

Instrumento Electrónico de Telemetría para Análisis Estructural por Ultrasonidos

PROYECTO DE FIN DE ESTUDIOS

I INTRODUCCION.....	3
II MEMORIA JUSTIFICATIVA	3
III RECORDATORIO DEL CUADERNO DE TAREAS	4
IV DESCRIPCION DEL TRABAJO	6
1. Principio.....	7
2. Disposición de los parches.....	9
3. Principio del esquema eléctrico.....	9
V ANALISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL	10
1. Modo de funcionamiento.....	10
2. Gestión de la secuencia.....	11
3. Onda de Lamb.....	14
4. UHF	14
5. Recepción	15
VI RESULTADOS	15
A. Viga	16
1. Primera viga.....	16
2. Segunda viga.....	19
3. Tabla resumen de los valores de los componentes	21
B Onda de Lamb.....	21
C Transmisión UHF.....	22
D Almacenamiento de la energía.....	23
VII MODO DE EMPLEO	24
A. Soporte.....	24
B. Tarjeta de recuperación	26
C. Tarjeta microcontrolador	28
1. Programación del PIC.....	28
D. Tarjeta de conmutación	29
1. Conmutación individual.....	30
2. Conmutación global.....	32
3. Parches piezoeléctricos dedicados.....	33
E. Receptor piezoeléctrico	34
F. Receptor UHF.....	35
VIII CONCLUSION.....	36
IX ANEXOS.....	37
PROGRAMACION DEL PIC.....	37

I INTRODUCCION

El objetivo de este proyecto final de estudios es desarrollar un instrumento electrónico de telemetría para análisis estructural mediante ultrasonidos. En otras palabras, crear un instrumento que permita, sin utilizar fuentes de energía exteriores, analizar la integridad estructural de una pieza (fisuras o posibles defectos) mediante ultrasonidos.

Un ejemplo práctico en la vida industrial podría ser el análisis de la integridad estructural de las alas de un avión. Así, podríamos recuperar la energía del movimiento de las alas del avión para analizar el estado de las mismas (roturas, defectos, ...).

En el laboratorio se han simulado las alas del avión con una viga hecha en fibra de vidrio. Se ha estudiado la idea de la conversión piezoeléctrica (efecto piezoeléctrico directo), que permite transformar la energía mecánica del movimiento de la viga (motor lineal) en energía eléctrica, gracias a unos parches piezoeléctricos (transformador piezoeléctrico) pegados en la superficie de la estructura.

En el proceso de recuperación de energía se ha empleado una técnica llamada SSHI (Synchronised Switch Harvesting on Inductance). Esta técnica consiste en cortocircuitar el parche piezoeléctrico cada vez que la tensión en sus bornas pase por un máximo. Se aumenta de esta manera la diferencia de potencial creada en bornas del parche y por tanto la cantidad de energía recuperada.

Esta energía recuperada por el instrumento sirve para efectuar tres tareas : enviar unas ondas ultrasónicas de superficie (ondas de Lamb), realizar un proceso de datos y hacer una telemetría mediante un canal UHF.

II MEMORIA JUSTIFICATIVA

El proyecto ha sido propuesto por el Laboratorio LGEF del departamento de ingeniería electrónica de la universidad del INSA de Lyon (Francia), que como todos los años propone una serie de proyectos final de carrera para aquellos alumnos que finalizan sus estudios universitarios. La idea es crear una fuente de energía, basada en el principio de la piezoelectricidad, que permita realizar un sistema de medida para determinar la integridad estructural de una pieza (viga en fibra de vidrio).

Este trabajo será útil al laboratorio GEMPPM que podrá a continuación implantar el instrumento electrónico de telemedida sobre unas estructuras vibrantes. Elegí este proyecto porque consiste en el desarrollo de un sistema de telemedida.

El proyecto se ha desarrollado en los locales del laboratorio LGEF del departamento de ingeniería eléctrica en la tercera planta del edificio Gustave Ferrié. De esta forma he podido estar cerca de los tutores de este proyecto, Don Lionel Petit y Don Elie Lefeuvre, con los que he tenido un trato casi diario del comienzo hasta el final del mismo.

