



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FINAL DE GRADO

DISEÑO DE UN SENSOR AUTOALIMENTADO POR LA ENERGÍA DE LAS VIBRACIONES

Autor: Alfonso Vijande Fernández

Director: Alberto Carnicero

Madrid, España

2019

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. **Alfonso Vijande Fernández** DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: DISEÑO DE UN SENSOR AUTOALIMENTADO POR LA ENERGÍA DE LAS VIBRACIONES, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3º. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún

- derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
 - c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.
 - d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

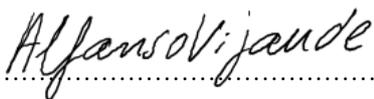
6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 30 de AGOSTO de 2019.

ACEPTA

Fdo. 

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Diseño de un sensor autoalimentado por la energía de las vibraciones
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2018-2019 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni
parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: ALFONSO VIJANDE FERNÁNDEZ

Fecha: 30/ 08/2019

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Firmado digitalmente por
carnicero@comillas.edu
Nombre de reconocimiento
(DN):
cn=carnicero@comillas.edu
Fecha: 2019.09.02 08:51:41
+02'00'

Fdo.: ALBERTO CARNICERO

Fecha: 30/08/2019

DISEÑO DE UN SENSOR AUTOALIMENTADO POR LA ENERGÍA DE LAS VIBRACIONES

Autor: Alfonso Vijande Fernández.

Director: Alberto Carnicero.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

Resumen

El objetivo de este trabajo es la investigación y el diseño de un sensor de medición autónomo que se alimente de las vibraciones de las máquinas en la industria, para proporcionar datos durante su funcionamiento.

A lo largo de este estudio se desarrolla el plan teórico y las instrucciones para la construcción de un prototipo funcional que consiga transformar las vibraciones en electricidad y, por consiguiente, alimentar este sensor.

La finalidad que se busca dar es crear un sensor de temperatura, y otras magnitudes, para máquinas industriales, las cuales produzcan vibraciones cuando estén en ejecución. El sensor se alimenta, por tanto, de la energía de las vibraciones, es decir, es autoalimentado por la propia máquina, y no necesita una fuente de energía exterior, eliminando así la necesidad de cables externos. Por último, el sensor comunicará sus mediciones a través de una antena bluetooth, también alimentada por la energía que se obtenga de estas vibraciones.

En resumen, se trata de modelizar un dispositivo que cumpla los siguientes requisitos:

1. Transforme las vibraciones en energía eléctrica.
2. Adapte la electricidad para la alimentación de un sensor y una antena bluetooth.
3. Sea capaz de enviar las mediciones del sensor a un ordenador central.

Si se es capaz de realizar todas las tareas, el dispositivo podría ser realmente útil en la industria, pues se tendría conocimiento en todo momento de cómo funciona la maquinaria, en este caso de su temperatura, sin necesidad de que un operario las controle una por una, y sin consumir energía convencional en el proceso. Además, al utilizar la tecnología Bluetooth, se suprimiría la necesidad de conectar la máquina mediante un cable a un ordenador receptor, facilitando así la comodidad de los operarios de la industria.

En cada uno de los capítulos de este trabajo se desarrollan los elementos indispensables que este dispositivo ha de incorporar para su funcionamiento; en concreto:

1. Una estructura que amplifique las vibraciones de la máquina.
2. Un transductor electromecánico que transforme las vibraciones en ondas eléctricas.
3. Una serie de transformadores que adapten la onda de salida del transductor.
4. Un sensor y una antena bluetooth para tomar y enviar las mediciones de la máquina.

Antecedentes

Uno de los grandes problemas a los que se enfrenta el mundo actual es el constante aumento del calentamiento global. Dado que el progreso de nuestra industria ha sido el detonante de este problema, es nuestro deber encontrar y desarrollar soluciones para asegurar el planeta para las próximas generaciones.

Como sabemos, el calentamiento global ocurre como resultado de la contaminación del aire por gases de efecto invernadero. Es el uso de combustibles fósiles, utilizados desde la revolución industrial de mediados del siglo XVIII, el causante de este tipo de gas. Por eso todos los políticos están promoviendo, a través de subvenciones y desgravaciones fiscales, proyectos en los que se invierta en el uso de nuevas fuentes de energía alternativas a combustibles como el carbón o la gasolina, y que utilicen energías como la eólica, fotovoltaica y la hidráulica.

Mientras esto sucede, los gobernantes también se dedican a firmar pactos para reducir el nivel de contaminación que producen los países y, por ejemplo, se están aplicando leyes para disuadir a las empresas de seguir produciendo productos contaminantes. El ejemplo perfecto son las grandes ciudades como Madrid o París que han prohibido los coches diésel en un futuro muy próximo, y algunos días, dependiendo del nivel de contaminación atmosférica, cierran la entrada a la ciudad a la mitad de los coches.

Por estas razones, creo que la comunidad científica y la industria deberían centrar sus esfuerzos en desarrollar la tecnología necesaria para reutilizar toda la energía que no utilizamos y sacarle el máximo rendimiento con el menor impacto medioambiental. Y en este principio se fundamenta el desarrollo del sensor autoalimentado.

La idea para este trabajo titulado DISEÑO DE UN SENSOR AUTOALIMENTADO POR LA ENERGIA DE LAS VIBRACIONES está inspirada por la tecnología KERS desarrollada por Isaac Prada para los coches de Fórmula 1, que absorbe la energía cinética en el

frenado y la almacena para ser utilizada como complemento a la combustión del motor para conseguir más potencia y velocidad.

Como hemos apuntado, el objetivo de este proyecto es hacer un sistema respetuoso con el medio ambiente y, además, en el que pudiéramos utilizar la energía que no está en uso actualmente. Los medios de comunicación se han hecho eco del constantemente aumento del uso de baterías para los artículos portátiles (teléfonos, juguetes, ordenadores, cámaras de vídeo) que, en su fabricación consumen una gran energía y que son una amenaza para el medio ambiente.

"La creciente demanda mundial de baterías se debe en gran medida al rápido aumento de productos portátiles que consumen energía, como teléfonos móviles y cámaras de vídeo, juguetes y ordenadores portátiles. Cada año, los consumidores se deshacen de miles de millones de pilas, todas ellas con materiales tóxicos o corrosivos" [1].

Además de la idea de proteger el medio ambiente, este estudio se preocupa por la cantidad de energía que no usamos como el ruido. Con frecuencia oímos hablar de la contaminación acústica pero no se suele oír en las noticias que sea una energía que podríamos transformar en electricidad para proporcionarla a una máquina y cargarla con ella.

Otros de los usos del sensor autoalimentado es el de reducir el número de cables y la necesidad de enchufar todos los elementos antes de su uso.

El propósito de este proyecto final es aplicar los conocimientos de ingeniería para concebir un sistema que pueda ser útil para el mundo industrial y aplicar los principios detallados anteriormente. Por ello, el prototipo debe ser capaz de obtener la electricidad para autoabastecerse sin necesidad de una fuente de alimentación externa y, al mismo tiempo, ser capaz de obtener y proporcionar los datos que sean requeridos por el ingeniero, como por ejemplo temperatura, humedad y otros.

Aplicaciones industriales del prototipo

El sistema concebido es una pequeña superficie que cubre una parte de una máquina industrial que produce vibraciones permanentes y puede medir una propiedad y enviarla a un receptor sin necesidad de cable, es decir, con la ayuda de una antena Bluetooth.

Es primordial la simplicidad de la aplicación. El objetivo es colocar este sistema en un laboratorio, en una máquina, y sin ninguna fuente de alimentación de batería externa, adquiere datos de esa máquina y los envía a una computadora donde un técnico puede interpretar esos datos.

Por ejemplo, si se elige como sensor uno de temperatura, el uso sería el siguiente:

Se coloca el prototipo en una máquina, que produce una energía que normalmente se desperdicia, como las vibraciones. Lo que se intenta aprovechar es utilizar ese desperdicio de energía para encender el sistema, medir la temperatura de la máquina y enviar esos datos, vía Bluetooth, a una computadora para que puedan ser controlados y supervisados por un trabajador cualificado desde su mesa de trabajo.

Para cumplir el objetivo de este proyecto, como es obvio, los sensores y la parte de recogida y transferencia de datos deben consumir la misma o incluso menos energía de la que el proyecto puede producir.

DESIGN OF A SELF-SUPPLIED SENSOR FOR A VIBRATING MACHINE

Author: Alfonso Vijande Fernández.

Director: Alberto Carnicero.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

Abstract

The objective of this work is the research and design of an autonomous measurement sensor powered from the vibrations of machines in the industry, to provide data during its operation.

Throughout this study, the theoretical plan and instructions for the construction of a functional prototype are developed to transform vibrations into electricity and, consequently, feed this sensor.

The aim is to create a temperature sensor, and other magnitudes, for industrial machines, which produce vibrations when they are in execution. The sensor is therefore powered by the energy of the vibrations, i.e. it is self-powered by the machine itself, and does not need an external energy source, thus eliminating the need for external cables. Finally, the sensor will communicate its measurements through a Bluetooth antenna, also powered by the energy obtained from these vibrations.

In short, it is a question of modelling a device that fulfils the following requirements:

1. Transform vibrations into electrical energy.
2. Adapt the electricity to power a sensor and a Bluetooth antenna.
3. Be able to send sensor measurements to a central computer.

If we are able to perform all the tasks, the device could be really useful in the industry, because we would have knowledge at all times of how the machinery works, in this case its temperature, without the need for an operator to control them one by one, and without consuming conventional energy in the process. In addition, by using Bluetooth technology, the need to connect the machine through a cable to a computer receiver would be eliminated, thus facilitating the comfort of operators in the industry.

In each of the chapters of this work are developed the essential elements that this device must incorporate for its operation, specifically:

1. A structure that amplifies the vibrations of the machine.
2. An electromechanical transducer that transforms vibrations into electrical waves.
3. A series of transformers that adapt the output wave of the transducer.
4. A sensor and a bluetooth antenna to take and send the machine's measurements.

Backgrounds of the project

One of the major problems facing the world today is the constant increase in global warming. Since the progress of our industry has been the trigger of this problem, it is our duty to find and develop solutions to secure the planet for future generations.

As we know, global warming occurs as a result of air pollution by greenhouse gases. It is the use of fossil fuels, used since the industrial revolution of the mid-eighteenth century, the cause of this type of gas. That is why all politicians are promoting, through subsidies and tax breaks, projects that invest in the use of new energy sources alternative to fuels such as coal or gasoline, and that use energy such as wind, photovoltaic and hydropower.

While this is happening, governments are also signing pacts to reduce the level of pollution produced by countries and, for example, laws are being applied to dissuade companies from continuing to produce polluting products. The perfect example is big cities like Madrid or Paris that have banned diesel cars in the very near future, and some days, depending on the level of air pollution, close the entrance to the city to half of the cars.

For these reasons, I believe that the scientific community and industry should focus their efforts on developing the technology needed to reuse all the energy we do not use and get the most out of it with the least environmental impact. And it is on this principle that the development of the self-powered sensor is based.

The idea for this work entitled DESIGN OF A SELF-SUPPLIED SENSOR is inspired by the KERS technology developed by Isaac Prada for Formula 1 cars, which absorbs the kinetic energy in braking and stores it to be used as a complement to the combustion of the engine to achieve more power and speed.

As we have pointed out, the aim of this project is to make a system that respects the environment and, moreover, in which we could use the energy that is not currently in use. The media have reported a constant increase in the use of batteries for

portable items (telephones, toys, computers, video cameras) that, in their manufacture consume a great deal of energy and are a threat to the environment.

"The growing global demand for batteries is largely due to the rapid increase in portable energy-consuming products such as mobile phones and video cameras, toys and laptops. Every year, consumers dispose of billions of batteries, all with toxic or corrosive materials" [1].

In addition to the idea of protecting the environment, this study is concerned about the amount of energy we don't use as noise. We often hear about noise pollution, but you don't often hear in the news that it's an energy we could transform into electricity to supply and charge to a machine.

Another of the uses of the self-powered sensor is to reduce the number of wires and the need to plug all the elements before use.

The purpose of this final project is to apply engineering knowledge to devise a system that can be useful to the industrial world and to apply the principles detailed above. Therefore, the prototype must be able to obtain the electricity to supply itself without the need for an external power supply and, at the same time, be able to obtain and provide the data required by the engineer, such as temperature, humidity and others.

Industrial applications of the prototype

The system conceived is a small area that covers a part of an industrial machine that produces permanent vibrations and can measure a property of that machine and send it to a receiver without the need for cable, ie with the help of a Bluetooth antenna.

The simplicity of the application is paramount. The objective is to place this system in a laboratory, in a machine, and without any external battery power supply, it acquires data from that machine and sends it to a computer where a technician can interpret that data.

For example, if a temperature sensor is chosen, the use would be as follows:

The prototype is placed in a machine, which produces energy that is normally wasted, such as vibrations. The idea is to use this waste of energy to turn on the system, measure the temperature of the machine and send this data via Bluetooth to a computer so that it can be controlled and supervised by a qualified worker from his desk.

To meet the objective of this project, obviously, the sensors and the data collection and transfer part must consume the same or even less energy than the project can produce.



