¹³, el cual puede acondicionar y almacenar la energía de diferentes tipos de cosecha de energía:

- Acondicionamiento: Es necesario un bloque para la correcta administración de la potencia. En este caso se obtiene una corriente alterna del sistema de captación de energía, y que no cumple con las especificaciones requeridas por la aplicación. En este caso, el sistema universal CBC-EVAL-09 emplea un puente rectificador para pasar de corriente alterna a corriente continua.

¹³ Cymbet Corporation (www.cymbet.com)

Además, esta parte contiene un procesador de energía (CBC915) cuya función es encontrar el punto de máxima potencia (PMP), ya que cambia constantemente según la magnitud de la fuente de energía.

- Almacenamiento: Esta parte está formada por dos baterías de estado sólido conectadas en paralelo y con una capacidad de 100 μ Ah en total. La función de estas baterías es almacenar parte de la energía producida y utilizarla cuando el sistema de captación de energía no de la potencia suficiente para alimentar la aplicación. Contiene un chip (CBC51100) que es el encargado de controlar el modulo de las baterías.

A continuación se muestra una imagen del sistema, al que más tarde se le incorporará la parte de la aplicación:

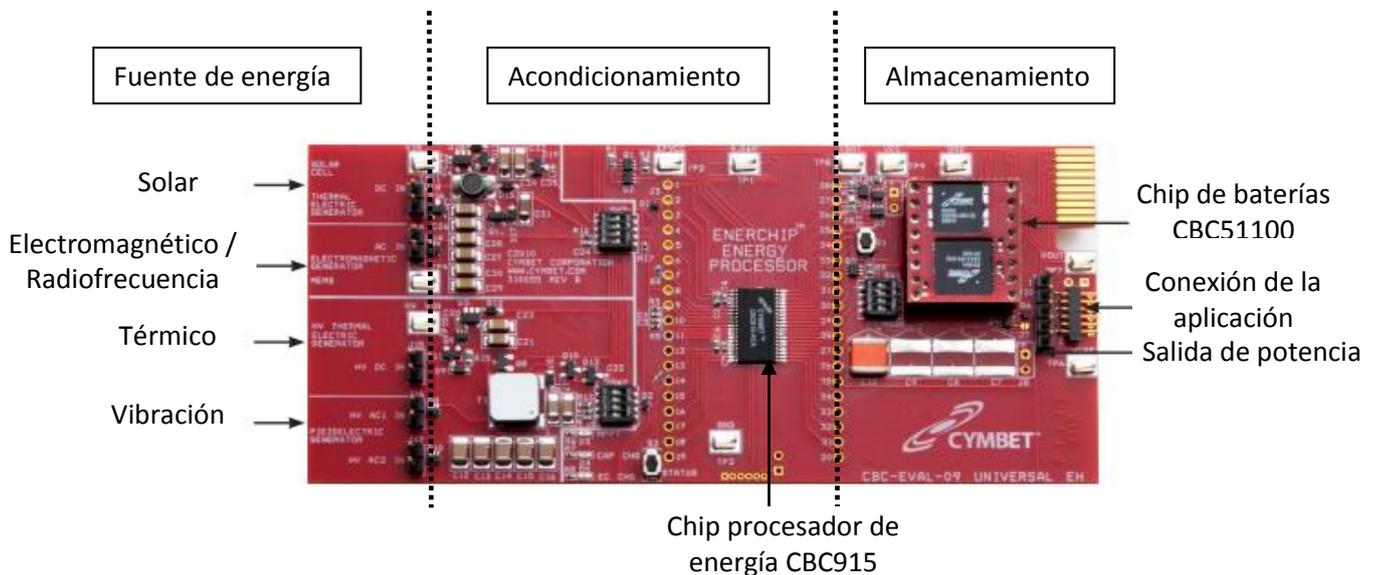


Imagen 7. Sistema de acondicionamiento y almacenamiento de energía

Una vez acondicionada y almacenada la energía, se utilizará en una aplicación. En el caso de este diseño, se ha decidido optar por una aplicación que pudiera dar información acerca del proceso de cosecha de energía (cantidad de energía, tiempo de carga de las baterías, etc.).

El equipo utilizado para la aplicación (eZ430-RF2500)¹⁴ utiliza un sensor de temperatura y manda la información a través de radiofrecuencia:

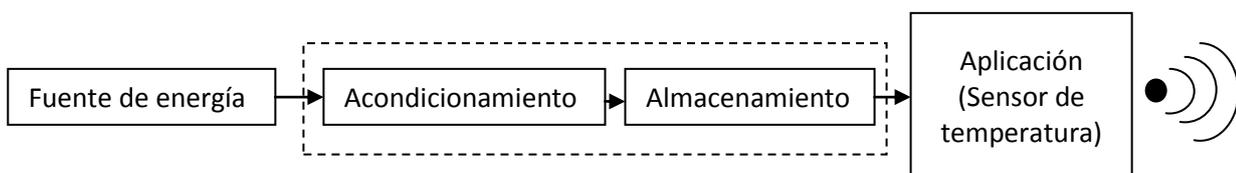


Figura 24. Esquema general del sistema de acondicionamiento, almacenamiento y la aplicación

¹⁴ Texas Instruments (www.ti.com)

La aplicación puede dividirse en dos partes:

- Emisor de información. Este módulo es el que está conectado al sistema de acondicionamiento y almacenamiento. La energía, se utiliza para alimentar el sensor de temperatura que incorpora el módulo del emisor. Esta información será procesada por un microprocesador (MSP430F2264) y por un transceptor (CC2500)(dispositivo tanto que envía y recibe señales compartiendo partes comunes del circuito), y se enviará mediante radiofrecuencia al receptor.

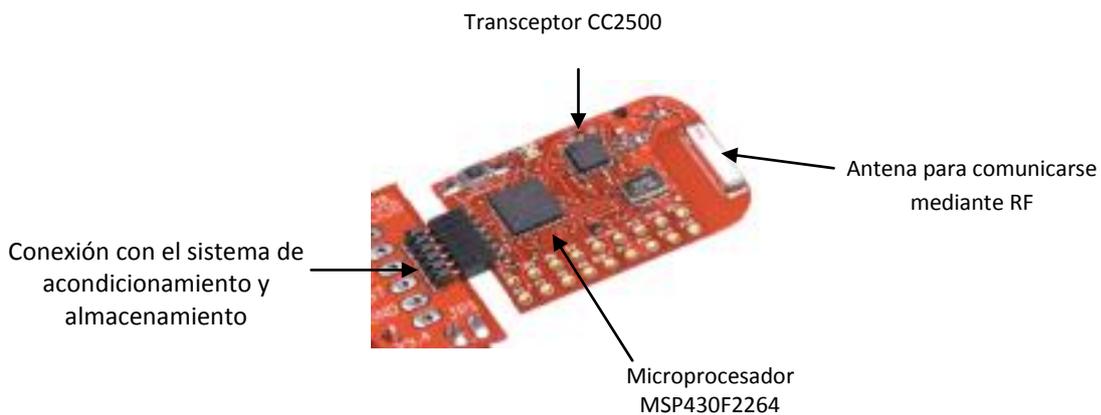


Imagen 8. Módulo emisor de información de la aplicación

- Receptor de información. Es el módulo encargado de recibir la información mediante radiofrecuencia del emisor. En este caso, es un módulo aislado y que se conecta mediante USB a un ordenador. Mediante un software instalado en el ordenador, se podrá ver la información sobre parámetros importantes de la cosecha de energía como lo son: la carga de las baterías, la potencia obtenida y la temperatura.



Imagen 9. Módulo de recepción de información de la aplicación

Por lo tanto el esquema general de la aplicación para la cosecha de energía quedaría:

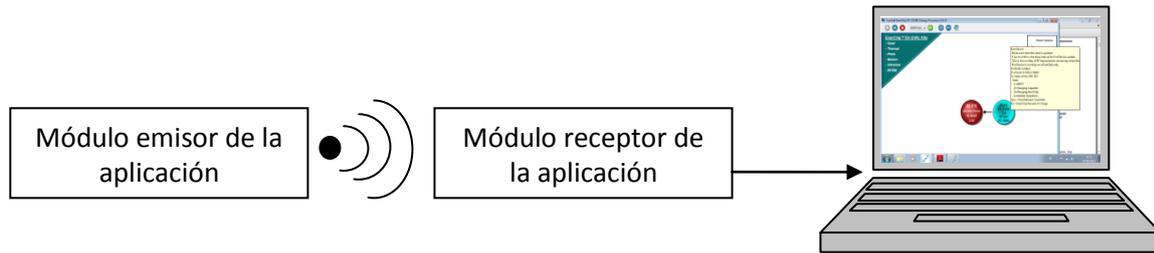


Figura 25. Esquema general de la aplicación de la cosecha de energía

El hecho de poder recibir información en un sitio alejado del propio sistema de acondicionamiento y almacenamiento, facilita la maniobrabilidad de todo el aparataje que requiere la cosecha de energía.