III RECORDATORIO DEL CUADERNO DE TAREAS

Como ya se ha dicho en la introducción, el objetivo del proyecto es desarrollar un sistema que analice la integridad estructural de una pieza. En este proyecto la pieza ha sido una viga hecha de fibra de vidrio.

Se ha creado una fuente de alimentación de continua partiendo de la idea de la conversión piezoeléctrica (efecto piezoeléctrico directo). Se ha hecho vibrar la viga con la ayuda de un electroimán (motor lineal magnético) y a continuación se ha transformado esta energía mecánica en energía eléctrica gracias a unos insertos piezoeléctricos (transformador piezoeléctrico). En la primera parte del proyecto, se ha recuperado la mayor cantidad de energía posible para poder alimentar una serie de elementos electrónicos (microprocesador, transmisor UHF) que han permitido realizar el análisis de la integridad estructural de la viga.

La primera aplicación ha sido situar los insertos piezoeléctricos sobre una viga fijada de un extremo y puesta en vibración. Para eso ha habido que pegar estos insertos en aquellos lugares que optimizaran la recuperación de energía. Se ha tenido que concebir igualmente un soporte que ha realizado la función de fijación de la viga así como de sistema de vibración artificial (motor lineal). Desde el punto de vista electrónico, se ha realizado la tarjeta de recuperación de energía que ha recuperado suficiente como para poder construir nuestro sistema de medida. Este sistema de medida, que determina la integridad estructural de la viga, se basa en la emisión de :

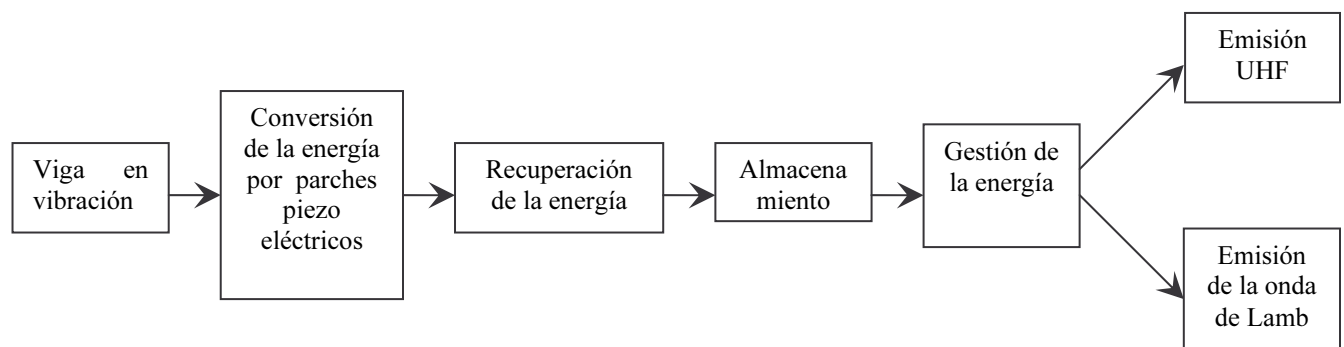
- Una onda de LAMB a partir de un parche piezoeléctrico (efecto piezoeléctrico inverso).
- Un mensaje por UHF que identifique cuál ha sido el parche utilizado en la emisión de la onda de Lamb.

En recepción se ha situado un receptor UHF y un nuevo parche piezoeléctrico. El receptor UHF interpreta las emisiones del transmisor UHF con lo que es posible conocer el parche que ha emitido la onda de Lamb. Por otra parte, el nuevo parche piezoeléctrico, situado en el otro extremo de la viga, actúa como sensor de las ondas de Lamb. Posteriormente el laboratorio GEMPPM, otro laboratorio del departamento de ingeniería electrónica de la universidad de Lyon, se encargará de realizar un tratamiento más en profundidad de las señales recibidas.

Ahora bien, para que todas las tareas del proyecto se realicen en orden, se ha introducido un elemento inteligente en el sistema : un microprocesador digital de bajo consumo. Este PIC se alimenta de la energía recuperada de las vibraciones de la viga. En

primer lugar ordena la emisión UHF por su puerto serie. Y luego provoca la emisión de las ondas de Lamb enviando una señal cuadrada por uno de sus diferentes pines de salida.