Contenido

Resumen	7
Antecedentes.....	8
Aplicaciones industriales del prototipo.....	9
Abstract.....	11
Backgrounds of the project	12
Industrial applications of the prototype	13
Tabla de ilustraciones.....	17
Índice de tablas.....	18
Capítulo 0: Objetivos del proyecto	19
Capítulo 1: Las vibraciones	21
Introducción.....	21
Importancia del Estudio de la Vibración.....	21
Conceptos Básicos de Vibración	22
¿Qué es una vibración?	22
Partes Elementales de los Sistemas Vibratorios.....	22
Clasificación	22
Vibraciones libres y forzadas	22
Vibraciones no amortiguadas y amortiguadas	23
Elementos de amortiguamiento.....	23
Estudio de las vibraciones	24
Hipótesis:.....	24
Clasificación de las vibraciones:.....	25
Capítulo 2: Elementos de carga.	31
Sensor.....	31
Antena bluetooth	32
Dispositivos elegidos.....	35
Capítulo 3: Estructura mecánica.	39
Pie de la estructura.....	40
Lámina vibrante	41

Capítulo 4: Transformación de vibraciones en electricidad.....	45
Recuperación de energía a partir de las vibraciones.....	45
Introducción.....	45
Estudio de los diferentes tipos de transductores.....	46
Transductor electromagnético.....	46
Transductor electrostático.....	47
Transductor piezoeléctrico.....	47
En resumen:.....	48
Elección del transductor piezoeléctrico.....	50
Como colocar el transductor sobre la lámina.....	51
Capítulo 5: Adaptación de la señal.....	52
Introducción.....	52
De corriente alterna a corriente continua.....	53
Adaptación de la señal rectificada.....	56
Conclusión.....	56
Conclusiones del proyecto.....	57
Posibles mejoras del proyecto.....	59
Bibliografía.....	63
ANEXOS.....	65
Balance económico.....	67
Planos.....	69
Índice.....	69
Datasheets de los dispositivos.....	75
Índice.....	75
Código Arduino.....	81



Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 - Sistema masa-resorte y amortiguador	24
Ilustración 2 - Diferencias entre vibraciones amortiguadas	28
Ilustración 3 - Estructura modelizada en Onshape	40
Ilustración 4 - Simulación de la deformación en la estructura modelizada.....	41
Ilustración 5 - Espectros de vibración de una máquina	42
Ilustración 6 - Transductor electromagnético	46
Ilustración 7 - Transductor electrostático	47
Ilustración 8 - Transductor piezoeléctrico	47
Ilustración 9 – Onda de corriente alterna y onda rectificada.....	52
Ilustración 10 - Diagrama de un circuito con un solo diodo. 11 - Representación gráfica de un rectificado de media onda	53
Ilustración 12 - Diagrama de un circuito rectificador de onda completa.	54
Ilustración 13 - Representación gráfica de una rectificación completa de onda.	54



Índice de tablas

Tabla 1 - Diferentes modelos de sensores	32
Tabla 2 - Clasificación de las diferentes clases de dispositivos Bluetooth.....	33
Tabla 3 - Características del sensor elegido	36
Tabla 4 - Características de la antena Bluetooth y tarjeta Arduino	36
Tabla 5 - Posibles configuraciones de la estructura.....	43
Tabla 6 - Densidad de potencia de diferentes tecnologías para la recuperación de energía	45
Tabla 7 - Diferencias entre los diferentes transductores electromecánicos.....	49
Tabla 8 - Modelo de transductor piezoeléctrico elegido	51
Tabla 9 - Diferencias entre una batería y un condensador.....	60
Tabla 10 - Presupuesto del prototipo	67



Capítulo 0: Objetivos del proyecto

Con la redacción de este proyecto se pretende dirigir al lector en la construcción de un prototipo funcional para la toma de mediciones de una máquina mediante un sensor alimentado de las vibraciones de la propia máquina.

Para ello, los pasos a seguir y los objetivos a los que se busca llegar son los siguientes:

1. Diseño de una estructura metálica que sea capaz de amplificar las vibraciones de la máquina. Esta estructura va a ser modelizada para que sea adaptable a diferentes máquinas, es decir, que pueda llegar a diferentes frecuencias de resonancia ajustando una masa que se colocará en el extremo.
2. Elección de un transductor que transforme las vibraciones amplificadas por la estructura metálica en una onda eléctrica.
3. Elección de una serie de transformadores para adaptar esa señal de salida del transductor en una onda apta para alimentar los elementos de carga.
4. Elección de un sensor y una antena bluetooth para el envío de las mediciones.
5. Creación de un código Arduino que almacene las mediciones de la máquina y envíe dichos datos mediante la antena Bluetooth a un receptor central.
6. Por último, se darán pistas de mejora para el futuro de este proyecto.



Capítulo 1: Las vibraciones

En este capítulo se presentan las bases teóricas necesarias para el estudio de las vibraciones en sistemas mecánicos. Para redactarlo, se han utilizado como fuentes de información, el libro “Mechanical Vibrations” [2], utilizado en el cuarto curso del grado en Tecnologías Industriales en ICAI, y el trabajo de MV Carbonell [3].

Introducción

Importancia del Estudio de la Vibración

El estudio de las vibraciones es fundamental en la vida ya que la mayoría de las actividades humanas implican vibración de una forma u otra. Por ejemplo, el ser humano escucha porque el tímpano vibra y ve porque las ondas de luz sufren vibraciones. La respiración está asociada con la vibración de los pulmones y caminar implica movimientos oscilatorios (periódicos) de las piernas y las manos. También, el habla humana requiere el movimiento oscilatorio de la laringe (y lengua). Pero en este proyecto en concreto, las vibraciones toman incluso más importancia pues son las encargadas de suministrar energía a todo el sistema.

Cierto es que las vibraciones acortan la vida útil de los mecanismos ya que por ellas están sometidos a fuerzas variables con el tiempo, que pueden llegar a ser movimientos periódicos; además de generar molestias para el personal debido al ruido o a la posible falta de precisión para ejecutar movimientos precisos.

En los últimos tiempos, muchas investigaciones han sido motivadas por las aplicaciones de ingeniería de la vibración, tales como el diseño de máquinas, cimientos, estructuras, motores, turbinas y sistemas de control.

La estructura o el componente de la máquina sometido a vibración puede fallar debido a la fatiga del material resultante de la variación cíclica de la tensión inducida. Además, la vibración provoca un desgaste más rápido de las piezas de la máquina, como rodamientos y engranajes, y también genera un ruido excesivo. En las máquinas, la vibración puede aflojar los sujetadores como las tuercas. En los procesos de corte de metal, la vibración puede causar vibración también de la pieza metálica a tratar, lo que conduce a un acabado superficial deficiente.

Además, siempre que la frecuencia natural de vibración de una máquina o estructura coincide con la frecuencia de la excitación externa, se produce un fenómeno conocido como **resonancia**, que conduce a fallos. La literatura está llena de relatos de fallos del sistema provocados por la resonancia y la vibración excesiva de los componentes y sistemas.



Por lo tanto, uno de los propósitos importantes del estudio de la vibración normalmente es reducir la vibración a través del diseño adecuado de las máquinas y sus montajes, salvo en casos puntuales como el diseño de sónares o tamicés. En este proyecto en cambio no se tratará de minimizar las vibraciones sino de utilizar estas vibraciones de la máquina asociada para hacer vibrar la estructura que se va a concebir.

Conceptos Básicos de Vibración

¿Qué es una vibración?

Cualquier movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo se llama vibración u oscilación. El balanceo de un péndulo y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos típicos de vibración. La teoría de la vibración se ocupa del estudio de los movimientos oscilatorios de los cuerpos y de las fuerzas asociadas a ellos.

Partes Elementales de los Sistemas Vibratorios

Un sistema vibratorio, en general, incluye un medio para almacenar energía potencial (resorte o elasticidad), un medio para almacenar energía cinética (masa o inercia), y un medio por el cual la energía se pierde gradualmente (amortiguador).

La vibración de un sistema implica la transferencia de su energía potencial a energía cinética y de energía cinética a energía potencial, alternativamente. Si el sistema está amortiguado, una parte de la energía se disipa en cada ciclo de vibración y debe ser reemplazada por una fuente externa si se desea mantener un estado de vibración constante.

Clasificación

Vibraciones libres y forzadas

Vibración libre. Si un sistema, después de una perturbación inicial, se deja que vibre por sí solo, la vibración resultante se conoce como vibración libre. Ninguna fuerza externa actúa sobre el sistema. La oscilación de un péndulo simple es un ejemplo de vibración libre.

Vibración forzada. Si un sistema está sujeto a una fuerza externa (a menudo, un tipo de fuerza que se repite), la vibración resultante se conoce como vibración forzada. La oscilación que se produce en máquinas como los motores diésel es un ejemplo de vibración forzada.



Vibraciones no amortiguadas y amortiguadas

Si no se pierde o disipa energía en la fricción u otra resistencia durante la oscilación, la vibración se conoce como vibración no amortiguada. Sin embargo, si se pierde energía de esta manera, se denomina vibración amortiguada. En muchos sistemas físicos, la cantidad de amortiguamiento es tan pequeña que puede ser ignorada para la mayoría de los propósitos de ingeniería. Sin embargo, la consideración del amortiguamiento se vuelve extremadamente importante en el análisis de sistemas vibratorios cercanos a la resonancia.

Elementos de amortiguamiento

En muchos sistemas prácticos, la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido.

Debido a la reducción de la energía, la respuesta, como el desplazamiento del sistema, disminuye gradualmente. El mecanismo por el cual la energía vibratoria se convierte gradualmente en calor o sonido se conoce como amortiguamiento. Aunque la cantidad de energía convertida en calor o sonido es relativamente pequeña, la consideración del amortiguamiento es importante para una predicción precisa de la respuesta de vibración de un sistema. Se supone que un amortiguador no tiene masa ni elasticidad, y la fuerza de amortiguamiento sólo existe si hay velocidad relativa entre los dos extremos del amortiguador. Es difícil determinar las causas del amortiguamiento en sistemas prácticos. Por lo tanto, el amortiguamiento se modela como uno o más de los siguientes tipos.

1. Amortiguamiento viscoso. El amortiguamiento viscoso es el mecanismo de amortiguamiento más utilizado en el análisis de vibraciones. Cuando los sistemas mecánicos vibran en un medio fluido como el aire, el gas, el agua o el aceite, la resistencia que ofrece el fluido al cuerpo en movimiento hace que la energía se disipe. En este caso, la cantidad de energía disipada depende de muchos factores, como el tamaño y la forma del cuerpo vibrante, la viscosidad del fluido, la frecuencia de la vibración y la velocidad del cuerpo vibrante. En el amortiguamiento viscoso, la fuerza de amortiguamiento es proporcional a la velocidad del cuerpo vibrante. Ejemplos típicos de amortiguamiento viscoso incluyen:
 - a. película fluida entre superficies deslizantes
 - b. flujo de fluido alrededor de un pistón en un cilindro
 - c. flujo de fluido a través de un orificio
 - d. película de fluido alrededor de un gorrón en un cojinete.
2. Amortiguamiento de Coulomb o Fricción Seca. Aquí la fuerza de amortiguamiento es constante en magnitud, pero en dirección opuesta a la del movimiento del cuerpo vibrante. Es causada por la fricción entre las superficies de fricción que están secas o que no tienen suficiente lubricación.

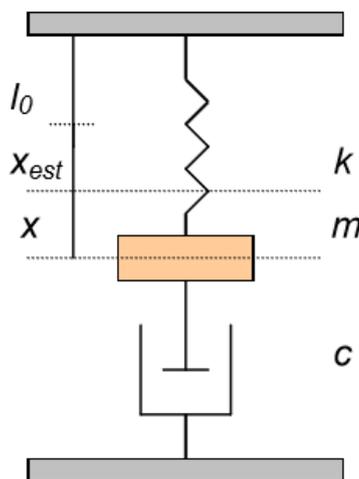


3. Amortiguamiento Sólido o Material o Histerético. Cuando un material se deforma, la energía es absorbida y disipada por el material. El efecto es debido a la fricción entre los planos internos, que se deslizan o se deslizan a medida que se producen las deformaciones.

Estudio de las vibraciones

La definición de la Real Academia Española para vibrar es “oscilar alternativamente en torno a su posición de equilibrio”. Este fenómeno, que normalmente tratamos de disipar o amortiguar para que no interfiera en nuestros proyectos y maquinaria, va a servir para alimentar el sistema modelizado en este proyecto.

Para comenzar el proyecto será importante entender cómo funcionan este fenómeno vibratorio. En este estudio vamos a tener en cuenta las vibraciones de pequeña amplitud. Para ello hemos modelizado el siguiente sistema de la figura que consiste en una masa, un muelle con constante elástica k y un dispositivo de constante amortiguadora c .



Notación:

K : constante de rigidez elástica

m : masa principal

c : coeficiente de amortiguamiento

F : resultante de las fuerzas exteriores

l_0 : longitud inicial del muelle

x_{est} : deformación en equilibrio estático

x : desplazamiento

Ilustración 1 - Sistema masa-resorte y amortiguador

Hipótesis:

Consideraremos para la realización de este estudio las siguientes características del sistema:

1. No se tiene en cuenta el efecto de la gravedad.
2. La masa del muelle es despreciable frente a la masa m del sistema.



3. No existe rozamiento
4. La masa solo se desplaza verticalmente.
5. El amortiguador ejerce una fuerza de rozamiento en sentido contrario y proporcional a la velocidad de la masa. La masa de este sistema amortiguador también es despreciable frente a la masa del sistema.

Por tanto, con estas hipótesis podemos concluir que la ecuación del movimiento es:

$$F = m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x \quad (1)$$

F es la fuerza que se aplica al sistema, $(-m \cdot \ddot{x})$ es la fuerza de inercia, $(-c \cdot \dot{x})$ es la fuerza de amortiguamiento que como hemos indicado previamente era proporcional a la velocidad de la masa y finalmente $(-k \cdot x)$ es la fuerza recuperadora del muelle que viene descrita por la Ley de Hooke. Los tres parámetros constantes (m, k, c) son mayores que cero.

Clasificación de las vibraciones:

Como ya se ha explicado anteriormente en los conceptos básicos de las vibraciones, las vibraciones pueden ser libres o forzadas.

Todas las vibraciones se pueden dividir, dependiendo de si existen elementos de amortiguamiento en el sistema o no, en dos tipos de vibraciones:

- a. Sin amortiguamiento
- b. Con amortiguamiento

A continuación, se va a describir por separado cada tipo de vibración.

1. **VIBRACIONES LIBRES SIN AMORTIGUAMIENTO**

Son aquellas vibraciones que no son causadas por fuerzas exteriores que se aplican al sistema y no contienen un elemento de amortiguamiento en el sistema. Por tanto, su ecuación del movimiento, podemos deducirla de la fórmula que hemos escrito anteriormente. Como hemos dicho, si no hay fuerzas exteriores F será igual a cero, e igualmente pasará con el término donde c es un multiplicando; ya que, al no haber sistema amortiguador, c será también 0.

$$0 = m \cdot \ddot{x} + k \cdot x \quad (2)$$

Para solucionar la siguiente ecuación diferencial, obtenemos su ecuación característica:



$$m \cdot \lambda^2 + k = 0 \quad (3)$$

Las soluciones a la ecuación característica son las raíces conjugadas $\lambda = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} i$ y, por tanto, la solución general de la EDO es de la siguiente forma:

$$x = A \cdot \text{sen}(w \cdot t + \varphi) \quad (4)$$

donde A es la amplitud y φ la fase inicial y son constantes que se determinan en cada situación a partir de las condiciones iniciales del sistema. La pulsación o frecuencia del sistema es $w = \sqrt{\frac{k}{m}}$, y el periodo de la vibración es igual a $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$.