4.1.4 Diagrama general del diseño de cosecha de energía.

A continuación se representa un diagrama en el que quedan recogidos todos los sistemas que forman el diseño de cosecha de energía:

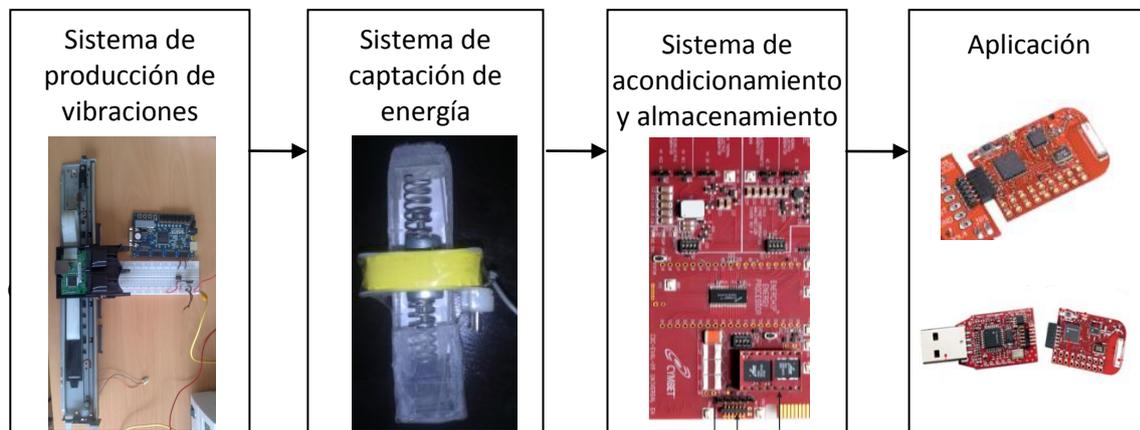


Figura 26. Resumen general del sistema de cosecha de energía

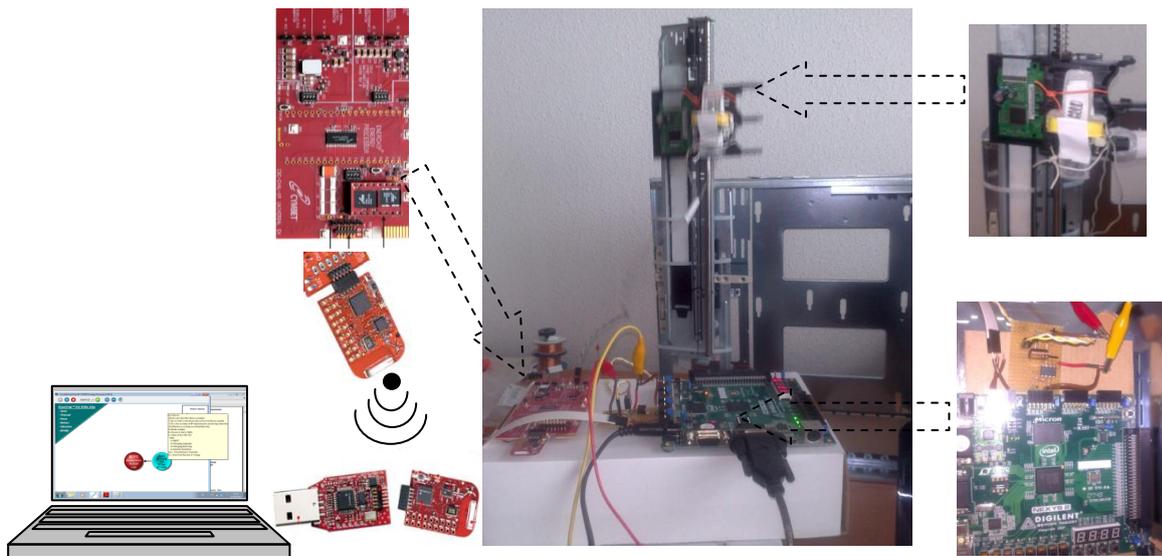


Imagen 10. Resultado final del diseño del sistema de cosecha de energía basado en el movimiento de vibración

4.2 Resultados

Para la toma de datos se ha procedido de tres maneras diferentes, en las cuales se ha aplicado los cinco ciclos de vibración explicados en el subapartado 4.1.1.1 “PWM (Modulación por ancho de pulso)”:

1. “En vacío”; sin conectar el sistema a ningún elemento, para comprobar el rango de valores de tensión que genera el sistema.
2. Conectando el sistema de cosecha de energía a una “carga”; que en este caso se trata de resistencias de diferentes valores ($470\ \Omega$ y $1\ \text{k}\Omega$).
3. Conectando el sistema a la aplicación explicada en el apartado 4.1.3 “Sistema de acondicionamiento, almacenamiento y aplicación.”

En cada experimento se genera una señal de corriente alterna, ya que la fuente de energía es electromagnética. Por lo tanto, en cada uno de los casos se tomará los valores más relevantes, que son el valor medio de la tensión alterna eficaz, el valor máximo de la tensión y por último, el valor de tensión pico a pico. En el caso del valor medio de la tensión alterna eficaz está dado directamente por el osciloscopio. Por otro lado, para obtener el valor de tensión máxima y pico a pico hay que tener en cuenta el valor de cada una de las celdas en la que está dividida la pantalla del osciloscopio.

4.2.1 Resultados obtenidos "en vacío"

El valor de cada celda de división en los siguientes casos es de 5 V, dividida cada celda en 5 unidades. Los resultados obtenidos en el osciloscopio DSO-X 2002A son los siguientes:

1. Ciclo vibración "e":

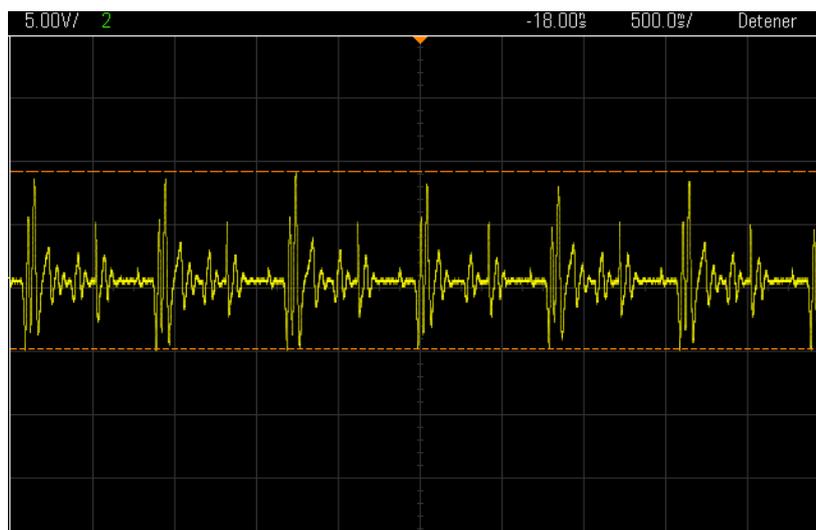


Gráfica 7. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "en vacío" en el ciclo de vibración "e"

Tabla 6. Resultados "en vacío" en el ciclo de vibración "e"

Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)
1,31	7,70	13,10

2. Ciclo vibración "d":



Gráfica 8. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "en vacío" en el ciclo de vibración "d"

Tabla 7. Resultados "en vacío" en el ciclo de vibración "d"

Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)
1,71	8,50	14,10

3. Ciclo vibración "c":

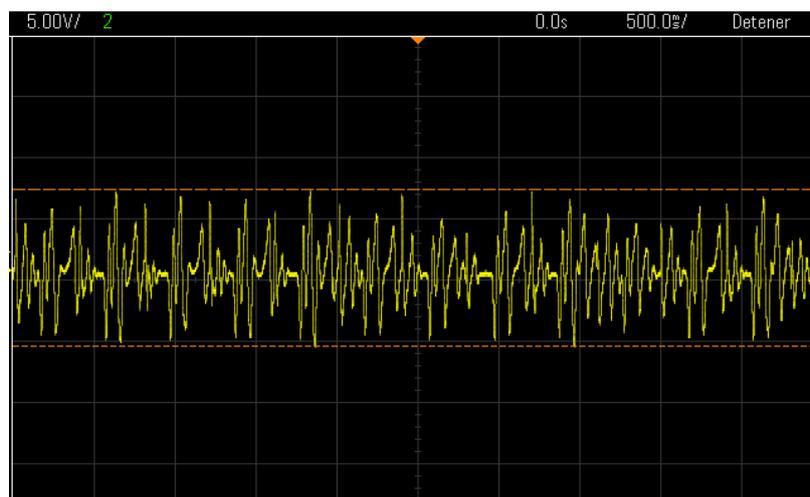


Gráfica 9. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "en vacío" en el ciclo de vibración "c"

Tabla 8. Resultados "en vacío" en el ciclo de vibración "c"

Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)
1,62	6,9	12,30

4. Ciclo vibración "b":



Gráfica 10. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "en vacío" en el ciclo de vibración "b"

Tabla 9. Resultados "en vacío" en el ciclo de vibración "b"

Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión te pico-pico (V)
2,24	6,70	12,90

5. Ciclo vibración "a"



Gráfica 11. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "en vacío" en el ciclo de vibración "a"

Tabla 10. Resultados "en vacío" en el ciclo de vibración "a"

Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)
3,23	9,70	17,30

A continuación se muestran recogidos en una sola tabla, los resultados obtenidos en los anteriores apartados:

Tabla 11. Resumen de resultados de los cinco ciclos de vibración "en vacío"

	Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)
Ciclo vibración "e"	1,31	7,70	13,10
Ciclo vibración "d"	1,67	8,50	14,10
Ciclo vibración "c"	1,71	6,90	12,30
Ciclo vibración "b"	2,24	6,70	12,90
Ciclo vibración "a"	3,23	9,70	17,30

El ciclo de vibración “e” es el movimiento más lento de los cinco ciclos, ya que el motor de corriente continua se enciende y apaga en periodos de 0,6 segundos. Siendo el ciclo de vibración más rápido el “a”, que enciende y apaga el motor en ciclos de 0,1 segundos (explicado en el subapartado 4.1.1.1)

De manera general, se puede apreciar un incremento de la tensión conforme aumenta la rapidez del movimiento de vibración:

- Los valores de la tensión media eficaz aumentan conforme se incrementa la rapidez del movimiento de vibración. El mayor valor de la tensión media alterna eficaz es de 3,23 V y se produce con el ciclo de vibración “a”.
- El pico máximo de tensión alterna tiene en cuenta únicamente los valores positivos de la señal de la corriente alterna. Estos valores tienen por lo general una tendencia creciente según aumenta la rapidez del movimiento de vibración, siendo el mayor valor de esta medida la del ciclo de vibración “a” (9,70 V).

En este caso, los valores más pequeños de tensión máxima no se corresponden con el ciclo de vibración más lento (“e”). Puede venir dado a dos motivos: a que los movimientos de vibración no siempre producen el mismo movimiento del imán y los muelles, por lo que pueden provocar picos de tensión más elevados aunque el ciclo de vibración sea lento, y por otro lado, debido a resonancia de la frecuencia del movimiento y la de los muelles.

Según la toma de datos, los valores mínimos se corresponden con el ciclo “c” y “b”, con 6,90 V y 6,70 V respectivamente.

- Lo mismo que en el apartado anterior ocurre con los valores de tensión pico a pico, ya que ahora se tiene en cuenta tanto los valores positivos como los negativos de la señal de corriente continua. El mayor valor de tensión es de 17,30 V y se obtiene en el ciclo de vibración “a”.

Los valores más pequeños de corriente pico a pico son de 12,30 V y 12,90 V, y se producen en los ciclos “c” y “b” respectivamente. La explicación a ello se debe, como en el caso anterior, a que el movimiento de vibración no produce movimientos constantes sobre el imán y los muelles.

4.2.2 Resultados obtenidos "con carga" de 470 Ω y 1 k Ω .

Se realizará la toma de datos para cada ciclo de vibración del subapartado 4.1.1.1 , pero en este caso con una carga conectada al final del sistema, con el fin de comprobar el comportamiento del sistema de cosecha de energía.

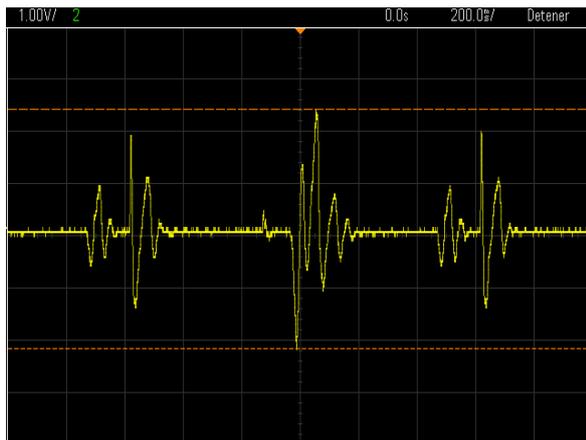
En este caso se puede calcular la potencia, con esta sencilla fórmula:

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

Ecuación 3. Potencia en función de la tensión y la resistencia.

Para ello se ha utilizado, como en el apartado anterior, el osciloscopio DSO-X 2002A, teniendo en cuenta que el valor de las celdas es de 1 V para unos casos y 2 V en otros:

1. Ciclo de vibración "e":



Gráfica 12. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 470 K Ω en el ciclo de vibración "e"



Gráfica 13. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 1 k Ω en el ciclo de vibración "e"

Tabla 12. Resultados "con carga" en el ciclo de vibración "e"

Carga (Ω)	Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)	Potencia (mW)
470	0,40	2,27	4,60	0,35
1000	0,59	3,00	6,40	0,35

2. Ciclo de vibración "d":



Gráfica 14. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 470 Ω en el ciclo de vibración "e"



Gráfica 15. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 1 kΩ en el ciclo de vibración "d"

Tabla 13. Resultados "con carga" en el ciclo de vibración "d"

Carga (Ω)	Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)	Potencia (mW)
470	0,56	2,34	4,58	0,67
1000	0,79	2,42	4,86	0,63

3. Ciclo de vibración "c":



Gráfica 17. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 470 Ω en el ciclo de vibración "c"



Gráfica 16. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 1 kΩ en el ciclo de vibración "c"

Tabla 14. Resultados "con carga" en el ciclo de vibración "c"

Carga (Ω)	Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)	Potencia (mW)
470	0,62	2,34	4,62	0,81
1000	0,81	2,59	5,80	0,66

4. Ciclo de vibración "b":



Gráfica 18. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 470 Ω en el ciclo de vibración "b"



Gráfica 19. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 1 k Ω en el ciclo de vibración

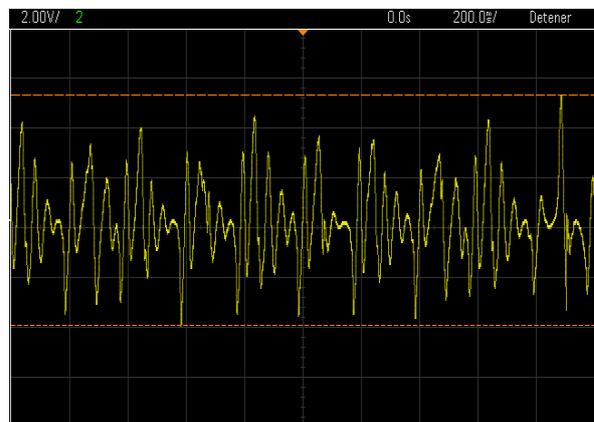
Tabla 15. Resultados "con carga" en el ciclo de vibración "b"

Carga (Ω)	Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)	Potencia (mW)
470	0,80	2,42	4,86	1,36
1000	1,18	3,72	7,30	1,40

5. Ciclo de vibración "a":



Gráfica 20. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 470 Ω en el ciclo de vibración



Gráfica 21. Variación de la tensión con el tiempo para la toma de datos "con carga" de 1k Ω en el ciclo de vibración

Tabla 16. Resultados "con carga" en el ciclo de vibración "a"

Carga (Ω)	Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)	Potencia (mW)
470	1,06	3,23	6,20	2,40
1000	1,52	5,01	9,20	2,32

A continuación se muestra una tabla que recoge todos los resultados obtenidos en la toma de datos "con carga" para los diferentes ciclos de vibración:

Tabla 17. Resumen de resultados de los cinco ciclos de vibración "con carga"

		Tensión media alterna eficaz (V)	Tensión máxima (V)	Tensión pico-pico (V)	Potencia mW
470 Ω	Ciclo vibración "e"	0,40	2,27	4,60	0,35
	Ciclo vibración "d"	0,56	2,34	4,58	0,67
	Ciclo vibración "c"	0,62	2,34	4,62	0,81
	Ciclo vibración "b"	0,80	2,42	4,86	1,36
	Ciclo vibración "a"	1,06	3,23	6,20	2,40
1 kΩ	Ciclo vibración "e"	0,59	3,00	6,40	0,35
	Ciclo vibración "d"	0,79	2,42	4,86	0,63
	Ciclo vibración "c"	0,81	2,59	5,80	0,66
	Ciclo vibración "b"	1,18	3,72	7,30	1,40
	Ciclo vibración "a"	1,52	5,01	9,20	2,32

A partir de los datos de la tabla anterior se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La tensión media alterna efectiva, la tensión máxima, la tensión pico-pico y la potencia, aumentan a medida que se incrementa la velocidad del ciclo de vibración.

Existen algunas excepciones, en el caso de la tensión máxima y tensión pico a pico (entre los ciclos de vibración “e” y “d”), ya que el movimiento de vibración causa un desplazamiento del sistema de captación de energía que no es constante, pudiendo provocar picos de tensión. También puede venir dado por la resonancia entre el movimiento de los muelles y el propio sistema.

- A la hora de introducir una resistencia mayor en el sistema se puede apreciar lo previsible, es decir que tanto los valores de tensión media eficaz, tensión máxima y de pico a pico, son mayores que el caso de tener menor resistencia.
- Por otro lado, en la mayoría de los casos (excepto en el caso “b”) la potencia disminuye al aumentar la resistencia (Ecuación 3). Pero como se ha mencionado anteriormente, también hay que tener en cuenta que cuanto mayor es la resistencia, mayor es la tensión.