El diagrama de bloques de las principales tareas a efectuar es el siguiente :



Se puede ver así cada parte de manera específica y relativamente autónoma del resto.

Se han utilizado 5 parches piezoeléctricos a lo largo del proyecto. Estos parches tienen la capacidad de actuar como sensores o generadores de ondas dependiendo del uso que se quiera hacer de ellos. 4 de ellos se han situado en uno de los extremos de la viga, próximos a la fijación de la estructura. Su misión ha sido doble : recuperar energía eléctrica (efecto piezoeléctrico directo) y generar las ondas de Lamb (efecto piezoeléctrico inverso). El otro parche se sitúa en el otro extremo de la viga y actúa como sensor, permitiendo recuperar las ondas de Lamb enviadas.

Para controlar el momento en el que los parches piezoeléctricos pasen de recuperar energía a emitir las ondas de Lamb o viceversa, se ha construido un circuito de conmutación. Este circuito tiene dos modos posibles de funcionamiento, individual o global, que se explicarán más adelante.

Debido a problemas con el circuito de conmutación, se decidió optar por una solución de parches dedicados, repartiendo los parches piezoeléctricos en dos grupos : dos parches para la recuperación de energía y otros dos para la transmisión de ondas Lamb. No ha habido por tanto necesidad de conmutar. Esta ha sido la solución definitiva.

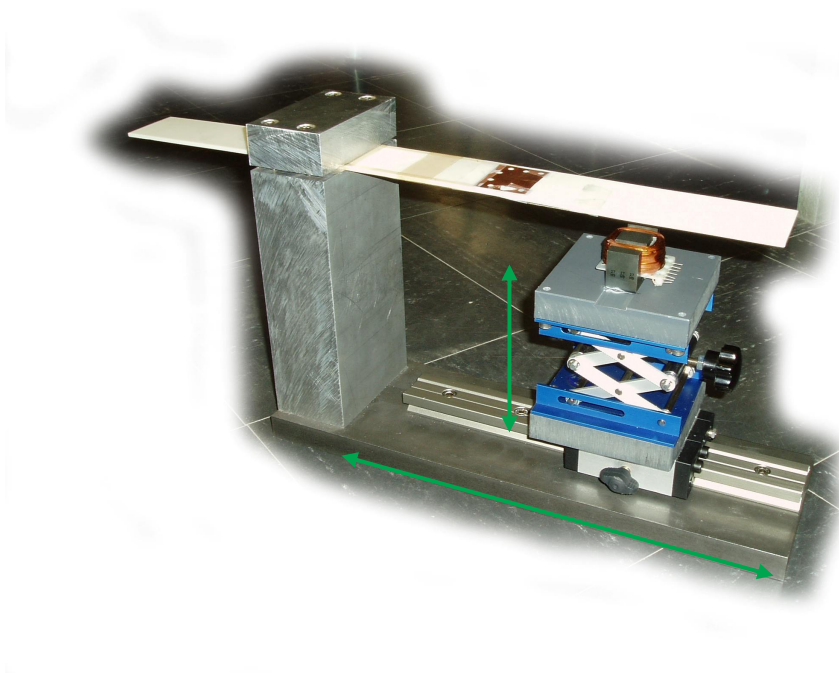
IV DESCRIPCION DEL TRABAJO

A Soporte

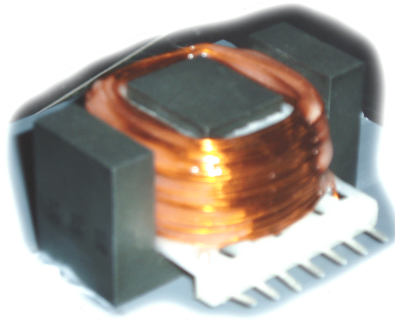
Para hacer vibrar la viga hay que fijarla de uno de sus extremos. Para que quede perfectamente fijada el soporte debe permanecer estable a pesar de las oscilaciones de la viga. Para ello se ha construido un soporte masivo con una base de acero. El peso del soporte es de aproximadamente 10 kilogramos.