En este tipo de vibraciones, en las que no existe una fuerza exterior al sistema ni una fuerza disipatoria (amortiguamiento) existe la conservación de la energía mecánica; es decir, la suma de la energía cinética del sistema y la energía potencial del mismo es constante. Por tanto, se verifica la siguiente ecuación:

$$\frac{m}{2} \dot{x}^2 + \frac{k}{2} x^2 = A^2 \quad (5)$$

2. VIBRACIONES LIBRES CON AMORTIGUAMIENTO

Son todas las vibraciones donde existe algún método por el cual la amplitud del movimiento decrece con el tiempo hasta dejar de oscilar. Esto ocurre en todos los movimientos reales ya que siempre existe alguna fuerza de rozamiento que disipa parte de la energía mecánica del sistema.

Al ser un movimiento libre, la fuerza exterior sigue siendo cero, pero en este caso sí que existe contante de amortiguamiento; por tanto, la fórmula de este tipo de movimiento es:

$$0 = m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x \quad (6)$$

La ecuación característica es:

$$m \cdot \lambda^2 + c \cdot \lambda + k = 0 \quad (7)$$

Y sus soluciones serán:



$$\lambda = -\frac{\lambda}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (8)$$

En el interior de la raíz se encuentra, desarrollando el cuadrado, $\frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m}$. Existirán, dependiendo de los parámetros, raíces positivas o raíces complejas conjugadas.

Debemos analizar tres posibles casos en función de los parámetros

I. $c > 2\sqrt{k \cdot m}$

Este caso se denomina amortiguamiento supercrítico. Las raíces de la ecuación característica son reales y distintas por tanto la solución del sistema es de la forma:

$$x = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} \quad (9)$$

El sistema descrito por la ecuación no oscila, sino que volverá simplemente a la posición de equilibrio. En función del amortiguamiento tardará más tiempo en ejecutar el movimiento. Cuanto mayor sea este amortiguamiento más tiempo se demorará en volver a la posición de reposo.

II. $c = 2\sqrt{k \cdot m} \rightarrow c=c_r$

Este caso se denomina amortiguamiento crítico. Las raíces de la ecuación característica son la misma:

$$\lambda = -\frac{c}{2m} \quad (10)$$

La solución del sistema es por tanto de la forma

$$x = e^{-\frac{c}{2m}t} (c_1 + c_2 t) \quad (11)$$

Esta ecuación describe el movimiento que efectúa el sistema. La masa vuelve a la posición de equilibrio en la mayor brevedad posible sin oscilar. El amortiguamiento crítico tiene una especial importancia, el valor crítico es la menor cantidad de amortiguamiento para que el sistema no oscile. Es decir, se puede utilizar este valor a propósito para conseguir que el sistema no vibre y que vuelva al equilibrio lo más rápidamente posible.

III. $c < 2\sqrt{k \cdot m}$

En este caso, el amortiguamiento subcrítico, es decir, inferior a los demás, el sistema ya vibra. Las soluciones de la ecuación característica son raíces imaginarias conjugadas

$$\lambda = -\frac{c}{2m} \pm w_n i \quad (12)$$

donde w_n es la frecuencia de la vibración amortiguada

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad (13)$$

La solución del sistema será de la forma

$$x = a e^{-\frac{c}{2m}t} \text{sen}(w_n t + \varphi) \quad (14)$$

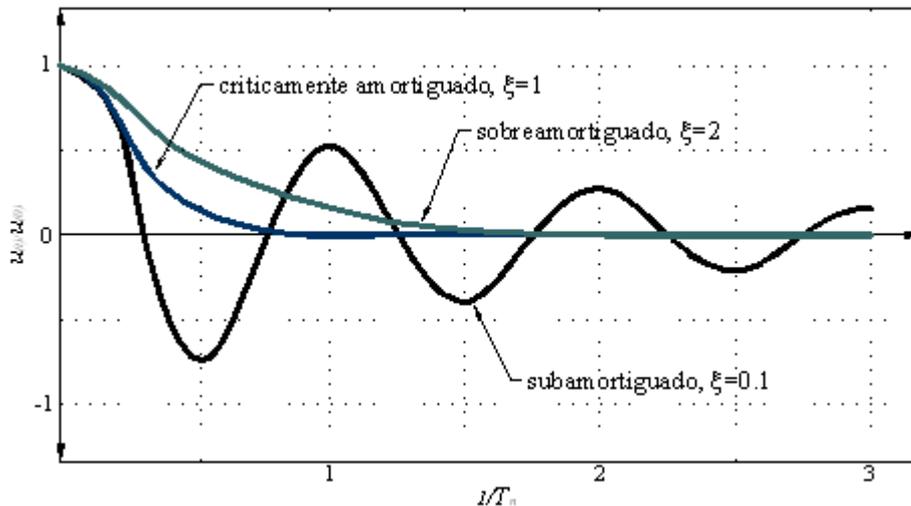


Ilustración 2 - Diferencias entre vibraciones amortiguadas [4]

3. VIBRACIONES FORZADAS SIN AMORTIGUAMIENTO

Son las vibraciones que se generan por la acción de una fuerza exterior que es aplicada al sistema. En este tipo de vibraciones y al contrario que pasa con el tipo anterior, la amplitud de las vibraciones aumentará con el tiempo dado que no existe ningún método de amortiguamiento de las vibraciones; por tanto, no se disipa energía, sino que se incrementa al introducir la fuerza exterior.

$$F = m \cdot \ddot{x} + k \cdot x \quad (15)$$

Esta es la ecuación del movimiento de este tipo de oscilaciones. Para resolver esta ecuación diferencial debemos dividirla en la ecuación diferencial homogénea y sumarle a su solución la solución particular de la ecuación completa. Como F es de tipo periódico $F = F_0 \cdot \cos(\omega t)$, donde F_0 es la amplitud y ω es la frecuencia de la fuerza exterior que excite el sistema.

En el apartado de vibraciones libres sin amortiguamiento se ha visto que la solución de la ecuación homogénea son raíces imaginarias conjugadas $\lambda = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} i$, y la solución general de esta homogénea es, por tanto, $x_h = A \cdot \text{sen}(\omega_n \cdot t + \varphi)$.

La solución particular de la ecuación completa es:

$$x_p = A \cdot \cos(\omega t) \quad (16)$$

Sumando las dos soluciones, homogénea más particular, se obtiene la solución general que es de la forma



$$x = A \cdot \cos(\omega_n \cdot t + \varphi) + \frac{F_0/k}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}} \cos(\omega t) \quad (17)$$

En este tipo de vibraciones, el movimiento está formado por dos armónicos, uno de frecuencia natural que se ha denominado ω_n y el otro armónico es de la frecuencia de la fuerza excitadora exterior y se ha denominado ω . La amplitud del armónico de frecuencia natural depende de las condiciones iniciales del sistema y se puede llegar a anular para unos valores en concreto. La amplitud del armónico dependiente de la fuerza exterior depende de la proximidad de ambas frecuencias, debido al fenómeno de la resonancia, muy interesante en este proyecto.

Cuando la frecuencia de la fuerza exterior es igual a la frecuencia natural del sistema ($\omega = \omega_n$) se produce la resonancia, la ecuación que rige dicho fenómeno es, Expresión que corresponde a un movimiento armónico de frecuencia ω_n y cuya amplitud tiende a infinito cuando t también tiende a infinito.

4. VIBRACIONES FORZADAS CON AMORTIGUAMIENTO

Este último tipo de vibraciones presentan un elemento amortiguador y una fuerza exterior. La ecuación del movimiento correspondiente es la siguiente:

$$F = F_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x \quad (18)$$

Si la fuerza es superior al amortiguamiento, la oscilación continuara indefinidamente, haciéndose la amplitud cada vez más grande. Si la fuerza exterior aplicada al sistema es igual al amortiguamiento que presenta el mismo, el movimiento sería como una vibración libre sin amortiguamiento. En el caso de que la fuerza menor al amortiguamiento, el movimiento se acabará disipando.

Para resolver la ecuación diferencial que describe el movimiento, se ha de separar en una ecuación homogénea y una ecuación particular. La solución de la ecuación homogénea es de la forma $x_h = ae^{-\frac{c}{2m}t} \text{sen}(\omega_n t + \varphi)$ y la solución particular es igual a $x_p = A \text{sen}(\omega t - \Theta)$. Por tanto, la solución general de estos movimientos es la suma de estas dos soluciones:

$$x = ae^{-\frac{c}{2m}t} \text{sen}(\omega_n t + \varphi) + A \text{sen}(\omega t - \Theta) \quad (19)$$

De estas dos partes, la solución de la homogénea y la solución particular se puede diferenciar en una solución transitoria, el primer término, que se disipará al cabo del tiempo, y una solución estacionaria donde la amplitud A es constante y el sistema oscila con pulsación ω .



$$tg\Theta = \frac{cw}{k-mw^2} \quad (20)$$

$$A = \frac{F_0/mw_n^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\frac{c}{c_r} \frac{w}{w_n}\right)^2}} \quad (21)$$



Capítulo 2: Elementos de carga.

En este apartado se explicará los dispositivos que harán posible la aplicación que ya se ha mencionado anteriormente, en la introducción del proyecto. Estos dispositivos consumidores son un sensor y una antena bluetooth.

Sensor

La aplicación del proyecto, por una cuestión de utilidad y facilidad de implementación, es la medición de la temperatura de la máquina en el momento de su funcionamiento. La temperatura de funcionamiento está indicada en la ficha técnica de la máquina, con lo cual es fácil observar si hay algún error en el funcionamiento de esta.

Además, la temperatura es una medida que no es necesaria medir cada milésima de segundo, pues la temperatura es una dimensión continua, es decir no puede haber saltos o discontinuidades de una temperatura a otra, sino que tiene que evolucionar, más rápido o más despacio, pero pasando siempre por cada centígrado.

Esta característica de continuidad de la temperatura es muy interesante para como está diseñado nuestro proyecto, pues podríamos reducir la cantidad de envío de datos para ahorrar energía que se explicará más adelante.

A pesar de que el sistema que se diseña aquí cuenta con un sensor de temperatura, se podría cambiar y adaptar el proyecto con diferentes sensores. Otras magnitudes que se podrían medir y serían interesantes controlarlas y monitorizarlas mientras las máquinas trabajan sería un sensor de humedad, o un micrófono, para ajustarse a un nivel de ruido que puede estar legislado. Estos otros sensores producen unos consumos parecidos a los sensores de temperatura como se puede observar en la siguiente tabla.



Magnitud a medir	Nombre del sensor	Voltaje	Precio aproximado
Temperatura	SEN-13314	3,3 V	5 €
Temperatura y Humedad	SHTC3	3,3 V	5 €
Temperatura, Humedad, Gas, y Presión	MIKROE-2467	3,3 V	30 €
Temperatura y Humedad	DPP301A000	3,3 V	20 €

Tabla 1 - Diferentes modelos de sensores [5]

En el caso de este proyecto, se elige como sensor el primero, que solo mide la temperatura, pues los otros sensores mencionados en la tabla, al medir más de una magnitud, su consumo es mayor. En el caso del sensor SEN-13314 su consumo no supera los 33 mW, ya que la corriente máxima admitida en el sensor es de 10 μ A, aunque de media su consumo es menor, pues en reposo su intensidad es de 1 μ A.

El siguiente sensor, SHTC3, es inviable para el proyecto debido a que su consumo es mayor. Durante la medición, que tiene una duración inferior a los 10 milisegundos, consume 500 μ A y en reposo su intensidad es 4,9 μ A; 5 veces mayor que la del dispositivo SEN-13314.

Antena bluetooth

Como se ha indicado desde el principio de este trabajo, la finalidad que se busca con este es la medición durante el funcionamiento de una máquina industrial sin necesidad de cables para facilitar el trabajo de los operarios y las instalaciones industriales. Al no utilizar cables exteriores, se necesita una fuente de autoalimentación que supla la electricidad que se conseguiría con un cable exterior: las vibraciones. Y, además, también se necesita un modo, si es posible, de conectar las mediciones que tome el sensor al ordenador central, para que no sea necesario que un operario vaya a la máquina a cada rato a comprobar las mediciones, ya que eso quitaría sentido al proyecto, pues no reduciría ni simplificaría el trabajo de estos.



Esta supresión de cables para la transmisión de datos ha sido el objeto de estudio en la última década de las principales empresas de telecomunicaciones. Diversas tecnologías se han desarrollado. Las más conocidas son el Wi-Fi, NFC, y el Bluetooth, pero existen una infinidad más como el Zigbee, RFID, GPRS, WiMAX... Todas estas tecnologías de transmisión inalámbricas se están haciendo un hueco en el uso cotidiano de las personas por su utilidad no solo en la informática sino también en la telefonía o la domótica.

Para este trabajo se va a centrar el estudio en la tecnología Bluetooth, ya que es una de las tecnologías más conocidas y más desarrolladas pues la primera versión de esta se creó en 1988.

Bluetooth es una tecnología inalámbrica de corto alcance que permite el envío de audio y datos entre varios dispositivos mediante un enlace por radiofrecuencia. Esto es una ventaja frente a otras tecnologías de transmisión sin cables como los infrarrojos donde los dispositivos tienen que estar alineados.

Es una tecnología de corto alcance, pero existen tres diferentes clases de dispositivos bluetooth dependiendo de su potencia de transmisión. Una potencia elevada permite incluso que el dispositivo receptor se pueda encontrar incluso en una habitación diferente del dispositivo emisor.