4.2.3 Resultados obtenidos con la aplicación del sensor de temperatura.

En este apartado se recogen los resultados obtenidos al conectar la aplicación del sensor de temperatura explicado en el apartado 4.1.3 “Sistema de acondicionamiento, almacenamiento y aplicación.”

En este caso, la herramienta principal para la toma de datos es el software “CBC 915 Energy Processor 3.0.3”. Se trata de una herramienta que se instala en el ordenador, y se comunica mediante radiofrecuencia al sistema de acondicionamiento y almacenamiento. Mediante este software se puede extraer información acerca de la temperatura ambiente, la potencia, y el porcentaje de carga de las baterías y la fase o el estado del sistema de almacenamiento y procesamiento, que será en este orden:

- Búsqueda del punto máximo de potencia.
- Cargando el sistema.
- Operación normal.

En la pantalla del ordenador aparecerá la Imagen 11, donde el punto azul es el sistema de cosecha de energía y el punto rojo representa el punto de acceso (ordenador) donde se recoge la información en tiempo real.

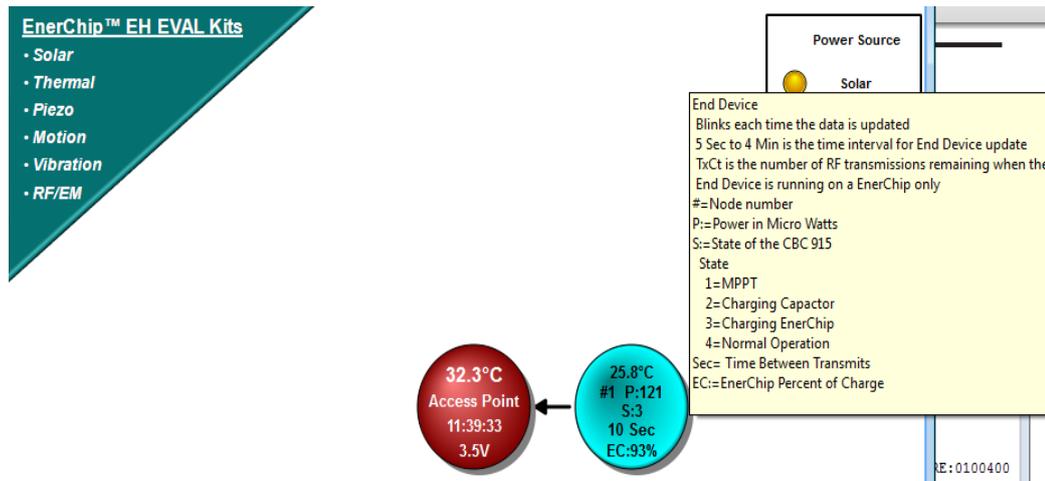


Imagen 11. Captura de pantalla durante la toma de datos del ciclo de vibración "e"

A continuación se tomarán los datos de cada uno de los ciclos de vibración:

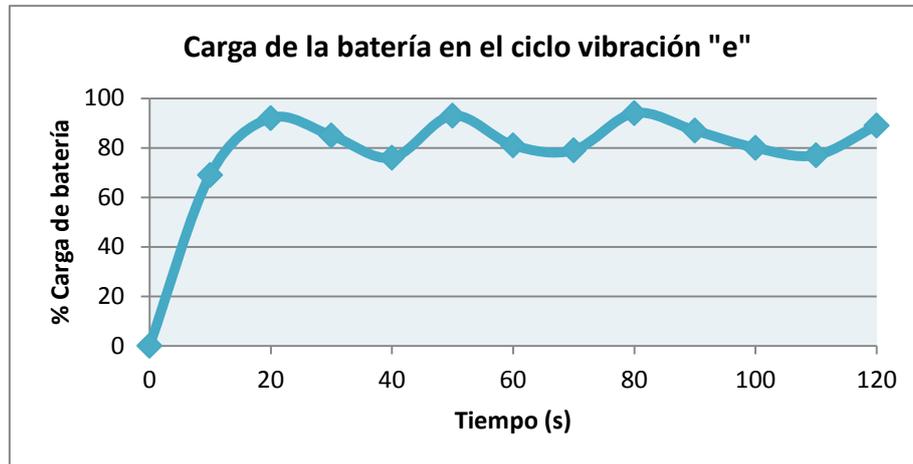
1. Ciclo de vibración "e":

Tabla 18. Datos obtenidos mediante el software "CBC 915 Energy Processor 3.0.3" en el ciclo de vibración "e".

Ciclo de vibración "e"						
Tiempo (sg)	Temperatura (°C)	Batería (V)	Fuerza de la señal recibida al PC (%)	Estado del sistema de almacenamiento y procesamiento	Carga de batería (%)	Potencia (µW)
0	26,17	3,3	30	Buscando el máximo pico de potencia	0	0
10	26,17	3,3	32	Cargando el sistema	69	121
20	25,78	3,3	31	Cargando el sistema	92	121
30	25,78	3,3	32	Cargando el sistema	85	121
40	25,78	3,3	32	Cargando el sistema	76	121
50	25,78	3,3	30	Cargando el sistema	93	121
60	25,78	3,3	28	Cargando el sistema	81	121
70	25,78	3,3	29	Cargando el sistema	79	121
80	25,78	3,3	29	Cargando el sistema	94	121
90	25,78	3,3	29	Cargando el sistema	87	121
100	25,78	3,3	30	Cargando el sistema	80	121
110	25,78	3,3	30	Cargando el sistema	77	121
120	25,78	3,3	29	Cargando el sistema	89	121

El valor de la temperatura es el mismo durante todo el tiempo, ya que se corresponde con el valor de la temperatura ambiente de una habitación cerrada, y a no ser que existan perturbaciones en el ambiente (corrientes de aire) no variará.

En primer lugar, el sistema de almacenamiento y procesamiento busca el punto de máxima potencia, y a partir de ahí empiezan a cargarse las baterías. El sistema empieza a cargar las baterías en un periodo menor de 10 segundos. El porcentaje de carga de las baterías no permanece constante a lo largo del tiempo, ya que al generarse tan poca potencia no da tiempo a cargarse totalmente las baterías.



Gráfica 22. Evolución del porcentaje de la carga de la batería con el tiempo en el ciclo de vibración "e".

Se pueden apreciar diferentes periodos a lo largo de la toma de datos. A tiempo inicial, el porcentaje de la carga de la batería es nulo e irá aumentando hasta alcanzar un máximo a los 20 segundos. Al transcurrir 40 segundos, la batería empieza a descargarse hasta un porcentaje del 76 %. Y volverá a alcanzar un pico máximo alcanzado los 50 segundos. Por lo tanto, la batería una vez cargada se encarga de enviar datos y se va cargando con el circuito de cosecha de energía.

La potencia generada ($121 \mu\text{W}$) en todo momento es constante una vez que empiezan a cargarse las baterías. En realidad, la potencia no es contante ya que normalmente los sistemas de cosecha de energía reciben potencias variables debido a que la disponibilidad energética en el ambiente es variable. Puede deberse a un fallo de la aplicación puesto que el sistema no actualiza los datos de potencia.

Lo importante es que el sistema esté diseñado de modo que tenga un almacenamiento suficiente para que cuando haya exceso de energía se almacene, y cuando no se produzca suficiente se pueda recurrir a la energía almacenada. Al final, la suma total de la energía recolectada debe ser mayor que la utilizada. Sin embargo, puede haber momentos en que se esté utilizando más energía de la que se recolecta.

2. Ciclo de vibración "d":

Tabla 19. Datos obtenidos mediante el software "CBC 915 Energy Processor 3.0.3" en el ciclo de vibración "d".

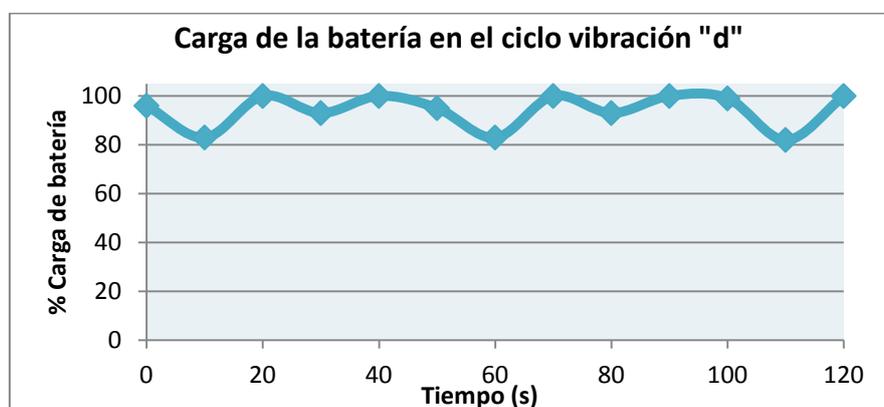
Ciclo de vibración "d"						
Tiempo (sg)	Temperatura (°C)	Batería (V)	Fuerza de la señal recibida al PC (%)	Estado del sistema de almacenamiento y procesamiento	Carga de batería (%)	Potencia (μW)
0	26,17	3,4	33	Cargando el sistema	96	193
10	25,78	3,4	32	Cargando el sistema	83	193
20	25,39	3,4	29	Cargando el sistema	100	193
30	25,78	3,4	30	Cargando el sistema	93	193
40	25,78	3,4	32	Operación normal	100	193
50	25,78	3,4	27	Operación normal	95	193
60	26,17	3,4	32	Operación normal	83	193
70	25,78	3,4	32	Operación normal	100	193
80	25,78	3,4	32	Operación normal	93	193
90	25,78	3,4	32	Operación normal	100	193
100	26,17	3,4	32	Operación normal	99	193
110	25,78	3,4	32	Operación normal	82	193
120	25,78	3,4	30	Operación normal	100	193

El sistema de almacenamiento y procesamiento entrará en modo de "operación normal" una vez que haya pasado la fase de "carga del sistema" y "búsqueda de máximo pico de potencia", aunque esta última no es necesaria ya que la batería está cargada desde el inicio.