Para hacer vibrar la viga es necesario poder situar el electroimán debajo de la viga y con dos grados de libertad (longitudinal y vertical).

El posicionamiento longitudinal se realiza con la ayuda de una guía y el posicionamiento vertical se realiza con un plato elevador. Gracias a este sistema se puede situar el electroimán en todos los lugares que interesan y de una manera muy precisa.



El electroimán está realizado por bobinado alrededor de un nudo de ferrita en forma de E. El nudo está dimensionado de manera que presente un magnetismo suficiente para la aplicación. La corriente máxima admisible por la bobina es de unos 2A.



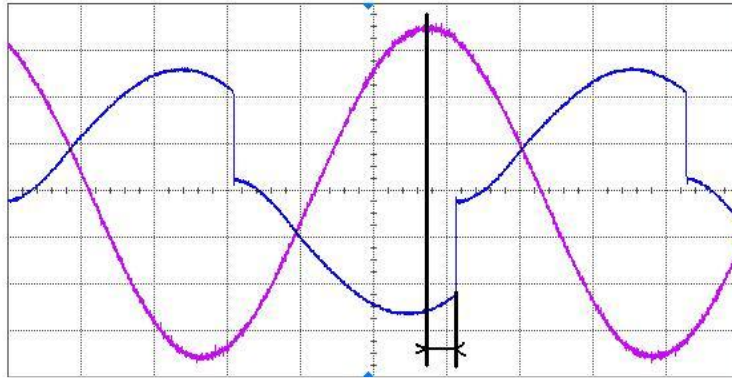
B Recuperación

Una estructura en vibración, aquí simulada por la viga, constituye una fuente de energía mecánica inutilizada. El primer objetivo de este proyecto es recuperar la mayor cantidad de energía posible de las vibraciones de la viga. Veamos como se ha realizado esta recuperación de energía.

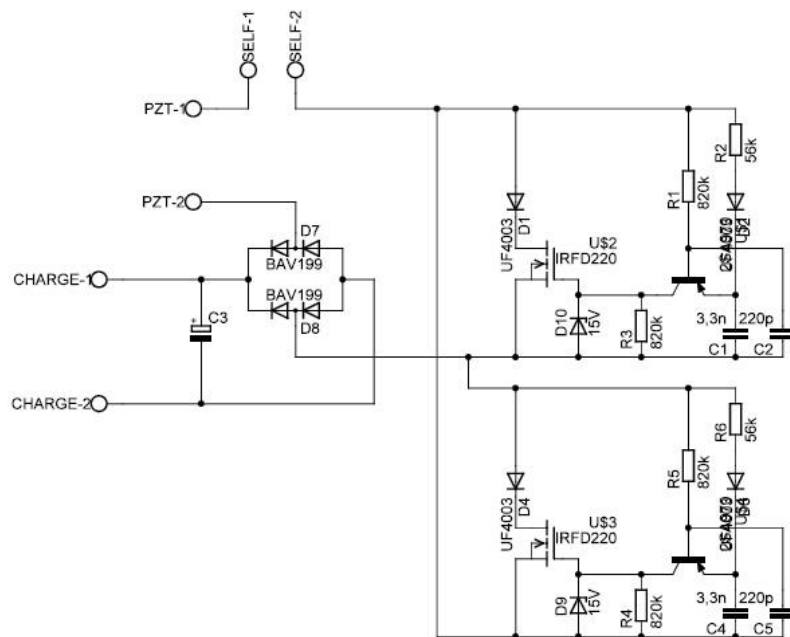
1. Principio

La primera etapa de la recuperación de energía es la conversión de la energía mecánica en energía eléctrica. Esta conversión se realiza por medio de parches piezoeléctricos (efecto piezoeléctrico directo) estratégicamente situados sobre la viga. Estos parches piezoeléctricos, hechos de cerámica, tienen la particularidad de polarizarse eléctricamente bajo la acción de una fuerza mecánica (en nuestro caso las vibraciones de la viga). Este principio es el llamado principio de la piezoelectricidad.