Clase	Potencia máxima de transmisión	Alcance estimado
1	100 mW (20 dBm)	100 metros
2	2,5 mW (4 dBm)	10 metros
3	1 mW (0 dBm)	1 metro

Tabla 2 - Clasificación de las diferentes clases de dispositivos Bluetooth

Las transmisiones entre dispositivos Bluetooth tienen lugar en la banda de frecuencias de acceso libre ISM (industrial, scientific and medical) de los 2,4 a los 2,485 GHz. Con lo cual, al ser de acceso libre, no hay que configurar ninguna frecuencia particular para el dispositivo de este proyecto. Además, la tecnología Bluetooth está concebida para evitar las posibles interferencias que se pueden producir en este ancho de banda con una técnica llamada “spread-spectrum frequency hopping”. El dispositivo Bluetooth con esta técnica cambia de frecuencia aleatoriamente entre un rango determinado. Aproximadamente el transmisor puede llegar a cambiar de frecuencias unas 1600 veces por segundo.



Una opción que se puede desarrollar dentro de la tecnología Bluetooth y que puede ser muy interesante para la aplicación de este proyecto en una industria es la llamada “piconet” o “picoredes”. Una “piconet” es una red de dispositivos esclavos que se conectan con un mismo dispositivo central o *máster*. El dispositivo central es el encargado de la conexión y desconexión de los dispositivos esclavos y de gestionar el tráfico dentro de la red. [6]

Con una piconet, se podría llegar a conectar hasta siete dispositivos de medición vía bluetooth con un ordenador central que actuaría de dispositivo *máster*; y con ello, el laboratorio o industria que utilice el prototipo que se estudia en este trabajo podría monitorizar todos los sensores desde un solo dispositivo sin necesidad de ningún tipo de cable.

Queda claro pues que el método de envío que el prototipo utilizará será una antena Bluetooth, pero quedan muchas dudas a resolver. ¿Cada cuánto se va a efectuar cada envío de datos pues la temperatura, magnitud que se va a medir es una magnitud lineal, es decir, evoluciona a cada instante?

Cierto es que la temperatura es una magnitud que cambia a cada instante, pero se presupone que en un funcionamiento normal de una máquina el cambio de temperatura no puede ser muy brusco, es decir, no habrá saltos ni discontinuidades. Por tanto, lo que parece más lógico es hacer un envío a una frecuencia de tiempo determinada, para conseguir ahorrar energía, pues el problema de la falta de energía recuperada por falta de tecnología sigue existiendo.

Otra idea que esta sobre la mesa es el tratamiento de datos. Recolectar los datos de las temperaturas continuamente y que, como se acaba de explicar en el párrafo anterior, se envíen con una cierta frecuencia temporal todas las mediciones instantáneas en un paquete. Aunque esta opción parece menos interesante pues no existen saltos bruscos en cuestión de segundos.

Si, por tanto, se pretende programar un envío periódico respetando una frecuencia temporal existe otro elemento que se tendrá que alimentar aparte del sensor y la antena bluetooth: una tarjeta Arduino. La tarjeta Arduino será la responsable de conectarse con el ordenador y programar el envío de datos. Y si fuera interesante para el cliente, hacer un tratamiento de datos, pues es una tarjeta programable que puede ejecutar el programa que se desee. En este trabajo se va a intentar diseñar un programa que sea capaz de transmitir las temperaturas.



Dispositivos elegidos

Queda pues, definir qué elementos serán los responsables de ejecutar las misiones previamente citadas. A continuación, se detallará el sensor que tomará las medidas, la antena bluetooth y la tarjeta Arduino responsables del envío.

Para la elección del sensor se han tenido en cuenta las magnitudes que serían interesantes medir de una máquina:

- La temperatura de funcionamiento.
- El ruido.
- Las propias vibraciones.

También se ha considerado la idea de medir la humedad del ambiente, para saber si los circuitos internos se podrían llegar a dañar, si por ejemplo se activa la alarma antiincendios y llueve, o si hay una gotera o pérdida de líquido refrigerante o lubricante. Pero esto ya no sería una magnitud de la propia máquina sino del exterior y por tanto se ha descartado.

El ruido es una magnitud interesante a tener controlada ya que altos niveles de ruido pueden producir en los trabajadores problemas de salud o estrés; y además la contaminación acústica puede ser motivo de multa. [7]

Este ruido se podría medir con un micrófono, pero en este caso, esta magnitud puede presentar saltos y discontinuidades con lo cual no es tan fácil de hacer el seguimiento como de la temperatura de funcionamiento.

Las vibraciones de la máquina podrían simplemente medirse en función de la tensión que genera el transductor piezoeléctrico, haciendo una equivalencia. Esta idea se ha descartado porque no parece una magnitud tan útil como la temperatura a la que la máquina está funcionando.

Por tanto, el sensor elegido es un sensor de temperatura que recoja la temperatura de la máquina y al ser una magnitud lineal el operario solo se debe preocupar si la temperatura empieza a elevarse de manera inusual.

Una presa hidráulica o un martillo pilón con un funcionamiento intensivo no suelen superar los 110°C y obviamente no bajan a una temperatura de funcionamiento inferior a los 30°C bajo cero. Con lo cual se elige sensor de temperatura para el proyecto el modelo SEN-13314.



Nombre	Rango de medidas	Precisión	Tensión de alimentación	Corriente	Precio
SEN-13314	De -40°C a 125°C	0,5°C (de -25°C a 85°C)	De 1,4V a 3,6V en CC	10µA (1µA en reposo)	4,67 más impuestos

Tabla 3 - Características del sensor elegido

Para la comunicación como ya se ha explicado previamente se necesitaría una antena bluetooth y una tarjeta Arduino, tarjeta electrónica de pequeño tamaño. Pero el problema que aparece es el bajo rendimiento de obtención de energía. Por ello, alimentar dos elementos diferentes sería más costoso que alimentar uno solo, principalmente porque las pérdidas se duplicarían.

La búsqueda de elemento por tanto se centra en un dispositivo combinado; una tarjeta electrónica que actúe como un microcontrolador equipada con una antena bluetooth que pueda conectarse con otro dispositivo que posea la tecnología bluetooth, como un ordenador.

En el mercado se encuentra el dispositivo RFDuino RFD22102 que es un microcontrolador compatible con Arduino, y está equipado de un módulo BLE (Bluetooth Low Energy). Este dispositivo funciona con tensiones entre 2,1V y 3,6V y el módulo Bluetooth se podría incluir en la clase 2 que se ha explicado anteriormente, aunque sea un módulo BLE en vez de uno de Bluetooth convencional.

Nombre	Tensión de alimentación	Corriente durante envío	Corriente durante tratamiento de datos
RFD22102	De 1,4V a 3,6V en CC	12 µA	0,5 mA

Tabla 4 - Características de la antena Bluetooth y tarjeta Arduino

La diferencia principal entre Bluetooth y BLE, y razón por la cual se ha creado BLE, está en el consumo de energía (la especificación dice que BLE puede llegar a necesitar solo el 10% de lo que necesita Bluetooth para funcionar). El causante principal de este bajo consumo es, comparado con las capacidades de Bluetooth clásicas, que BLE es un protocolo “sin conexión”, es decir, los dos extremos de la comunicación no tienen la necesidad de estar permanentemente conectados. Esto permite a los dispositivos permanecer “dormidos” o en estado de “standby” durante mucho tiempo en caso de que no haya información que intercambiar, lo que reduce significativamente la cantidad de tiempo que el dispositivo y su parte transmisora/receptora necesita estar encendida. [6]

Por tanto, el proceso global de la transmisión de datos sería el siguiente, se enciende el microcontrolador, se conecta al ordenador central, envía los datos que ha recogido, y cuando ha efectuado el envío “hiberna” en el llamado “sleep mode” para bajar el consumo de energía.



En resumen, el consumo máximo que se podría llegar a dar sería cuando en el sensor y en el dispositivo RFDuino (antena Bluetooth y tarjeta Arduino) circulara la máxima intensidad posible. Este caso se da cuando la tarjeta Arduino está tratando los datos donde circula 0,5 mA por ella. En el sensor la corriente máxima es de 10 μ A. Por tanto, el consumo máximo, a una tensión de 3,6 V sería de 1,836 mW.



Capítulo 3: Estructura mecánica.

El fenómeno de resonancia normalmente se intenta evitar en la concepción de la mayoría de los objetos por sus enormes efectos adversos, como, por ejemplo, podemos observarlo perfectamente en el mundo de las carreras de coches; en la Formula 1. Si se modifica un poco los alerones delanteros (por un contacto entre coches normalmente) que van muy pegados al suelo, se producen, por la velocidad, unas vibraciones que si llegan a la frecuencia de resonancia característica puede producir un aumento de la amplitud y hacer que el coche “se trague” el alerón delantero. Esta temporada le ha ocurrido al piloto alemán Sebastian Vettel en Baréin.

Para la concepción de la estructura mecánica se va a utilizar este fenómeno a nuestro favor, intentando que se produzca una resonancia que amplifique las vibraciones de la máquina asociada contrariamente a lo que se suele hacer al crear una máquina.

Por ello, vamos a crear una estructura mecánica que consista en un pie de acero que transmita, a través de él, las vibraciones a una lámina también de acero. Se ha elegido el acero por la rigidez de este material que viene definida por su alto módulo de Young (210 GPa). Esta rigidez permite que las deformaciones producidas por las vibraciones no causen una plastificación del material.

La plastificación del material se refiere a una deformación plástica, es decir, una deformación que prosigue cuando el material ya no está sometido a la carga que lo deformaba. Una deformación plástica al contrario de una deformación elástica es permanente. Toda deformación de un material comienza siendo una deformación elástica, que, dependiendo del módulo de Young, y en función de la carga a la que se somete al material se puede transformar en una deformación plástica o irreversible.

Esta estructura consiste, como ya hemos definido anteriormente de un pie y una lámina, como se ilustra en la captura de pantalla del software de CAO online Onshape.

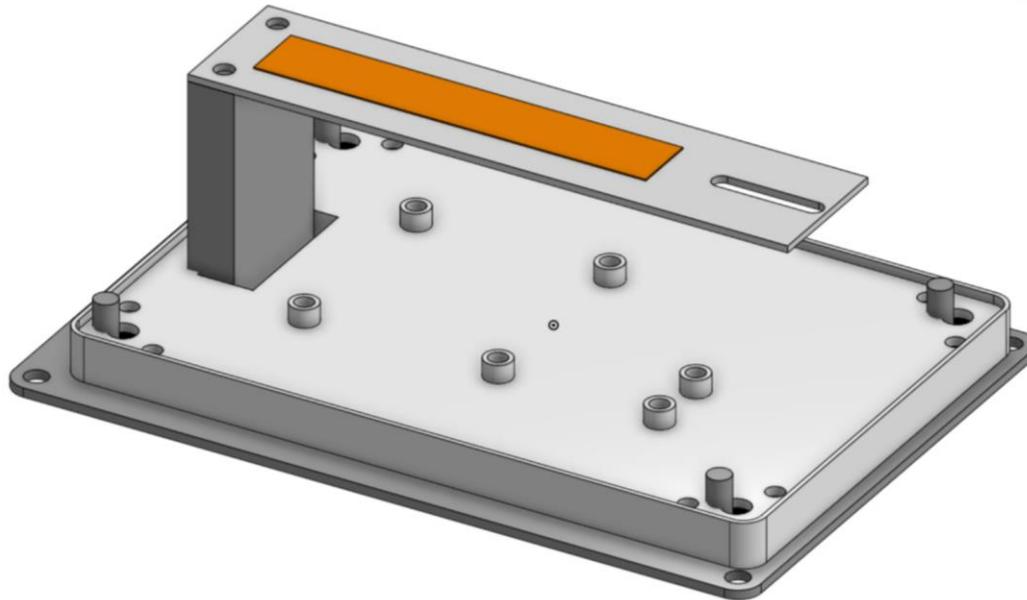


Ilustración 3 - Estructura modelizada en Onshape

Pie de la estructura

El pie tiene que tener una altura suficiente para que la lámina pueda vibrar sin tocar el suelo o la pared de la máquina en una ondulación completa. Y, además, tiene que ser lo suficiente rígido para que no vibre y solo transmita todas las vibraciones a la lámina.

Esta altura es de 40 milímetros aproximadamente como se podrá comprobar en el plano que se adjunta a este proyecto en la correspondiente sección. Se estima que la deformación de la lámina no superará los 10 milímetros.

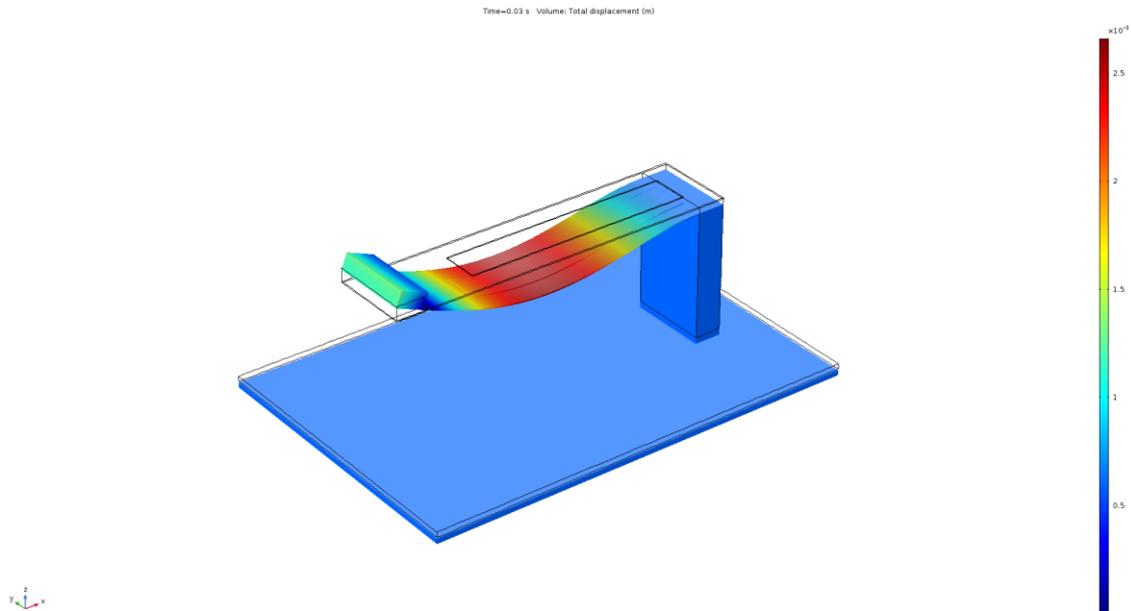


Ilustración 4 - Simulación de la deformación en la estructura modelizada.