En el caso de la temperatura, sufre pequeñas variaciones a lo largo del tiempo (no superiores a 1°C) y pueden venir dadas por perturbaciones en el ambiente, como lo son las corrientes de aire.

El ciclo de vibración "d", al ser más rápido que el ciclo de vibración "e" (visto en el subapartado 4.1.1.1), produce una potencia mayor y una tensión de batería superior.

Además, la carga de la batería no permanece constante durante el tiempo de toma de datos:



Gráfica 23. Evolución del porcentaje de la carga de la batería con el tiempo en el ciclo de vibración "d".

En este caso, la batería comienza parcialmente cargada (96 %), y sufre máximos y mínimos de carga a lo largo del tiempo. Además, al generar una mayor potencia, las baterías se cargarán totalmente en algún momento.

3. Ciclo de vibración "c":

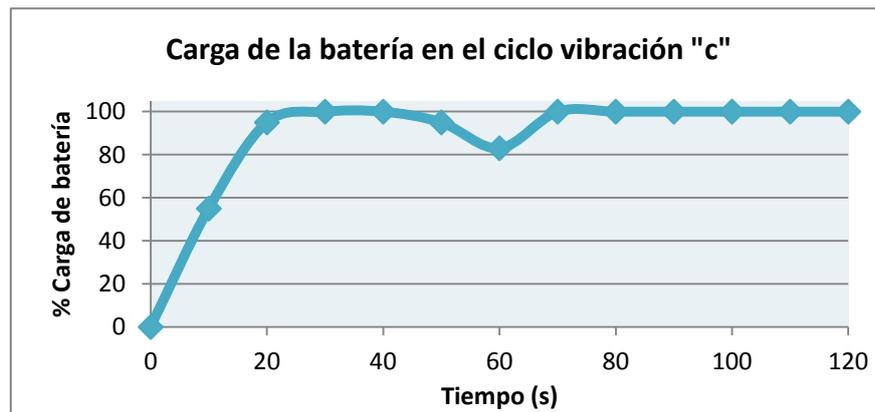
Tabla 20. Datos obtenidos mediante el software "CBC 915 Energy Processor 3.0.3" en el ciclo de vibración "c".

Ciclo de vibración "c"						
Tiempo (sg)	Temperatura (°C)	Batería (V)	Fuerza de la señal recibida al PC (%)	Estado del sistema de almacenamiento y procesamiento	Carga de batería (%)	Potencia (μW)
0	25,78	3,3	25	Buscando el máximo pico de potencia	0	0
10	25,39	3,4	25	Operación normal	55	256
20	25,39	3,5	26	Operación normal	95	256
30	25,39	3,5	26	Operación normal	100	256
40	25,78	3,5	26	Operación normal	100	256
50	25,39	3,5	23	Operación normal	95	256
60	25,78	3,5	23	Operación normal	83	256
70	25,78	3,4	25	Operación normal	100	256
80	25,39	3,4	26	Operación normal	100	256
90	25,78	3,4	26	Operación normal	100	256
100	25,78	3,4	25	Operación normal	100	256
110	25,78	3,4	26	Operación normal	100	256
120	25,39	3,4	26	Operación normal	100	256

La temperatura sufre pequeñas variaciones a lo largo del tiempo, ya que no hay grandes perturbaciones que hagan variar su valor de forma considerable. Además, la potencia generada en este ciclo es mayor que en el ciclo de vibración "d". El sistema de captación de energía al moverse con mayor rapidez, produce una mayor potencia que en el caso anterior.

A tiempo inicial, el sistema necesita encontrar el máximo pico de potencia y a partir de ahí, cargar las baterías para entrar en el modo de "operación normal".

Pero la carga de las baterías no es constante a lo largo de la toma de datos:



Gráfica 24. Evolución del porcentaje de la carga de la batería con el tiempo en el ciclo de vibración "c".

Durante el ciclo de vibración "c", la carga de la batería inicialmente está totalmente descargada. El sistema necesita alrededor de unos 20 segundos para cargar las baterías al 95%. A partir de este momento, las baterías permanecen cargadas al 100%, ya que el sistema produce suficiente potencia.

Existe un mínimo de carga de batería a los 60 segundos. Puede deberse a un descenso de la potencia de suministrada por el sistema de captación de energía, ya que este sistema no se mueve igual durante el ciclo de vibración. Por lo tanto, para poder suministrar la misma potencia a la aplicación, las baterías aportan la energía almacenada anteriormente.

4. Ciclo de vibración "b":

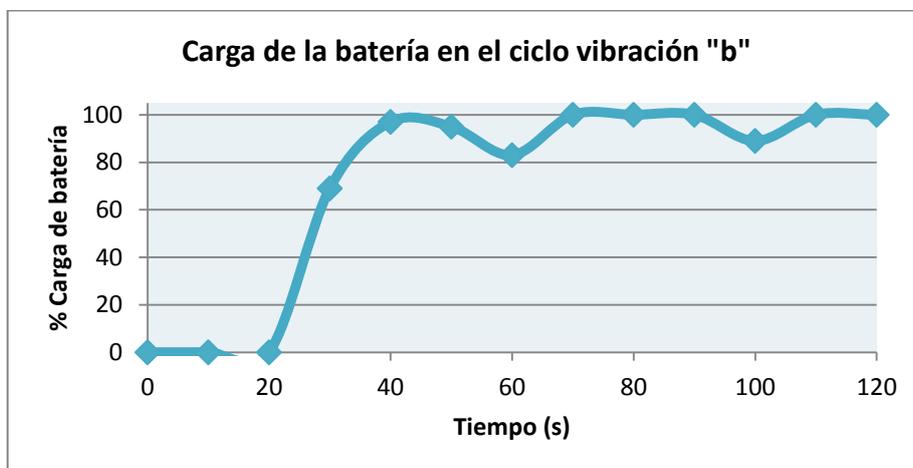
La temperatura apenas sufre variación al no existir grandes perturbaciones en el ambiente.

El modo de operación del sistema de almacenamiento y procesamiento, pasa por las tres fases; "buscando el máximo pico de potencia", "cargando el sistema" y "operación normal" respectivamente. La fase de "operación normal" no empieza hasta los 30 segundos, algo más tarde que en el caso del ciclo de vibración "c" (a los 10 segundos). Puede venir dado por una mala señal de comunicación (7 %) entre el sistema de cosecha de energía y el punto de acceso. Esto sólo ocurre al inicio de la toma de datos, ya que la fuerza con que llega la señal de comunicación en el resto del tiempo se sitúa entre el 23-30 %.

Tabla 21. Datos obtenidos mediante el software "CBC 915 Energy Processor 3.0.3" en el ciclo de vibración "b".

Ciclo de vibración "b"						
Tiempo (sg)	Temperatura (°C)	Batería (V)	Fuerza de la señal recibida al PC (%)	Estado del sistema de almacenamiento y procesamiento	Carga de batería (%)	Potencia (μW)
0	25,39	3,2	7	Buscando el máximo pico de potencia	0	0
10	25,00	3,2	23	Buscando el máximo pico de potencia	0	0
20	25,39	3,4	29	Cargando el sistema	0	698
30	25,00	3,5	28	Operación normal	69	698
40	25,39	3,5	30	Operación normal	97	698
50	25,39	3,5	28	Operación normal	95	698
60	25,39	3,5	29	Operación normal	83	698
70	25,39	3,5	30	Operación normal	100	698
80	25,39	3,5	29	Operación normal	100	698
90	25,39	3,5	28	Operación normal	100	698
100	25,39	3,5	27	Operación normal	89	698
110	25,78	3,5	29	Operación normal	100	698
120	25,78	3,5	29	Operación normal	100	698

La carga de la batería, como en los anteriores casos, no permanece constante en el tiempo:



Gráfica 25. Evolución del porcentaje de la carga de la batería con el tiempo en el ciclo de vibración "b".