Una vez recuperada la energía eléctrica habrá que utilizarla o almacenarla. La idea más simple sería conectar una carga en bornas de los parches piezoeléctricos. Pero desgraciadamente la cantidad de energía recuperada sería mucho más pequeña. Se ha utilizado por tanto otra técnica distinta: la SSHI. Esta consiste en cortocircuitar el parche piezoeléctrico cada vez que la tensión sus bornas pase por un máximo. Se aumenta de esta manera la diferencia de potencial creada en bornas del parche y por tanto la cantidad de energía recuperada. Se ha incluido además una inductancia en serie. Esta inductancia crea una sobretensión durante cada conmutación aumentando así la diferencia de potencial creada. En la siguiente figura vemos en rosa la tensión de la viga puesta en vibración y en azul la tensión en bornas del parche piezoeléctrico.



A continuación se muestra el esquema de recuperación de energía basado en la técnica SSHI (Synchronised Switch Harvesting on inductance).



2. Disposición de los parches

Con el fin de recuperar la mayor cantidad de energía posible, es importante situar los insertos piezoeléctricos en aquellos lugares donde las presiones sean máximas. En el caso de una viga fijada en un extremo la zona que presenta el máximo de presión es aquella donde el desplazamiento es menor, es decir, lo más cerca posible de la zona de fijación.



3. Principio del esquema eléctrico

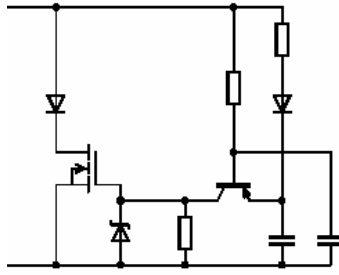
El principio del SSHI, como ya se ha explicado, consiste a cortocircuitar el parche piezoeléctrico cuando la tensión en sus bornas pase por un máximo. Hemos de distinguir por lo tanto dos partes en el esquema eléctrico : la detección del máximo y la conmutación.

La detección del máximo se realiza por comparación de la señal entre dos instantes. Hay que comparar la misma señal pero en dos momentos distintos. Basta con retrasar la señal y compararla con ella misma. Para intentar comprender esto un poco mejor vamos a llamar señal 1 a la señal en el momento presente y señal 2 a la señal retrasada.

Si la señal 1 es mayor que la señal 2, significa que el valor actual de señal es más fuerte que el de un instante anterior. Esto quiere decir que la onda está creciendo. Si al contrario la señal 2 es más fuerte que la señal 1, la onda está decreciendo y esto implica que estamos en un máximo.

El retraso de señal se hace con un simple circuito RC en el que hay que ajustar la constante de tiempo a su valor más pequeño posible con el fin de detectar más rápidamente los máximos.

La conmutación se realiza con un transistor MOSFET cuya entrada (gate) está accionada por la salida del comparador.



Teniendo en cuenta que la tensión en bornas de los insertos piezoeléctricos es sinusoidal hay que hacer un doble montaje. Uno para las alternancias positivas y otro para las negativas.

Con este sistema todo está listo para recuperar el máximo de energía. Sólo queda describir la parte de recuperación propiamente dicha. Después del paso a través de un puente de Graetz, la corriente carga un condensador. El puente de Graetz está realizado de diodos Schottky con el fin de presentar la más baja caída de tensión posible. (Ver figura página 7).

V ANALISIS DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

La energía recuperada va a servir de alimentación a un sistema de análisis de la integridad estructural de la viga. Se podrá así localizar defectos eventuales o puntos más desgastados de la viga.

1. Modo de funcionamiento

El análisis de la integridad estructural de la viga se realiza con la ayuda de unas ondas de superficie llamadas ondas de Lamb. Así, una onda de superficie es enviada de uno de los extremos de la viga transmitiéndose a lo largo de la misma. Seguidamente será recuperada en el otro extremo. La velocidad de propagación de la onda así como su deformación dependerá directamente de un eventual defecto en la estructura. Un sistema de tratamiento de señal permitirá definir la naturaleza, la talla y el lugar del defecto.

Para localizar con precisión un defecto en la viga, se han situado 4 parches piezoeléctricos que emiten unas ondas de Lamb cada uno a su turno. Si el receptor sabe cual ha sido el parche que ha emitido será posible conocer la posición del defecto en la viga. Hay que integrar la identificación del parche emisor a nuestro sistema.