Lámina vibrante

La lámina es la parte fundamental de este proyecto pues es la responsable de amplificar las vibraciones para que sea posible adquirir una energía suficiente para darle una aplicación.

Esta lámina se va a concebir teniendo en cuenta dos ideas:

1. Llegar a la frecuencia de resonancia.
2. Respetar un tamaño pequeño para que se pueda colocar encima de una máquina.

Es importante no olvidarse que el sistema va a ser un sistema embarcado, es decir, se colocara encima de otro dispositivo con lo cual tendremos que modelizarlo lo más pequeño posible respetando la capacidad de transformar una cantidad suficiente de energía.

Para conseguir llegar a la frecuencia de resonancia es necesario concebir la lámina con ciertas dimensiones particulares. Además, se colocará una masa en el extremo de la misma para facilitar su desplazamiento. Para conseguir estas dimensiones características vamos a utilizar la siguiente formula:

$$w = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{Ebh^3}{mL^3}} \quad (22)$$

Donde w es la pulsación o frecuencia deseada, E es el módulo de Young, b y h son el ancho y el espesor de la lámina. En el denominador se encuentra m que es la masa



que colocaremos en el extremo de la lámina, a una distancia determinada por L del comienzo de la lámina (donde la lámina se une con el pie).

De esta fórmula conocemos:

- 1- La frecuencia a la que queremos que vibre la lámina. En este caso, y como se ha visto al estudiar las vibraciones de las máquinas, una máquina en un funcionamiento óptimo tiene una amplitud máxima cuando la frecuencia coincide con sus revoluciones por minuto, si la máquina se encuentra en buen estado.

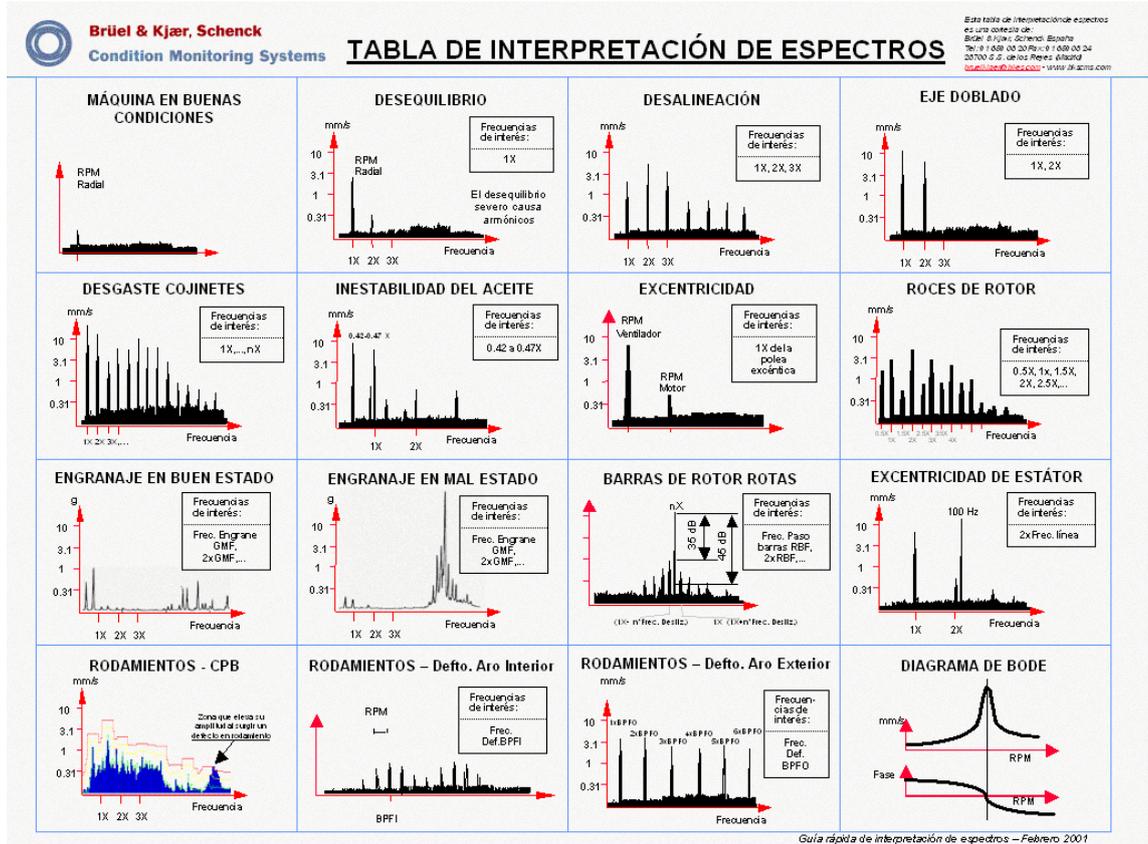


Ilustración 5 - Espectros de vibración de una máquina

- 2- El módulo de Young, que es una característica propia del material con el que se hará la lámina.

El resto de los términos los fijaremos siguiendo los criterios ya mencionados y los permutaremos para saber cuál es la configuración más ventajosa.

En la siguiente tabla se pueden ver las diferentes configuraciones dependiendo de qué términos fijemos.



w(rpm)	w(rad/s)	E(MPa)	b(mm)	h(mm)	m(kg)	L(mm)
2000	209,439333	210000	30	2	0,05	17,9099627
3000	314,159	210000	30	2	0,05	13,6678596
3000	314,159	210000	30	2	5,81087E-05	130
2000	209,439333	210000	30	2	0,000232435	130
1500	157,0795	210000	30	2	0,000232435	130
1000	104,719667	210000	30	2	0,002042639	100
100	10,4719667	210000	30	2	0,204263851	100
100	10,4719667	210000	30	1,5	0,048472769	100

Tabla 5 - Posibles configuraciones de la estructura

El material que se emplea es el acero de 2 mm de espesor y 30 mm de ancho. El acero posee un módulo de Young elevado, 210 GPa.

Se elige una longitud de 130 mm de lámina pues se estima que con menos longitud no se podrá colocar un transductor lo suficientemente grande para conseguir la suficiente energía. En la lámina se va a realizar un agujero para poder ajustar la masa, necesaria para llegar a la frecuencia de resonancia que se busque en cada momento, entre 100 mm y 130 mm.

En resumen, para llegar a la frecuencia de resonancia se necesitará añadir una masa que variará en función de las revoluciones por minuto (rpm) a la que la máquina asociada se encuentre vibrando, como se puede observar en la tabla superior.

Teniendo ya fijada la estructura mecánica, el siguiente paso del proyecto es decidir cómo se van a transformar las vibraciones en electricidad.



Capítulo 4: Transformación de vibraciones en electricidad.

Recuperación de energía a partir de las vibraciones

Introducción

A partir del estudio de [8] S. Beeby and N. White. “Energy harvesting for autonomous systems. Artech House, 2010.” se vió interesantes la posible aplicación de recuperación de energía de medios no convencionales como recuperarla a partir de materiales piezoeléctricos insertados dentro de la suela de un zapato.

Tecnología	Densidad de potencia
Fotovoltaica exterior (célula de rendimiento 15%, irradiancia incidente de 100 mW/cm ²)	1500 μW/cm ²
Fotovoltaica interior (célula de rendimiento 6%, irradiancia incidente de 100 mW/cm ²)	100 μW/cm ²
Piezoeléctrico (insertado en los zapatos)	330 μW/cm ³
Vibraciones (Pequeño horno a microondas)	116 μW/cm ³
Termoeléctrico (para un gradiente de 10°C)	40 μW/cm ³
Ruido acústico (100dB)	0,96 μW/cm ³

Tabla 6 - Densidad de potencia de diferentes tecnologías para la recuperación de energía [8]



Estudio de los diferentes tipos de transductores

La mayoría de los recuperadores de energía que existen en este momento se basan en un sistema mecánico resonante de tipo masa-resorte. En este trabajo se va a detallar una serie de transductores que podrían ser viables para la ejecución del objetivo y finalmente se elegirá el que más convenga para la aplicación.

Actualmente se puede elegir diferentes tipos de transductores: los electromagnéticos, los electrostáticos, y los piezoeléctricos. A continuación, se detallará estos tres tipos que son los más utilizados.

Transductor electromagnético

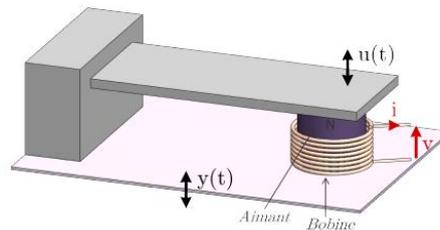


Ilustración 6 - Transductor electromagnético

Un transductor de tipo electromagnético simple consta de uno o más imanes los cuales crean un campo magnético constante, y una bobina que penetra a su vez en este campo. Para que el sistema funcione, tiene que existir un desplazamiento relativo entre el imán y la bobina. Este desplazamiento produce una variación del flujo magnético a través de la superficie rodeada por la bobina, la cual crea una tensión, V , proporcional a la velocidad de cambio del flujo magnético y el número de vueltas de la bobina, como indica la ley de Faraday.

$$V = -N \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (23)$$

Este sistema se puede construir con una viga empotrada o con un resorte que haga variar la posición de la bobina respecto al imán.

Los dispositivos electromagnéticos tienen la ventaja de una implementación simple, con elementos tecnológicamente conocidos y en ejecución. Pueden generar altos niveles de corriente a expensas de bajos voltajes. Estos sistemas también son adecuados para vibraciones de baja frecuencia y alta amplitud, como las relacionadas con los movimientos del cuerpo humano. La integración a escala micrométrica es sin embargo más difícil debido al bajo rendimiento de los imanes micrométricos, y la limitación en cuanto al número de vueltas de las bobinas.



Transductor electrostático

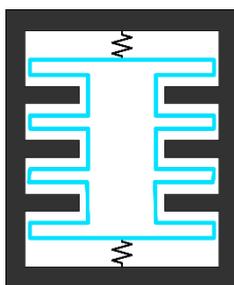


Ilustración 7 - Transductor electrostático

Los generadores electrostáticos constan de dos placas eléctricas aisladas entre ellas y precargadas que tendrá un desplazamiento relativo, una con respecto a la otra bajo el efecto de vibraciones externas. Si el generador funciona a carga constante, la disminución en la capacidad del generador, inducida por la variación en la distancia entre dos placas, tendrá el efecto de aumentar el voltaje del generador y, por tanto, aumentar la energía potencial almacenada en el condensador. De la misma manera, fijando la tensión, el movimiento de las placas tiene el efecto de producir una corriente debido al movimiento de las cargas.

Los investigadores Rabaey, Roundy y Wright [9] evaluaron la densidad de potencia de los generadores electrostáticos en $50 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ a una frecuencia de 120 Hz y una aceleración de 2.5 ms^{-2} , y una de $250 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ para un generador piezoeléctrico en las mismas condiciones.

A pesar de una densidad de potencia a priori, menos importante que con otros modos de transducción, y la desventaja de que requieren una fuente de tensión auxiliar, los generadores de este tipo tienen la ventaja ser particularmente adecuado para realizaciones de tamaño microscópico, y han sido objeto de muchos logros con las técnicas de fabricación MEMS (Sistemas Micro-Electromecánicos (*Microelectromechanical systems*)).

Transductor piezoeléctrico

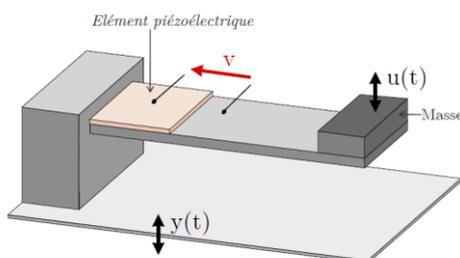


Ilustración 8 - Transductor piezoeléctrico

Los transductores piezoeléctricos se basan en la propiedad de ciertos materiales no conductores para polarizarse eléctricamente bajo la acción de una tensión mecánica



(efecto directo), y, por el contrario, deformarse mecánicamente bajo la aplicación de un campo eléctrico (efecto inverso). En el caso de la recuperación de energía, (objeto de este trabajo) el efecto piezoeléctrico directo se explota generalmente mediante el acoplamiento de una cerámica piezoeléctrica (PZT) a una estructura resonante la cual impone una deformación. La estructura mecánica es en la mayoría de los casos una viga incrustada, en la que una o más cerámicas están unidas. En resumen, las vibraciones de la viga inducen una deformación del material piezoeléctrico, creando así su la polarización. Además, los sistemas piezoeléctricos a diferencia de los sistemas electromagnéticos. producen altos niveles de voltajes con corrientes más bajas, y son adecuados para frecuencias de vibración más altas. Tienen la ventaja de estar más adaptados a técnicas de fabricación MEMS, es decir, son fácilmente miniaturizadas.

En resumen:

Electromagnéticos:

Con un volumen mayor que otros sensores, los electromagnéticos no son adecuados para tamaños pequeños, pero son lo suficientemente buenos para dispositivos de tamaño medio. Además, funcionan bien para las frecuencias más bajas, ya que las frecuencias resonantes son del orden de hercios. Se requieren oscilaciones relativamente grandes para generar cantidades utilizables de energía eléctrica. Una de las principales debilidades es la caída de voltaje provista, aproximadamente 0.2 V, pero la corriente es mayor que la de los otros transductores, y aumenta proporcionalmente al tamaño del dispositivo

Electrostáticos:

Este tipo de transductor es miniaturizable. El problema que presenta es que necesita una fuente externa de alimentación para mantener una carga constante necesaria para su funcionamiento.

Piezoeléctricos:

El punto fuerte es la versatilidad para usar con cualquier tamaño, aunque la capacidad de recuperación de energía máxima es menor que la de la electromagnética y la electrostática [10].