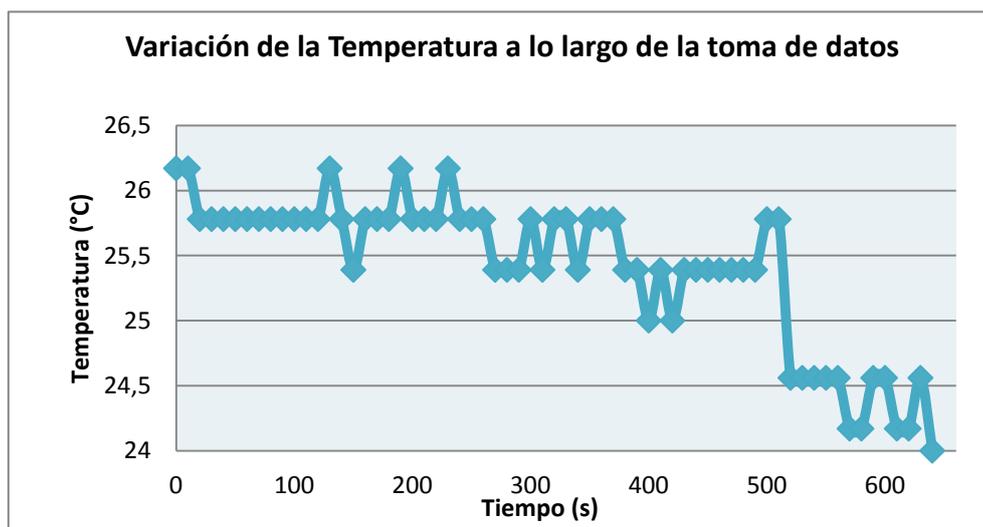
Es necesario alrededor de 40 segundos para cargar las baterías, y a partir de este momento periodos de carga y de descarga en función de la energía producida por el sistema de captura de energía. En el momento que la potencia suministrada por el sistema de captura no sea suficiente, las baterías proporcionan la energía almacenada para suministrar siempre una potencia constante.

5. Ciclo de vibración "a":

Tabla 22. Datos obtenidos mediante el software "CBC 915 Energy Processor 3.0.3" en el ciclo de vibración "a".

Ciclo de vibración "a"						
Tiempo (sg)	Temperatura (°C)	Batería (V)	Fuerza de la señal recibida al PC (%)	Estado del sistema de almacenamiento y procesamiento	Carga de batería (%)	Potencia (μW)
0	24,56	3,2	26	Buscando el máximo pico de potencia	0	0
10	24,56	3,6	28	Operación normal	0	832
20	24,56	3,6	29	Operación normal	82	832
30	24,56	3,5	29	Operación normal	61	832
40	24,56	3,5	28	Operación normal	93	832
50	24,17	3,5	32	Operación normal	96	832
60	24,17	3,5	30	Operación normal	99	832
70	24,56	3,5	29	Operación normal	100	832
80	24,56	3,5	32	Operación normal	100	832
90	24,17	3,5	28	Operación normal	100	832
100	24,17	3,5	29	Operación normal	100	832
110	24,56	3,6	29	Operación normal	83	832
120	24,00	3,6	28	Operación normal	86	832

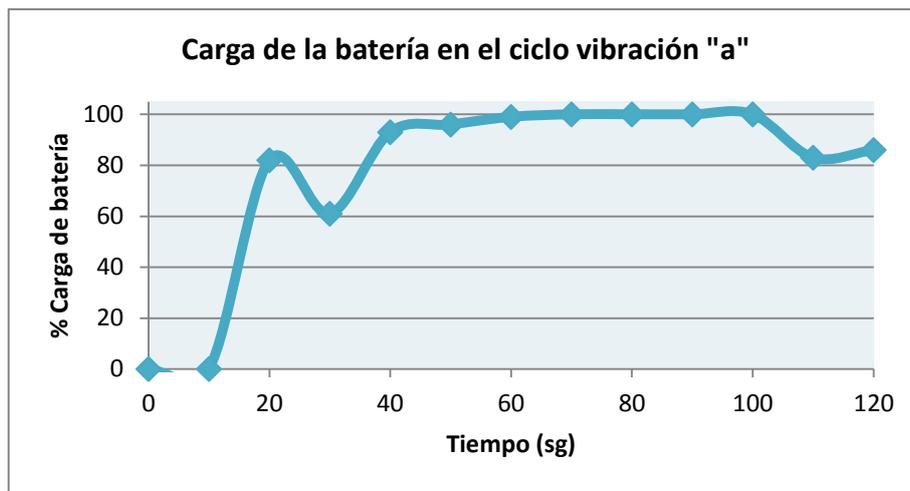
La temperatura es prácticamente constante a lo largo de los 120 segundos. Pero hay que señalar que desde la primera toma de datos del ciclo de vibración "e" hasta la del ciclo de vibración "a", la temperatura ha variado en torno a 2°C:



Gráfica 26. Variación de temperatura respecto del tiempo durante la toma de datos para los diferentes ciclos de vibración.

El sistema comienza buscando el punto máximo de potencia y más tarde operando con normalidad. Esta última fase se alcanza a los 10 segundos de la toma de datos, siendo la potencia generada de $832 \mu\text{W}$, un valor superior a los anteriores obtenidos en los diferentes ciclos de vibración. Debido a que el sistema de captura de energía se mueve más rápidamente, produce una variación del flujo magnético mayor con respecto al tiempo, generando así una mayor fuerza electromotriz (Ecuación 1. Ley de Faraday).

La carga de la batería evoluciona de la siguiente manera:



Gráfica 27. Evolución del porcentaje de la carga de la batería con el tiempo en el ciclo de vibración "a".

Las baterías no empiezan a cargarse hasta que transcurren 10 segundos. Al inicio de la toma de datos, en torno a los 20 segundos, la batería se descarga rápidamente ya que el sistema de captura de energía no suministra la potencia necesaria y lo tiene que hacer la batería. Es a partir de los 50 segundos cuando se carga completamente.

4.2.4 Posibles mejoras que se pueden aplicar al sistema.

En primer lugar hay que mencionar, que los ciclos de vibración son periódicos, es decir, son iguales durante todo el tiempo que dura la toma de datos. Hay que tener en cuenta que las vibraciones disponibles en el ambiente, no siempre son iguales a lo largo del tiempo. Por lo tanto, quedaría probar el sistema de cosecha de energía para casos reales que sean fuentes emisoras de vibración.

Partiendo de esta base, se podrían introducir varias mejoras:

- Introducir un imán con una fuerza de atracción mayor dentro del sistema de captura de energía. Aunque hay que tener en cuenta que un mayor peso del imán reduce el movimiento dentro del sistema.
- Introducir una bobina con un número mayor de vueltas.
- Estudiar la resonancia y ajustar el muelle y el peso para conseguir la máxima cosecha de energía.

4.3 Líneas futuras. Cosecha de energía mediante radiofrecuencia.

Nikola Tesla fue el primero que patentó un sistema para poder aprovechar la energía radiante disponible en el ambiente (patente US 685957). A continuación se explicará un circuito basado en la anterior patente, que consiste en captar las ondas de radiofrecuencia mediante una antena y almacenar esa energía en condensadores:

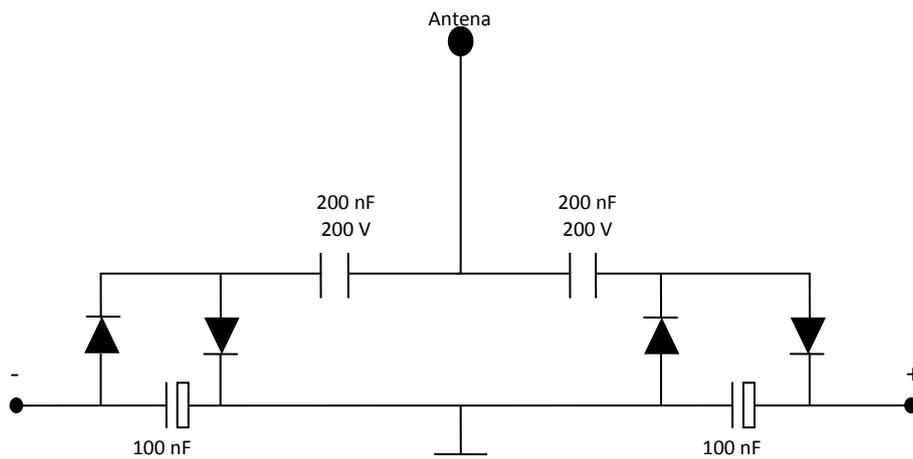


Figura 27. Circuito para captar energía mediante radiofrecuencia

El circuito se compone de:

- Una antena de alambre, cuya función es recibir la radiofrecuencia.
- Dos condensadores de 200 nF situados en serie con la antena.
- Cuatro diodos de germanio (1N34). Se utiliza este tipo de diodos debido a que su tensión de polarización directa es de 0,3 V, frente a los 0,7 V de los diodos de silicio.
- Dos condensadores de 100 nF conectado cada uno a dos de los diodos anteriores según indica la Figura 27.

Este circuito debe situarse cerca de una fuente emisora de radiofrecuencia, que en este caso es el monitor de un ordenador. Y la medida del voltaje obtenido realizará mediante un multímetro digital:

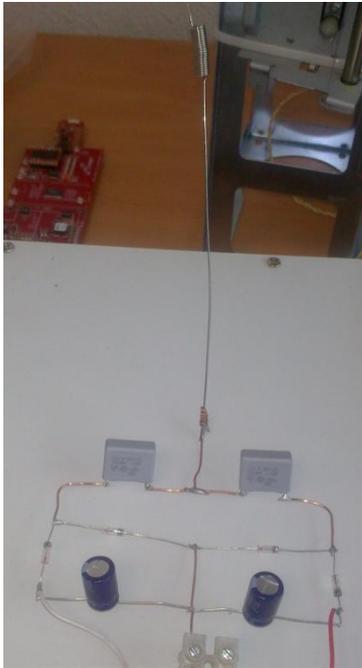


Figura 30 Diseño final del circuito de cosecha de energía mediante radiofrecuencia.