Cuando se haya recuperado suficiente energía habrá que enviar una trama radio. Esta trama contiene un código de 8 bits que identifica cuál es el parche piezoeléctrico que va a

emitir la onda de Lamb. Después del envío del identificador, una onda de Lamb será generada por el parche asociado a dicho identificador.

En un principio se han utilizado los mismos parches para la recuperación de energía que para el envío de la onda de Lamb. Se ha creado por tanto un sistema para desconectar momentáneamente el parche del sistema de recuperación de energía el tiempo de una emisión de Lamb. (Más tarde, debido a que no se ha conseguido realizar esta conmutación recuperación-emisión, se han utilizado dos parches para la recuperación de energía y otros dos para la transmisión de la onda de Lamb sin necesidad de conmutar).

Toda la parte que compone la emisión de la onda de Lamb, la emisión UHF así como la gestión de la secuencia es totalmente autónoma. Todo esto es posible gracias a la energía recuperada de las vibraciones de la viga. La parte recepción y tratamiento de señal es alimentada por una fuente de energía exterior.

2. Gestión de la secuencia

Las acciones a realizar con la energía recuperada son multiples. Hay que generar un código de 8 bits asociado a cada uno de los cuatro parches piezoeléctricos y después generar una onda de Lamb sobre el parche en cuestión. Hay que conseguir además que los cuatro parches emitan uno detrás de otro con una temporización entre cada emisión. Todo esto es demasiado complejo para realizarlo a partir de electrónica analógica. Por ello, y para poder realizar todas estas tareas de manera efectiva, se introdujo un nuevo elemento en el proyecto : un microprocesador digital de bajo consumo.

Desde hace poco tiempo la sociedad Microchip desarrolla microcontroladores a muy bajo consumo. Entre la gama de controladores de Microchip los hay que se alimentan a 2V y cuyo consumo puede descender hasta 1nA.

Se ha buscado un PIC que reuniera todas las características que hacen falta. Las cuales son :

- Un consumo mínimo
- un modo sleep
- un puerto serie un CAN
- suficientes puertos de entrada y salida

El modo sleep es utilizado entre dos emisiones con el objetivo de consumir lo menos posible sin con ello interrumpir la secuencia.

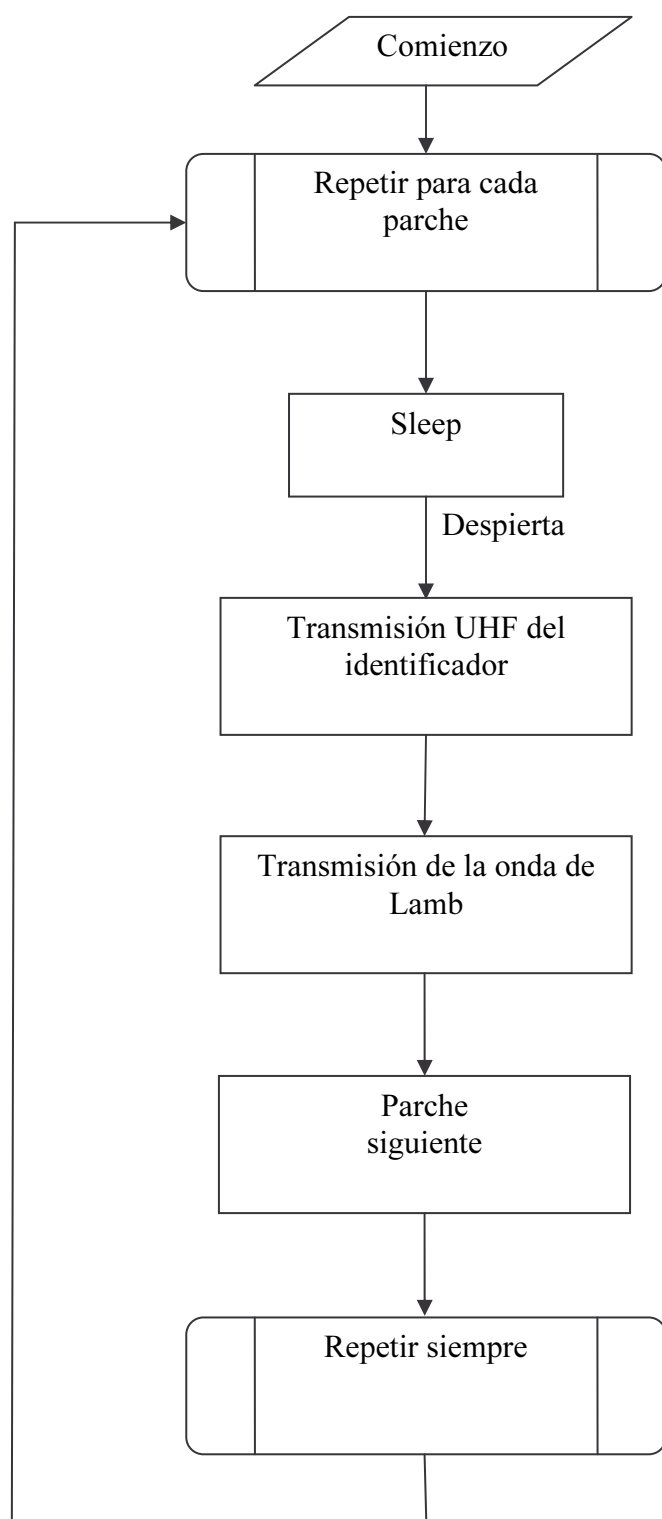
El puerto serie es utilizado para transmitir el identificador del parche al transmisor UHF. El PIC integra este tipo de puertos y permite así transmitir un octeto a la velocidad deseada. El genera igualmente el bit de start y de stop.