Tipo de transductor	Ventajas	Inconvenientes
Electromagnético	<ol style="list-style-type: none">1. Simplicidad2. Fuerte acoplamiento magnético	<ol style="list-style-type: none">1. Genera bajas tensiones2. Difícil de miniaturizar
Electrostático	<ol style="list-style-type: none">1. Fácil de miniaturizar2. Genera altas tensiones	<ol style="list-style-type: none">1. Necesita una fuente de tensión externa
Piezoeléctrico	<ol style="list-style-type: none">1. Fácil de implementar y miniaturizar2. Genera altas tensiones	<ol style="list-style-type: none">1. Frágil2. Alta impedancia

Tabla 7 - Diferencias entre los diferentes transductores electromecánicos

Dado que el objetivo del proyecto es construir un sensor autoalimentado por la energía de las vibraciones de la máquina; se descartan los transductores electrostáticos debido a la necesidad de una fuente de tensión externa.

El transductor electromagnético genera una tensión menor que los transductores piezoeléctricos. Esta característica junto con la dificultad que presentan para su miniaturización conlleva a que los transductores con los que se va a trabajar en el este proyecto sean los piezoeléctricos.

Los piezoeléctricos presentan como inconveniente principal la fragilidad debido a su modo de empleo (efecto directo) descrito anteriormente consistente en que todo el material se deforme para generar el voltaje eléctrico.



Elección del transductor piezoeléctrico

Para el proyecto se elige un transductor MFC que se encuentra en la página web www.smart-material.com, dado que las dimensiones de este encajan con el tamaño pensado del proyecto y con las dimensiones de la lámina donde se va a colocar.

En la página web describen al transductor como un “actuador y sensor de bajo perfil que ofrece un alto rendimiento, durabilidad y flexibilidad en un coste competitivo”.

Las siglas MFC significan *Macro compuesto de fibra* y, según la página web donde se comercializa, fue desarrollado por la NASA desde 1996.

“El MFC consiste en varillas de cerámica piezoeléctricas rectangulares intercaladas entre capas de adhesivo, electrodos y película de poliimida. Los electrodos están unidos a la película en un patrón interdigitado que transfiere el voltaje aplicado directamente hacia y desde las barras en forma de cinta. Como una hoja delgada y adaptable a la superficie, se puede aplicar (normalmente soldada) a varios tipos de estructuras o incrustarse en una estructura compuesta. Si se aplica voltaje, doblará o distorsionará los materiales, contrarrestará las vibraciones o generará vibraciones.”

Por último, solo queda elegir el tamaño del piezoeléctrico. El criterio para esta elección es el tamaño, ya que el material es el mismo. El tamaño que se busca es un tamaño medio. No se desea muy grande porque tiene que estar sobre una máquina, pero tampoco se puede elegir un dispositivo tan pequeño que no se consiga obtener la suficiente energía como para hacer funcionar el prototipo. Aunque en el futuro, el objetivo debería ser hacer lo más pequeño posible todo el prototipo, pero para ello, se necesitaría una tecnología más desarrollada que la que se posee en este proyecto. Al conocerse ya las dimensiones de la lámina sobre la cual va a ser colocado el transductor, la elección se facilita.

En la tabla de a continuación se muestran las características del transductor elegido. Se debe diferenciar las dimensiones activas de las totales. Las dimensiones activas son las cuales tienen material piezoeléctrico y por tanto es una superficie que transforma la energía. Esta superficie, como se explica en la descripción del producto viene intercalada y rodeada por adhesivo. Las dimensiones totales tienen en cuenta la dimensión activa más la distancia en la que es solo una película de poliimida.



modelo	Longitud activa mm	Anchura activa mm	Longitud total mm	Anchura total mm	Capacidad nF $\pm 20\%$	Deformación libre ppm $\pm 10\%$	Fuerza de bloqueo N $\pm 10\%$
M8514-P2	85	14	100	18	138	-630	-76

Tabla 8 - Modelo de transductor piezoeléctrico elegido

Como colocar el transductor sobre la lámina

El transductor que se elige para la concepción del proyecto, como se acaba de mencionar previamente, es una fina lámina de material plástico-cerámico. Este material, muy delicado, tiene que estar situada y fijado solidariamente sobre la lámina vibrante, puesto que, para que el sistema funcione, el piezoeléctrico se debe deformar junto con la lámina vibrante para que se produzcan las deformaciones en el transductor y por tanto este material sea capaz de crear la electricidad necesaria para alimentar el sensor del proyecto.

La propia compañía que fabrica y comercializa el transductor indica que la mejor manera de fijarlo sería con un adhesivo Epoxi. Detalla dos marcas como 3M y Loctite. Para pegarlo y que tenga la mejor adhesión recomienda que se mantenga presión durante dos horas a 50°C. [11]



Capítulo 5: Adaptación de la señal.

Introducción

Este capítulo trata de esclarecer cómo funciona todo el proyecto internamente, cómo se adapta la señal de salida del transductor para alimentar los elementos de carga del segundo capítulo.

El problema y, por tanto, razón de existir este capítulo, es que el transductor piezoeléctrico proporciona ondas eléctricas de corriente alterna (AC en inglés) y el sensor de temperatura se alimenta en corriente directa (DC en inglés).

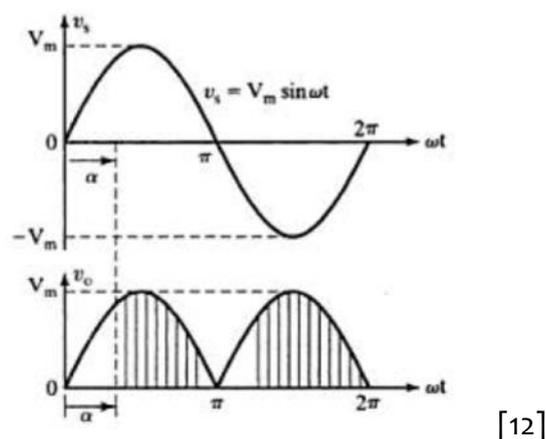


Ilustración 9 – Onda de corriente alterna y onda rectificada

Esta imagen pretende ilustrar la diferencia entre una onda de corriente alterna, una onda senoidal situada justo encima de una onda de corriente directa. La clara diferencia es la falta de parte negativa en la corriente directa.

Para redactar este capítulo se ha extraído información de un libro de electrónica de potencia como se indica al final de este, en la biografía.

Existen seis tipos de circuitos de electrónica de potencia que son los responsables del control de la energía eléctrica y de su acondicionamiento para su uso potencial. A continuación, se citan:

- i. Rectificadores de diodos
- ii. Convertidores AC/DC (rectificadores controlados)
- iii. Convertidores AC/AC (controladores de corriente alterna)



- iv. Convertidores DC/DC
- v. Convertidores DC/AC (inversores)
- vi. Interruptores estáticos

De corriente alterna a corriente continua

El objetivo que se busca es acomodar una señal de corriente alterna a una señal de corriente directa; con lo cual, los dos circuitos que son interesantes a estudiar son los rectificadores de diodos y los convertidores AC/DC. La elección de un dispositivo en particular depende de los requisitos del circuito, es decir, de voltaje, corriente y velocidad del convertidor.

Un circuito rectificador de diodos convierte la tensión alterna en una tensión fija, al igual que un convertidor AC/DC. Además, en este tipo de circuitos el voltaje de entrada al rectificador puede ser monofásico o trifásico.

Los convertidores AC/AC, DC/AC e interruptores estáticos no se tienen en cuenta en el resto del capítulo ya que devuelven una onda de salida en corriente alterna que no permite alimentar los dispositivos de medición.

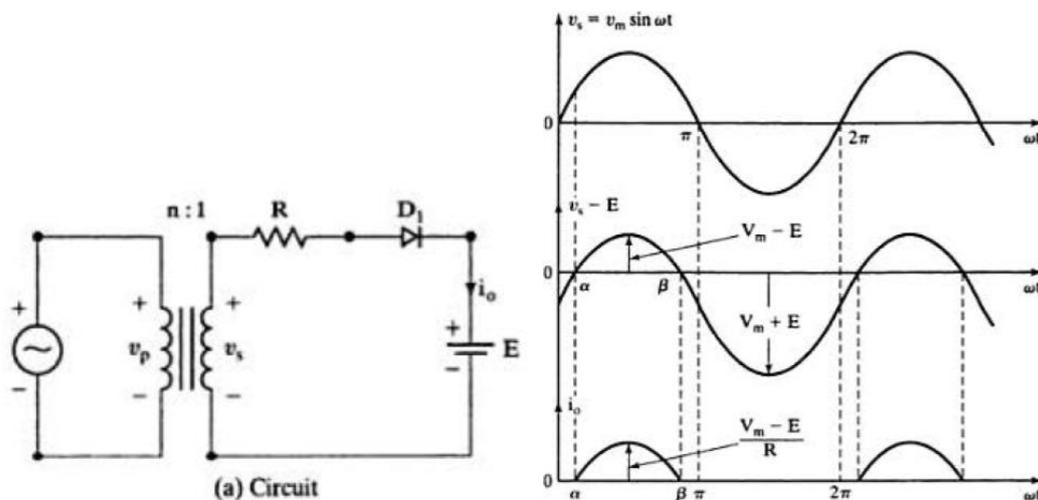


Ilustración 10 - Diagrama de un circuito con un solo diodo. 11 - Representación gráfica de un rectificado de media onda

Para este proyecto se elige la opción de un circuito rectificador de diodos. Pero con la característica de no solo utilizar un diodo como se ilustra en la imagen del circuito de arriba. El circuito es un rectificador de media onda, pues solo transforma las ondas positivas de corriente alterna en corriente continua; y por tanto, existirían unas pérdidas abrumadoras utilizando este circuito.



Si en cambio se utiliza un circuito rectificador de onda completa, utilizando cuatro diodos, tanto la onda positiva como la negativa se conseguirían transformar, como se ilustra en las siguientes imágenes y ser aptas para el uso.

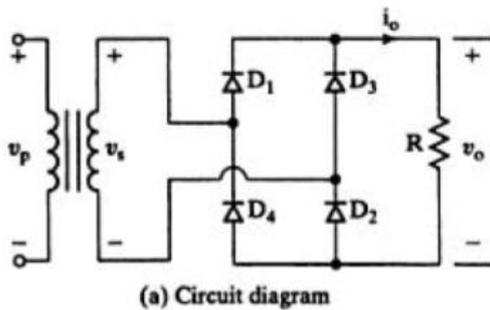


Ilustración 12 - Diagrama de un circuito rectificador de onda completa.

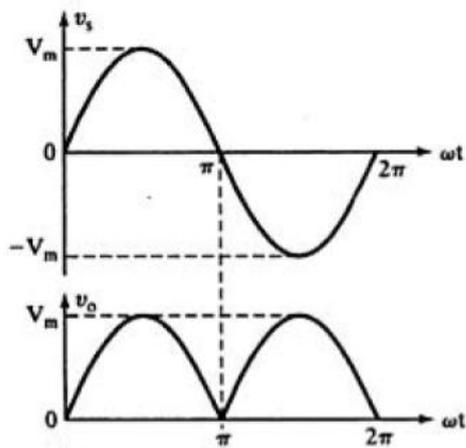


Ilustración 13 - Representación gráfica de una rectificación completa de onda.

En este caso, al añadir un diodo al circuito, la tensión en los extremos de la carga disminuye un cierto valor. Se han estudiado los diodos de silicio y los diodos Schottky. Los primeros tienen un valor de 0,6V como tensión de umbral, mientras que los segundos, los diodos Schottky tienen una tensión de umbral entre 0,15 V y 0,45 V. [13]

Además, este valor debe ser duplicado ya que, en cada fase de funcionamiento, la corriente pasa a través de dos diodos. Por lo tanto, un puente de diodos de silicio causará una caída de tensión de salida de 1,2 V, mientras que un puente de diodos Schottky causará una caída de tensión entre 0,30 V y 0,90 V.

Como no se espera recuperar mucha energía de las vibraciones puesto que la tecnología a utilizar no está lo suficientemente evolucionada, se intentará minimizar al máximo las pérdidas. Por tanto, los diodos que se utilizarán en el proyecto serán los diodos Schottky.



Este tipo de diodos están fabricados con un material que permite una conmutación más rápida. Poseen el inconveniente de que no se pueden utilizar por encima de 300 V [12], pero para nuestra aplicación es meramente anecdótico, ya que los posibles valores de tensión se elevan a 100 V como valor máximo.

Por último, la elección de un rectificador de señal de diodos, desde el punto de vista económico es una elección acertada pues el costo que presentan los diodos es bastante bajo; los diodos Schottky son aun así más caros que los de silicio pero que de media no superan los seis euros la unidad. [14]



Adaptación de la señal rectificadora

Una vez se consigue transformar la señal de salida del transductor en una señal de corriente continua, se tiene un prototipo que obtiene una señal de corriente continua a partir de las vibraciones de la máquina de la cual debe tomar mediciones este aparato. Por tanto, lo único que queda a configurar es esta señal continua a los valores del sensor que se pretende alimentar.

Los componentes encargados de dar sentido al proyecto, es decir, de cumplir una misión, en este caso, medir y enviar las señales a un ordenador, requieren un cierto rango de tensión. Para ello, se necesitará crear un segundo circuito electrónico de potencia con uno de los componentes de los que se han hablado en la introducción de este capítulo.

En este nivel, en el que la onda que existe esta ya rectificadora y por tanto es una señal de corriente continua, y que el sensor se alimenta también con una señal de corriente continua, (DC en inglés) el convertidor que se utilizara es el convertidor DC/DC. La función del convertidor DC/DC es modificar la tensión de salida del convertidor AC/DC a una tensión adecuada.

Se estima que, con una deformación entre dos y tres centímetros de la lámina metálica, a partir de observaciones y ensayos en la École Centrale de Lille, y que con ello se puede llegar a obtener 10 V a la salida del transductor piezoeléctrico.

Tras la rectificación de la onda, se llega a la salida del puente de diodos con una onda de corriente continua de 10 V; por tanto se debe modelizar un transformador de corriente continua que transforme los 10V de entrada a una salida inferior a 3V que es una tensión con la que se puede alimentar un condensador si se pretende almacenar energía si sobra, aunque en este caso está prácticamente descartado por la falta de energía que se puede llegar a obtener de las vibraciones con este sistema.