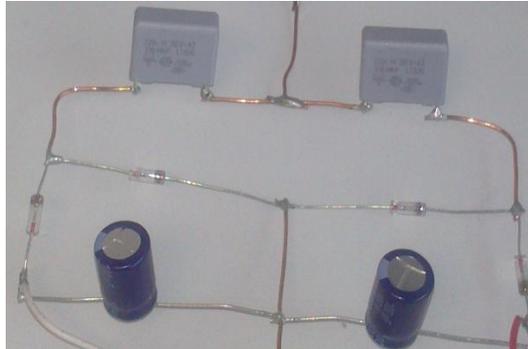


Figura 28. Diseño del circuito



Figura 29. Resultado de voltaje al acercar el sistema a una fuente emisora de radiofrecuencia

Cuando se acerca este circuito a una fuente de radiofrecuencia, como lo es un monitor de rayos catódicos, la tensión a la salida es de 2,32 V. Sin embargo, aún teniendo un dato de tensión significativo, a la hora de conectar este sistema de cosecha de energía al sistema de acondicionamiento y almacenamiento explicado en el subapartado 4.1.3 “Sistema de acondicionamiento, almacenamiento y aplicación.”, puede darse que la potencia sea muy pequeña y que no sea capaz de alimentar al sistema de acondicionamiento y almacenamiento.

Por lo tanto, existen varias alternativas para poder paliar el problema de la potencia, entre las que se pueden mencionar:

- Instalando el sistema de cosecha de energía cerca de una fuente que emita más radiofrecuencia.
- Utilizando materiales que ofrezcan menor resistencia al paso de la corriente.
- Instalando en serie varios de los circuitos que aparecen en la Figura 30 y aumentando el tamaño de la antena.

5 Conclusiones

En este trabajo de fin de Grado se ha estudiado la tecnología llamada cosecha de energía, incluyendo las distintas fuentes de energía, los dispositivos para recolectar y utilizar esa energía disponible en el ambiente. De todo esto se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Existen en el ambiente numerosas fuentes potenciales de energía que pueden utilizarse para el diseño de sistemas de cosecha de energía.
- La cosecha de energía en sistemas electrónicos autónomos puede ser una solución al elevado uso que se hace de las baterías.
- El uso final de la energía que se genera con un sistema de cosecha de energía se utiliza para pequeñas aplicaciones que requieren potencias pequeñas.
- Los sistemas de cosecha de energía admiten innumerables diseños y actualmente se están desarrollando numerosos estudios que avalan un interés creciente.
- Las partes fundamentales en las que se divide un sistema de cosecha de energía son cuatro: sistema de captación de energía, acondicionamiento, almacenamiento y la aplicación.

A partir de este estudio se ha procedido a la implementación de dos sistemas para verificar experimentalmente su viabilidad en la recolección de energía: uno basado en la energía producida por movimiento y la vibración, y otro en la captación de ondas. La implementación de estos diseños ha proporcionado experiencia en el diseño y análisis de circuitos electrónicos y electromagnéticos. Así como el uso de microprocesadores, motores, sensores, y los instrumentos de medida (osciloscopios y multímetros). Además se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Una forma sencilla de controlar un motor de corriente continua es mediante la “modulación por ancho de pulso”.
- Cuanto más rápido es el ciclo de vibración, más energía se produce ya que el sistema de captura de energía es del tipo electromagnético y genera una mayor variación del flujo magnético en el tiempo.
- Los ciclos de vibración provocan picos de tensión, ya que el sistema de captura de energía no tiene un movimiento constante y puede estar en resonancia. Aspecto que habría que estudiar en profundidad.
- Los sistemas de cosecha de energía basados en la radiofrecuencia producen potencias muy pequeñas, y por lo tanto se necesita investigar más en este tipo de sistemas.
- Todos los resultados obtenidos con el sistema de cosecha de energía mediante vibraciones quedarían por analizarlos y probarlos en situaciones reales.

6 Bibliografía

- Beeby, Stephen; White, Neil. *Energy Harvesting for Autonomous Systems*. Norwood: Artech House, 2010. 292 p. ISBN-13: 978-1-59693-718-5.
- Spreeman, Dirk; Yianos, Manoli. *Electromagnetic Vibration Energy Harvesting Devices*. Londres: Springer, 2012. 196 p. ISBN 978-94-007-2944-5.
- Kazmierski, Thomas J., Beeby, Steve. *Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications*. London: Springer, 2011. 163 p. ISBN: 978-1-4419-7566-9.
- Farmer, Justin. *A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues*. M.S Thesis. Dept. Mech. Eng., Virginia Polytechnic Institute and State Univ. Blacksburg, VA; 2007.
- Brunelli, L. *Photovoltaics Scavenging Systems: Modeling and Optimization*, Microelectronics Journal, Vol. 40, 2009, pag. 1337-1344.
- Linden, H. D. *Handbook of Batteries*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2010.
- Duclot, M., J. Souquet. *Glassy Materials for Lithium Batteries: Electrochemical Properties and Devices Permannances*. Journal of Power Sources, Vol 97-98, Junio 2001, pag. 610-615.
- Starner, T., "Human-Powered Wearable Computing", IBM Systems Journal, Vol. 35, No. 3 & 4, 1996, pag.618-629.
- Fairbanks, J. *Thermoelectric Applications in Vehicle Status 2008*. Proc. of 6th European Conference of Thermoelectrics, Paris, Francia, Julio 2-4, 2008.
- Staner, T; J.A. Paradiso. *Human-Powered Wearable Computing*. IBM Systems Journal, Vol. 35, 1996, pag. 618-629.
- Harb, Adnan. *Energy harvesting: State of the art*. Science Direct 2011, pag. 2641-2654.
- Beeby S. P, Tudor M. J and White N. *Energy harvesting vibration sources for microsystems applications*. Measurement Science and Technology. Institute of Physics Publishing: 2006, pag.175-195.
- Murillo Rodriguez, Gonzalo. "Integration of Resonant N/MEMS for Energy Harvesting from Ambient Vibrations". Director: Grabiell Abadal Berini. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona. Departamento de Ingeniería de electrónica: 2011.

7 Apéndices

7.1 Metodología

7.1.1 Determinación del número de vueltas de la bobina empleada en el diseño

Para la determinación del número de vueltas de la bobina, hay que basarse en la siguiente igualdad:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

Donde:

N_1 =Número de vueltas de la primera bobina

N_2 =Número de vueltas de la segunda bobina

V_2 =Voltaje que circula por la segunda bobina

V_1 =Voltaje que circula por la primera bobina

Por lo tanto, resulta sencillo poder obtener el número de vueltas de la bobina. Para ello se debe utilizar una bobina con el número conocido de vueltas y la bobina de la cual se quiere obtener el número de vueltas.

Para ello, se deben unir ambas bobinas mediante el “hierro” por donde circulará una tensión conocida (producida mediante un generador de señales). A continuación se mide a ambos lados la tensión, cuya relación será muy importante para el cálculo del número de vueltas de la bobina empleada para el diseño.

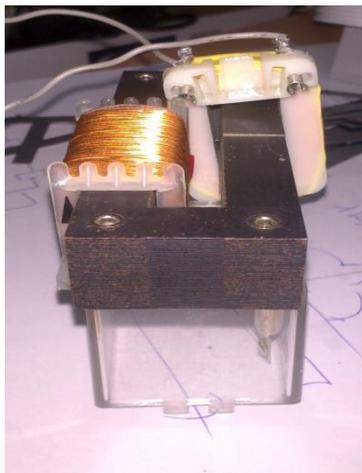


Imagen 12. Montaje para determinar el número de vueltas de la bobina empleada en el diseño

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los experimentos realizados para la obtención del número de vueltas de la bobina:

- En el primer experimento se utiliza una bobina de 400 vueltas. Se acopla a la bobina de vueltas desconocidas mediante el “hierro”, para que el campo magnético quede confinado.

Se introduce a continuación dos señales:

- a) 5 Voltios Pico – Pico con 50 Hz, 100Hz y 150Hz respectivamente:

Tabla 23. Datos obtenidos con una bobina de 400 vueltas y una señal de 5V pico-pico de 50, 100 y 150 Hz

Bobina		Freq(Hz)	5V PICO-PICO			Media (\bar{X})		
			50	100	150			
Secundario (400 vueltas)	V_2 (V)		0,38	0,33	0,38	6,81		
	$V_{2 \text{ pico-pico}}$ (V)		0,8	0,72	0,78			
Primario	V_1 (V)		2,51	2,51	2,51			
	$V_{1 \text{ pico-pico}}$ (V)		5,1	5,1	5,1			
		V_2/V_1	6,61	7,61	6,61			6,94
		$V_{2 \text{ pico-pico}}(V)/V_{1 \text{ pico-pico}}(V)$	6,38	7,08	6,54			6,67

Las relaciones entre ambos voltajes deberían de ser las mismas teóricamente, pero se producen variaciones del flujo de campo magnético y por eso no se obtienen los mismos resultados.