El convertidor analógico digital sirve a vigilar el nivel de tensión presente en bornas de la capacidad. Si el condensador presenta una carga muy baja, es inútil de lanzar una emisión pues ésta podría ser interrumpida por falta de alimentación. El PIC se pone en modo sleep hasta que vuelva a ser despertado cuando haya de nuevo una tensión de alimentación suficiente.

Hacen falta igualmente varios puertos de entrada y salida para poder dirigir las diferentes partes del montage. Hará falta una salida para dirigir la alimentación del transmisor UHF, ya que no merece la pena alimentarlo todo el tiempo. Otra salida para conmutar los parches piezoeléctricos para que formen parte del circuito de recuperación de energía o del circuito de emisión de onda de Lamb. Y finalmente otra salida será necesaria para cada parche piezoeléctrico para que pueda tener lugar la transmisión de las ondas de Lamb. Se necesitan por lo tanto un total de 6 puertos de entrada y salida.

Se ha elegido el microcontrolador PIC 16F688 pues reúne todas las condiciones requeridas.

He aquí el organigrama del programa a efectuar.



Hay que programar el microcontrolador teniendo siempre en cuenta que hay que economizar el máximo posible de energía. Hay que intentar desactivar todas las salidas inútiles y no utilizar ningún tipo de contadores o de periféricos. Así mismo hay que poner en modo Sleep el PIC con objeto de realizar una temporización.

3. Onda de Lamb

Las ondas de Lamb son unas ondas acústicas que se propagan en medios de poco grosor.

El experimento consiste en colocar el transmisor y el receptor en las extremidades de la viga.

Las ondas de Lamb son sensibles a al menos dos efectos macroscópicos de la corrosión : la pérdida de materia y la modificación del estado de la superficie. Este último es el que interesa y sobre el cual se trabajará.

El receptor está constituido por un pequeño parche piezoeléctrico pegado al final de la viga. En un principio se conectó a un osciloscopio para poder ver la forma de señal recibida. El objetivo final es el de conectar en un futuro el receptor a un sistema de tratamiento de señales que pueda llevar a cabo el análisis de los eventuales defectos de la viga.

En cuanto a la transmisión, se han utilizado cuatro parches con el fin de cubrir todo el ancho de la viga. Cada parche emitirá a su turno. Teniendo en cuenta que se habían pegado cuatro parches para recuperar la energía, se aprovecharán estos mismos parches para realizar la emisión. (Esta fue la primera idea, más tarde, viendo que el sistema no funcionaba, se utilizaron dos parches para la recuperación de energía y dos parches para la transmisión de las ondas de Lamb).