En internet se encuentra el conversor LTC3634, el cual acepta voltajes de entrada entre 3,6 y 15 V y produce tensiones de salida entre 0,6 y 3 V. [15]

Conclusión

Para adaptar la señal de salida del transductor y poder así alimentar el sensor, se utilizará un rectificador de onda completa, basado en cuatro diodos Schottky, los cuales simplemente transforman toda la onda de corriente alterna en una onda de corriente continua y, acto seguido, se coloca un transformador DC/DC destinado a transformar el voltaje estimado tras una serie de experiencias en laboratorio, de 10 V a 3V.



Conclusiones del proyecto

En este trabajo se ha realizado una investigación de cómo se podría implementar el reciclaje de una energía actualmente desperdiciada como son las vibraciones. Para ello, se ha diseñado una estructura metálica capaz de amplificar las vibraciones de una máquina.

También se ha realizado un estudio de los transductores electromecánicos, resultando el transductor piezoeléctrico el más conveniente para esta aplicación por las razones que se esgrimen en el cuarto capítulo.

Además, se ha realizado un estudio de cómo adaptar la onda eléctrica de salida del transductor para alimentar los elementos de carga del prototipo. Y, por último, se ha diseñado un programa Arduino para la medición de temperatura y el envío de estos datos a un receptor, vía bluetooth.

Trabajar en un prototipo concreto permite enfocar más aún el proyecto y, conocer de primera mano todos los impedimentos a nivel tecnología y presupuesto que esta energía acarrea.

Con este proyecto se pretende aportar un punto de partida teórico para avanzar en el análisis de que una máquina se autoabastezca de energía, a través de sus propias vibraciones, para alimentar un sensor que suministre datos sobre el funcionamiento de la misma.

En principio, esta tecnología no está lo suficientemente desarrollada como para plantearse a gran escala la sustitución de energías convencionales, sin embargo, se podría explorar su utilidad para remplazar parte del consumo de la propia máquina que produce la vibración.

El prototipo que en este trabajo se detalla sirve para demostrar que se pueden alimentar dispositivos tecnológicos a partir de otras energías no convencionales. Hay muchas y muy diferentes energías renovables aún por explotar que si se desarrolla su tecnología y se invierte dinero en ellas pueden ser muy útiles para el mundo de hoy en día.



Posibles mejoras del proyecto.

Este proyecto solo es un primer intento de dar una utilidad a la energía de las vibraciones en el mundo industrial. Esto quiere decir, que pueden efectuarse una multitud de mejoras, partiendo de la mejora de los componentes, su tecnología, para intentar obtener más energía.

La mejora que produciría un impacto sustancial en el proyecto sería la de colocar un supercondensador o una batería en el prototipo que se encargue de almacenar la energía de las vibraciones para que no se desperdicie mientras que no se alimenten los dispositivos consumidores de energía.

Se ha comenzado a modelizar esta idea, aunque aún falta profundizar en el tema, por ello, se deja escrito un comienzo de cómo podría incluirse esta idea en el proyecto, dejando claro que aún hay mucho trabajo por mejorar en este tema.

El objetivo que se pretende es almacenar energía antes de efectuar el envío de datos. Como no se va a efectuar envíos instantáneos sino en una frecuencia de tiempo, todas las vibraciones se tratan de transformar y almacenar en una batería o condensador.

Durante el funcionamiento de la máquina, puede que no haya vibraciones durante un tiempo. Además, es posible que las potencias recuperadas por el dispositivo no sean suficientes para ejecutar el envío en el momento que está programado. Se espera que, a pesar de cualquier problema, el sensor pueda ser alimentado.

Un dispositivo de almacenamiento se utiliza para almacenar el exceso de energía en el período de tiempo donde la máquina asociada con el dispositivo produce vibraciones, y esta energía se utiliza durante 5 segundos después de que la máquina asociada con el dispositivo ha dejado de producir vibraciones.



Criterio	Batería	Condensador
Carga/Descarga	Lenta	Rápida
Vida útil	Limitada	Larga
Rendimiento	Insuficiente	Bueno
Capacidad energética	Elevada	Baja
Tensión de salida	Estable	Decreciente

Tabla 9 - Diferencias entre una batería y un condensador

En vista del corto tiempo de carga y descarga del dispositivo de almacenamiento, el hecho de que las baterías tengan una vida útil y ciclos de carga limitados y una baja eficiencia de carga/descarga, que sean contaminantes y, sobre todo, que tengan un alto coste, lleva a elegir un condensador en lugar de una batería.

Para el dimensionamiento del condensador tres parámetros son importantes para poder cumplir las necesidades que existen:

Tensión de salida, que debe ser suficiente para que alimente al menos 3 V durante 5s (lo que tarda aproximadamente encender el dispositivo RFDuino y realizar el envío).

En la medida de lo posible se desea evitar las pérdidas.

La tensión no debe descender por debajo de 2,6V durante los 5s.

Para poder suministrar una tensión de 3V, se debe comprobar el comportamiento de descarga de un condensador, dado por la fórmula de la tensión del condensador en función del tiempo:

$$Uc(t) = Ee^{-t/RC} \quad (24)$$

Por lo tanto, para suministrar eficazmente una carga que funciona a una tensión de 3V, el condensador debe proporcionar 3V.

$$Q = C \times \Delta(V) = I \times \Delta(T) \quad (25)$$

Alimentar 3.3V con una corriente de 100 mA durante 5 segundos:



Posibles mejoras del proyecto.

$$C = I \times \Delta(T) / U = 5 \times 0,1 / 3 \quad (26)$$

$$C = 0.167 F$$

Sería necesario, por tanto, utilizar un supercondensador con una capacidad de al menos 0.167F.



Bibliografía

- [1] M. Merry, Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://sciencing.com/environmental-problems-batteries-cause-7584347.html>.
- [2] S. S. Rao, Mechanical Vibrations, Prentice Hall, 2011.
- [3] M. Carbonell, «Universidad Politécnica de Madrid,» 2004. [En línea]. Available: <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/fisica-aplicada-a-la-ingenieria/contenidos/tema-4/VIBRACIONESMECANICAS.pdf> . [Último acceso: Marzo 2019].
- [4] I. Solis Rebollar, «Vibraciones mecánicas,» 2009.
- [5] S. Beeby y N. M. White, Energy harvesting for autonomous systems., Artech House, 2010.
- [6] S. Roundy, P. K. Wright y J. Rabaey, «A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes,» *Computer Communications*, pp. 1131-1144, Julio 2003.
- [7] H. Sodano y S. R. Anton, «A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006),» *Smart Materials and Structures*, 2007.
- [8] Smart Material, [En línea]. Available: http://www.quatek.com.cn/Public/Uploads/uploadfile/files/20180424/20180424164942_5adeefa6d4a45.pdf . [Último acceso: Junio 2019].
- [9] Mouser Electronics Inc., [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/Search/Refine?FS=TRUE&N=21868866+4294629989+4292906361>. [Último acceso: Julio 2019].
- [10] R. M. Pedro, «Bluetooth v4.0: la futura solución inalámbrica de bajo consumo.,» 2011.



- [11] Gobierno de Madrid, 2009. [En línea]. Available: https://www.madrid.es/UnidadWeb/Contenidos/Publicaciones/TemaMedioAmbiente/PlanAccionContaminacionAcustica/TOMO_I_MEMORIA.pdf. [Último acceso: Junio 2019].

- [12] M. H. Rashid, Power Electronics. Circuits, Devices and Applications, Pearson.

- [13] ZETEX Semiconductors, «Schottky bridge rectifier plus freewheel diode,» [En línea]. Available: <http://www.farnell.com/datasheets/43970.pdf>. [Último acceso: Junio 2019].

- [14] Mouser Electronics Inc., [En línea]. Available: https://www.mouser.es/Semiconductors/Discrete-Semiconductors/Diodes-Rectifiers/Schottky-Diodes-Rectifiers/_/N-ax1mj. [Último acceso: Junio 2019].

- [15] Linear Technology, «15V Dual 3A Monolithic Step-Down Regulator,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3634fc.pdf>. [Último acceso: Junio 2019].

- [16] E. Arroyo, «Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes : dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone,» 2012.

- [17] Smart Material, [En línea]. Available: <https://www.smart-material.com/MFC-product-P2.html> . [Último acceso: Marzo 2019].



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

ANEXOS



Balance económico

En cada capítulo se han ido seleccionando una serie de componentes que cumplen las especificaciones técnicas para el correcto funcionamiento de este dispositivo.

En esta parte del capítulo se recapitulan todos los elementos para crear un presupuesto sobre el coste de cada unidad necesaria para crear un prototipo funcional.

Para este prototipo funcional es necesario además de todos los dispositivos que se detallan en la tabla, el circuito interno impreso, también incluido en la tabla, que es donde se van a soldar todos los componentes de adaptación de onda. Y, por último, no está incluido en la tabla, pero también tiene un coste de fabricación y de materiales la estructura metálica.

Elemento	Referencia	Precio
Transductor	Smart Material M 8514 P2	48,00 €
Transformador AC/DC	ZXSBMR16PT8	1,34 €
Transformador DC/DC	LTC3634EFE#PBF	8,17 €
Condensador	DX-5R5H224U	2,92 €
Circuito interno		42,25 €
Sensor	SEN-13314	4,67 €
Microprocesador Bluetooth	& RFDuino RFD22301	16,70 €
TOTAL		170,25 €

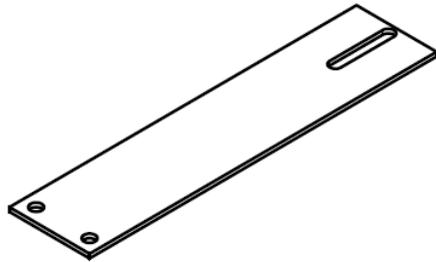
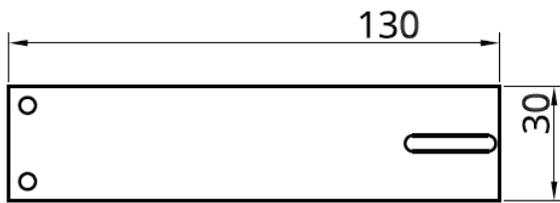
Tabla 10 - Presupuesto del prototipo



Planos

Índice

Plano 1 - Lámina vibrante.....	71
Plano 2 - Estructura metálica.....	7573



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGULAR = ± ° SURFACE FINISH $\sqrt{\quad}$ DO NOT SCALE DRAWING BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS FIRST ANGLE PROJECTION 		NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE LÁMINA VIBRANTE		
	DRAWN	ALFONSO VIJANDE		2019-02-01			
	CHECKED						
	APPROVED				SIZE	DWG. NO.	REV.
	MATERIAL	FINISH		A4			
	ACERO			SCALE	WEIGHT	SHEET	
				1:2		1 of 1	

4

3

2

1

D

D

C

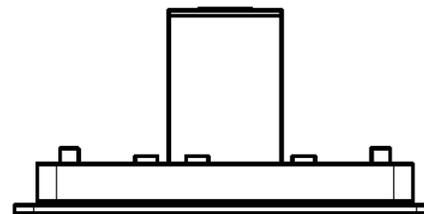
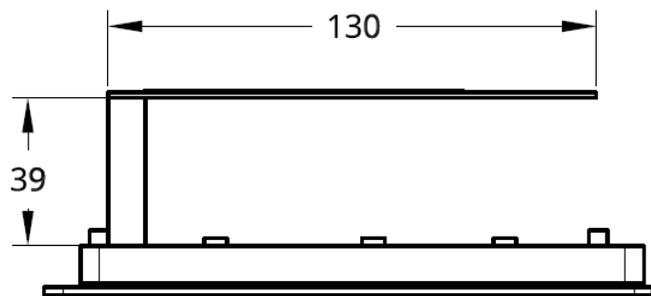
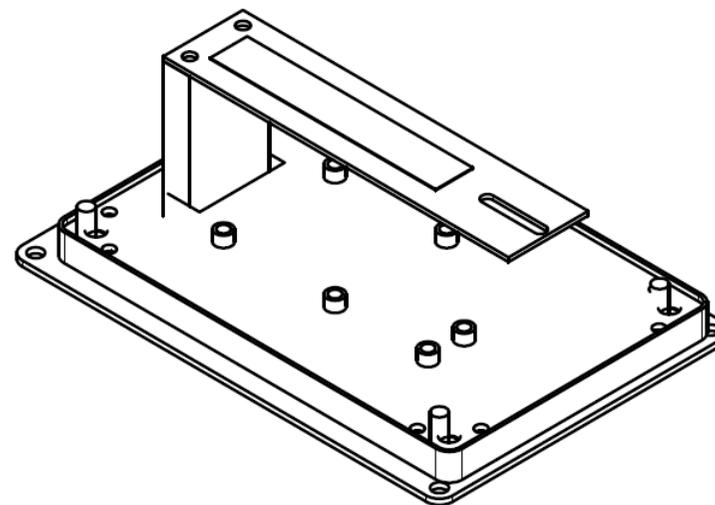
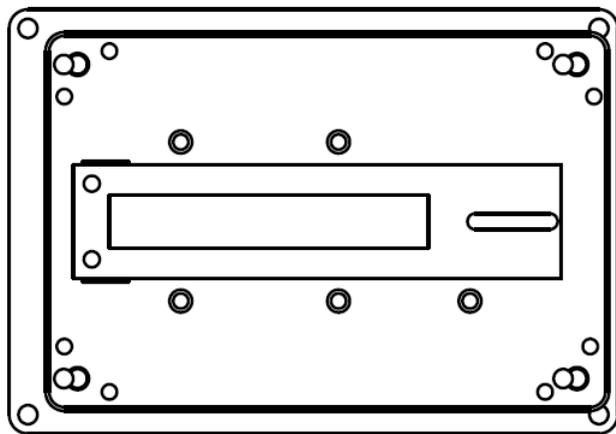
C

B

B

A

A



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS ANGULAR = ±° SURFACE FINISH  DO NOT SCALE DRAWING BREAK ALL SHARP EDGES AND REMOVE BURRS THIRD ANGLE PROJECTION 		NAME	DATE	TITLE <h3 style="text-align: center;">ESTRUCTURA METÁLICA</h3>				
	DRAWN	ALFONSO VIJANDE	07/29/2019					
	CHECKED							
	APPROVED				SIZE	DWG NO.	REV.	
	MATERIAL	FINISH		A4				
	ACERO			SCALE	1:2	WEIGHT	SHEET	1 of 1

4

3

2

1



Datasheets de los dispositivos

Índice

Datasheet 1 - Transformador AC/DC	76
Datasheet 2 - Transformador DC/DC.....	77
Datasheet 3 - Dispositivo RFDuino	78
Datasheet 4 - Sensor SEN-13314	79



NSR2030QMUTAG

2A, 30V Schottky Full Bridge

These full bridge Schottky barrier diodes are designed for the rectification of the high speed signal of wireless charging. The NSR2030QMUTAG has a very low forward voltage that will reduce conduction loss. It is housed in a UDFN 3.5 x 3.5 x 0.5 mm package that is ideal for space constrained wireless applications.