Por lo tanto la relación obtenida es:

$$\frac{V_2}{V_1} = 6,81 = \frac{N_1(C)}{N_2} = \frac{N_1(C)}{400 \text{ vueltas}} \rightarrow N_1(C) = 400 \times 6,81 = 2724 \text{ vueltas}$$

- b) 10 Voltios Pico – Pico con 100Hz y 150Hz respectivamente:

Tabla 24. Datos obtenidos con una bobina de 400 vueltas y una señal de 10V pico-pico de 50, 100 y 150 Hz

Bobina		Freq(Hz)	5V PICO-PICO		Media (\bar{X})		
			100	150			
Secundario (400 vueltas)	V_2 (V)		0,63	0,68	7,61		
	$V_{2 \text{ pico-pico}}$ (V)		1,38	1,4			
Primario	V_1 (V)		5,1	5,1			
	$V_{1 \text{ pico-pico}}$ (V)		10,3	10,3			
		V_2/V_1	8,09	7,5			7,79
		$V_{2 \text{ pico-pico}}(V)/V_{1 \text{ pico-pico}}(V)$	7,46	7,36			7,41

De igual manera, se obtienen diferentes medidas debido a la variación del flujo magnético. De esta manera se obtiene:

$$\frac{V_2}{V_1} = 7,61 = \frac{N_1(B)}{N_2} = \frac{N_1(B)}{400 \text{ vueltas}} \rightarrow N_1(B) = 400 \times 7,61 = 3044 \text{ vueltas}$$

- Se lleva a cabo un segundo experimento para que los resultados se acerquen lo más posible a la realidad. En este caso, se utiliza una bobina de 1600 vueltas igual que antes se acopla a la bobina de vueltas desconocidas mediante el “hierro”.

a) 5 Voltios Pico – Pico con 50 Hz, 100Hz y 150Hz respectivamente:

Tabla 25. Datos obtenidos con una bobina de 1600 vueltas y una señal de 5V pico-pico de 50, 100 y 150 Hz

		5V PICO-PICO				
Bobina	Freq(Hz)	50	100	150		
Secundario (1600 vueltas)	V ₂ (V)	1,25	1,25	1,25		
	V ₂ pico-pico (V)	2,57	2,57	2,57		
Primario	V ₁ (V)	2,51	2,51	2,51		
	V ₁ pico-pico (V)	5,1	5,1	5,1	Media (\bar{X})	
V ₂ /V ₁		2,01	2,01	2,01	2,01	1,99
V ₂ pico-pico (V)/V ₁ pico-pico (V)		1,98	1,98	1,98	1,98	

En este caso al tener la bobina un mayor número de vueltas, genera mayor voltaje. Y como se puede apreciar la relación de voltaje entre el secundario y el primario es prácticamente el doble, y lógicamente, la bobina del primario debe de tener el doble de vueltas que el secundario:

$$\frac{V_2}{V_1} = 1,99 = \frac{N_1(C)}{N_2} = \frac{N_1(C)}{1600 \text{ vueltas}} \rightarrow N_1(C) = 1600 \times 1,99 = 3184 \text{ vueltas}$$

Las medidas obtenidas en los tres experimentos anteriores se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 26. Resumen del número de vueltas obtenido

N ₁ (A)	N ₁ (B)	N ₁ (C)	N _T
2724	3044	3184	2984

Por lo tanto el número total de vueltas de la bobina es de 2984 vueltas. Debido a esto, el modelo de bobina es adecuado para el diseño de cosecha de energía, debido a que es bastante compacta y de tamaño reducido.

7.1.2 Configuración del sistema de acondicionamiento y almacenamiento.

El sistema CBC -EVAL -09 admite la entrada de energía de diferentes tipos de cosecha de energía como lo son la solar, la electromagnética, radiofrecuencia, la térmica y la vibración. Dependiendo del origen de la energía hay que configurar el sistema CBC-EVAL-09 de diferente manera. Por ello es conveniente conocer su funcionamiento:

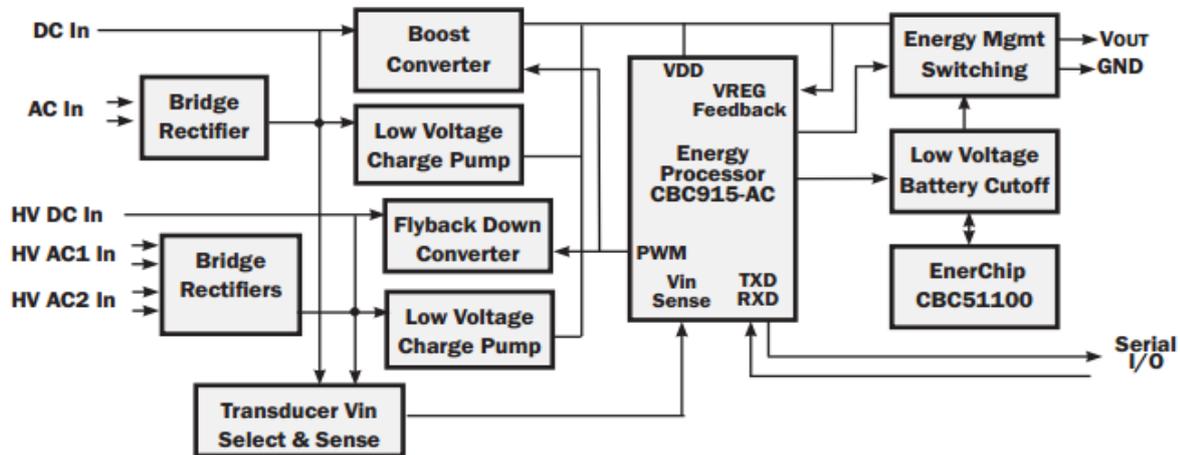


Figura 31. Esquema general del sistema de acondicionamiento y almacenamiento

La conexión del sistema de cosecha de energía mediante vibración debe ser conectado a la entrada "AC in" del CBC-EVAL-09, ya que la corriente que se genera con este tipo de cosecha de energía es corriente alterna. Aún siendo una cosecha de energía basada en los movimientos de vibración, no deja de ser principalmente un sistema electromagnético que genera un caudal de energía. Por lo tanto, teniendo en cuenta los requisitos del sistema de acondicionamiento, la energía producida debería ser inferior a 4,06 V de corriente alterna.

Para este caso se tiene, un puente rectificador encargado de pasar de corriente alterna a corriente continua. A continuación se tiene un cargador de pequeño voltaje que se encarga de alimentar al procesador CBC 915. Este procesador se encarga de encontrar el pico máximo de potencia de la señal de entrada. Además el EnerCip CBC 51100 se encarga de alimentar al procesador cuando el sistema de cosecha de energía está desconectado, y cuando el voltaje cae por debajo de 3 V DC existe un circuito que desconecta las baterías para que no se descarguen más.

Por último, el "serial I/O" conecta este sistema de procesamiento de energía con otro microcontrolador y poder emplear esa energía para una aplicación determinada.

Además el sistema de acondicionamiento y almacenamiento (CB-EVAL-09), contiene una serie de interruptores manipulables (SW1, SW2 y SW3) y que deben de ser manipulados para los diferentes modos de cosecha de energía:

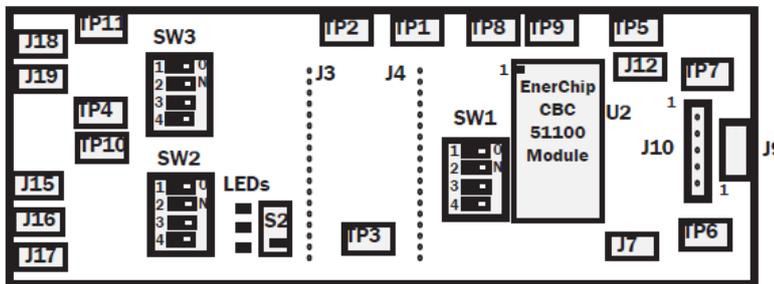


Figura 32. Interruptores del sistema de acondicionamiento y almacenamiento (CB-EVAL-09)

En el caso de la cosecha de energía mediante vibración, el sistema debe conectarse a la entrada J19, y los botones SW1, SW2 y SW3 deben de estar de la siguiente manera:

Tabla 28. Características de la entrada

J19 Low Voltage AC Input	
Pin Number(s)	Designation
1	AC input
2	AC input
Connector Type: 2 pin 100mil	

Tabla 27. Configuración de los interruptores de la entrada J19

Electromagnetic/RF Generator Transducer Input Selection on J19

SW3			SW2			SW1		
Slide #	OFF	ON	Slide #	OFF	ON	Slide #	OFF	ON
1		X	1	X		1		EC CHGD
2		X	2	X		2	Not Used	Not Used
3		X	3	X		3		X
4		X	4	X		4		X

En el caso de “SW1”, está configurado para que el sistema CBC-EVAL-09 esté cargado antes de conectarle la aplicación (“EC CHGD”)

7.2 Anexos