Features

- Extremely Fast Switching Speed
- Low Forward Voltage – 0.54 V (Typ) @ $I_F = 2$ A
- These Devices are Pb-Free, Halogen Free and are RoHS Compliant

Typical Applications

- Low Voltage Full Bridge Rectification & Wireless Charging

MAXIMUM RATINGS ($T_J = 125^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Note 1)

Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	V_R	30	V
Forward Current (DC)	I_F	2.0	A
Forward Current Surge Peak (50 Hz, 1 cycle)	I_{FSM}	12.5	A
Non-Repetitive Peak Forward Current (Square Wave, $T_J = 25^\circ\text{C}$ prior to surge)	I_{FSM}	A	A
$t = 1 \mu\text{s}$		40	
$t = 1 \text{ms}$		10	
$t = 1 \text{s}$		3.0	

Stresses exceeding those listed in the Maximum Ratings table may damage the device. If any of these limits are exceeded, device functionality should not be assumed, damage may occur and reliability may be affected.

1. All specifications pertain to a single diode.

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Total Device Dissipation FR-5 Board $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D (Note 2)	2.08	W
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$ (Note 2)	48	$^\circ\text{C/W}$
Total Device Dissipation FR-5 Board $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D (Note 3)	0.75	W
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$ (Note 3)	7.6	$^\circ\text{C/W}$
Total Device Dissipation FR-5 Board $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D (Note 4)	0.87	W
Thermal Resistance Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$ (Note 4)	8.8	$^\circ\text{C/W}$
Junction Temperature	T_J	114	$^\circ\text{C/W}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	+125	$^\circ\text{C}$
		-55 to +150	$^\circ\text{C}$

2. 4 Layer JEDEC JESD51.7 FR-4 @ 10 mm², 1 oz. copper trace, still air.
3. Single Layer JEDEC JESD51.3 FR-4 @ 100 mm², 1 oz. copper trace, still air.
4. Single Layer JEDEC JESD51.3 FR-4 @ 100 mm², 2 oz. copper trace, still air.



ON Semiconductor®

www.onsemi.com

MARKING DIAGRAM



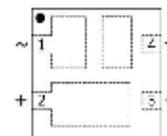
UDFN4 3.5x3.5
CASE 517DA



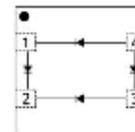
2030 - Specific Device Code
A - Assembly Location
Y - Year
WW - Work Week
• - Pb-Free Package

(Note: Microdot may be in either location)

PIN CONNECTIONS



DEVICE SCHEMATIC



ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping†
NSR2030QMUTAG	UDFN4 (Pb-Free)	3000 / Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specification Brochure, BRD8011/D.



LTC3634

15V Dual 3A Monolithic Step-Down Regulator for DDR Power

FEATURES

- 3.6V to 15V Input Voltage Range
- ±3A Output Current per Channel
- Up to 95% Efficiency
- Selectable 90°/180° Phase Shift Between Channels
- Adjustable Switching Frequency: 500kHz to 4MHz
- $V_{TTR} = V_{DDQ}/2 = V_{TT}$ Reference
- ±1.6% Accurate VTTR at 0.75V
- Optimal V_{OUT} Range: 0.6V to 3V
- ±10mA Buffered Output Supplies V_{REF} Reference Voltage
- Current Mode Operation for Excellent Line and Load Transient Response
- External Clock Synchronization
- Short-Circuit Protected
- Input Overvoltage and Overtemperature Protection
- Power Good Status Outputs
- Available in (4mm × 5mm) QFN-28 and Thermally Enhanced 28-Lead TSSOP Packages

APPLICATIONS

- DDR Memory Power Supplies

LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology, the Linear logo, Burst Mode and PolyPhase are registered trademarks and Hot Swap is a trademark of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners. Protected by U.S. Patents including 5481178, 5847554, 6580258, 6476289, 6774611.

DESCRIPTION

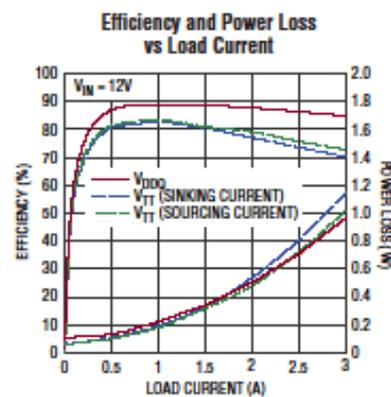
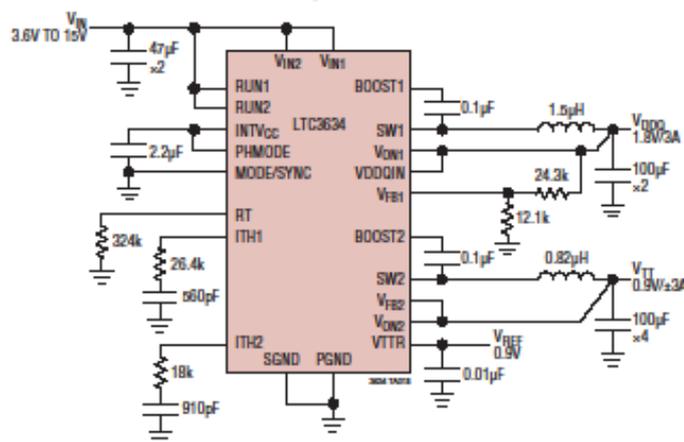
The LTC[®]3634 is a high efficiency, dual-channel monolithic synchronous step-down regulator which provides power supply and bus termination rails for DDR1, DDR2, and DDR3 SDRAM controllers. The operating input voltage range is 3.6V to 15V, making it suitable for point-of-load power supply applications from a 5V or 12V input, as well as various battery powered systems.

The V_{TT} regulated output voltage is equal to $V_{DDQIN} \cdot 0.5$. An on-chip buffer capable of driving a 10mA load provides a low noise reference output (VTTR) also equal to $V_{DDQIN} \cdot 0.5$.

The operating frequency is programmable and synchronizable from 500kHz to 4MHz with an external resistor. The two channels can operate 180° out-of-phase, which relaxes the requirements for input and output capacitance. The unique controlled on-time architecture is ideal for powering DDR applications from a 12V supply at high switching frequencies, allowing the use of smaller external components.

The LTC3634 is offered in both 28-pin 4mm × 5mm QFN and 28-pin exposed pad TSSOP packages.

TYPICAL APPLICATION



For more information www.linear.com/LTC3634

3634tc

1



© Copyright, RFduino.com
12/5/2013 12:18 PM

RFD22301, RFD22102
CE • ETSI • IC • FCC
Approved & Certified

RFduino
www.RFduino.com • sales@RFduino.com
1601 Pacific Coast Hwy • Suite 290
Hermosa Beach • CA • 90254
Tel: 949.610.0008

Based On
RFD22301
RF Digital
RF Module



DATASHEET

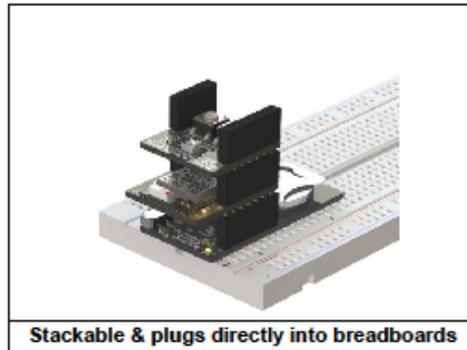
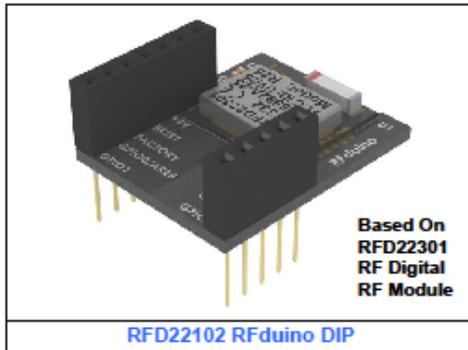
RFD22102 RFduino DIP

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| RFD22121 USB Shield | RFD22126 Dual AAA Battery Shield |
| RFD22122 RGB LED / Button Shield | RFD22127 Single AAA Battery Shield |
| RFD22123 Servo Shield | RFD22128 CR2032 Battery Shield |
| RFD22124 PCB USB Shield | RFD22130 MicroSD Shield |
| RFD22125 Proto Shield | RFD22131 Dual Relay Shield |

RFD90101, RFD90102, RFD90103, RFD90104, RFD90105 Eval / Dev Kits

An RFduino "Shield" is a modular accessory that directly plugs into the RFduino.

**Shrunk an Arduino to the size of a finger-tip
and made it Wireless!**



**RFduino is a Bluetooth 4.0 Low Energy BLE RF Module
with Built-In ARM Cortex M0 Microcontroller
for Rapid Development and Prototyping Projects**

**Simple to use Arduino IDE and sketches
running on professional grade hardware**

Manufactured by RF Digital Corp. - Support: support@RFduino.com or <http://forum.rfduino.com/> 1



TMP102

www.ti.com

SBO6397B—AUGUST 2007—REVISED OCTOBER 2008

Low Power Digital Temperature Sensor With SMBus™/Two-Wire Serial Interface in SOT563

FEATURES

- TINY SOT563 PACKAGE
- ACCURACY: 0.5°C (–25°C to +85°C)
- LOW QUIESCENT CURRENT:
10µA Active (max)
1µA Shutdown (max)
- SUPPLY RANGE: 1.4V to 3.6V
- RESOLUTION: 12 Bits
- DIGITAL OUTPUT: Two-Wire Serial Interface

APPLICATIONS

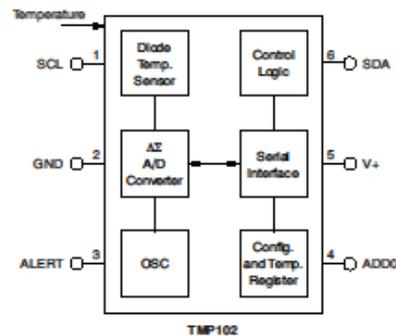
- PORTABLE AND BATTERY-POWERED APPLICATIONS
- POWER-SUPPLY TEMPERATURE MONITORING
- COMPUTER PERIPHERAL THERMAL PROTECTION
- NOTEBOOK COMPUTERS
- BATTERY MANAGEMENT
- OFFICE MACHINES
- THERMOSTAT CONTROLS
- ELECTROMECHANICAL DEVICE TEMPERATURES
- GENERAL TEMPERATURE MEASUREMENTS:
Industrial Controls
Test Equipment
Medical Instrumentations

DESCRIPTION

The TMP102 is a two-wire, serial output temperature sensor available in a tiny SOT563 package. Requiring no external components, the TMP102 is capable of reading temperatures to a resolution of 0.0625°C.

The TMP102 features SMBus and two-wire interface compatibility, and allows up to four devices on one bus. It also features an SMB alert function.

The TMP102 is ideal for extended temperature measurement in a variety of communication, computer, consumer, environmental, industrial, and instrumentation applications. The device is specified for operation over a temperature range of –40°C to +125°C.



Please be aware that an Important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

SMBus is a trademark of Intel, Inc.

All other trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2007–2008, Texas Instruments Incorporated



Código Arduino

```
#include <RFduinoBLE.h>
#include <EEPROM.h>
#include <Wire.h>
int address=0;
void setup()
{
  RFduinoBLE.advertisementData = "temp";
  Wire.begin();
  Wire.beginOnPins(2, 3); // Starts the I2C interface with SCL on GPIO 2 and SDA on GPIO 3
  RFduinoBLE.begin();
  // processing handled by exiting RFduino_ULPDelay
  pinMode(5, INPUT); // set pin 5 to input
  RFduino_pinWake(5, LOW); // configures pin 5 to wake up device on a high signal
}
double sensorRead(void){
  //temp holds the two bytes of data read back from the TMP102
  uint8_t temp[2];

  //tempc holds the modified combination of bytes
  int16_t tempc;

  //Point to device 0x48
  Wire.beginTransmission(0x48);
  //Point to register 0x00 (Temperature Register)
  Wire.write(0x00);
  //Relinquish máster control of I2C line
  Wire.endTransmission();
  //delay to allow for sufficient conversion time
  delay(10);

  //Request temperature data
  Wire.requestFrom(0x48, 2);

  //if the two bytes are sucessfully returned
  if (2 <= Wire.available())
  {
    //read out the data
    temp[0] = Wire.read();
    temp[1] = Wire.read();

    //ignore the lower 4 bits of byte 2
    temp[1] = temp[1] >> 4;
    //combine to make one 12 bit binary number
    tempc = ((temp[0] << 4) | temp[1]);

    //Convert to celcius (0.0625C resolution) and return
    return tempc*0.0625;
  }
}
```



```
void loop()
{
  double temperature = sensorRead();

  //call the sensorRead function to retrieve the temperature
  EEPROM.write(address, temperature/4); // stockage en EEPROM

  address++;
  if (address == EEPROM.length()) {
    address = 0;
  }
  RFDuinoBLE.sendFloat(temperature);

  if (RFDuino_pinWoke(5)){
    RFDuino_ULPDelay(SECONDS(60));

    RFDuino_systemOff();
    RFDuino_resetPinWake(5);
  }
}
```