Se ha introducido en serie un sistema de conmutación que permite ligar los parches a la tarjeta de recuperación de energía o a la tarjeta de transmisión.

Para determinar la naturaleza de la señal a emitir se realizaron una serie de ensayos con personas del laboratorio de GEMPPM con objeto de determinar la forma de la onda, la frecuencia y la amplitud que mejor se adaptaran al proyecto. Se encontraron los siguientes resultados : una señal cuadrada de 5 voltios de amplitud durante 125 μ s y 0 voltios de amplitud durante 10ms. Esta impulsión será repetida 5 veces.

4. UHF

Es importante emitir un mensaje por UHF antes de comenzar la transmisión de una onda de Lamb. Este mensaje tiene dos funciones: sirve para señalar al receptor que una onda va a ser enviada y con ello que el receptor se ponga en modo recepción, y lo más importante, sirve para enviar el identificador que informa sobre cual de los cuatro parches piezoeléctricos va a transmitir. El mensaje enviado será de un octeto. Habrá en total cuatro octetos, uno por cada inserto piezoeléctrico.

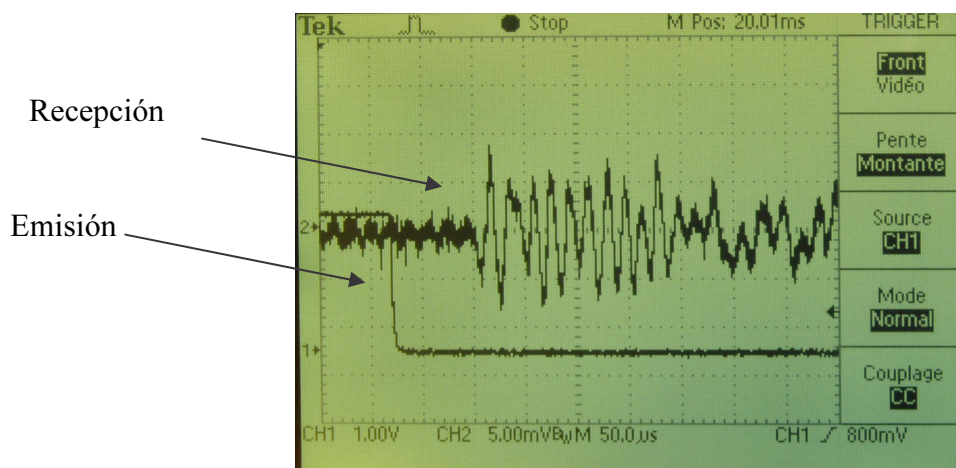
Gracias al microcontrolador se pueden generar estos mensajes de 8 bits y enviarlos en serie a un transmisor UHF estandar. El transmisor utilizado es el transmisor digital de bajo consumo Aurel TX-4MDIL. Su tensión de alimentación está entre 3 y 5 voltios y consume

una corriente de 3 a 6 mA. El envío de estos mensajes de 8 bits, que se han llamado identificadores se hace a una velocidad de 4800 baudios y utiliza una modulación en amplitud con una portadora a 433,92 MHz.

Con objetivo de limitar el consumo del transmisor, éste se alimentará únicamente en las fases de transmisión. La gestión de alimentación del transmisor está dirigida por el PIC.

5. Recepción

Para poder recuperar las emisiones de las ondas de Lamb de los diferentes parches piezoeléctricos, se ha implantado otro parche, a modo de sensor, en el otro extremo de la viga. Este último mide 2 cm de largo por 1 cm de ancho. Está conectado a un filtro paso alto que elimina las bajas frecuencias parásitas. Durante este proyecto se utilizará un osciloscopio para observar la señal recibida, más adelante será remplazado por un sistema de tratamiento de señal que informará sobre la integridad estructural de la viga.



Onda de Lamb en recepción

VI RESULTADOS

A. Viga

En esta parte se van a tratar los diferentes ensayos y medidas realizadas en el laboratorio LGEF. Estos aportan unos resultados numéricos que permiten caracterizar el sistema.

En principio se utilizó una viga, que podríamos llamar de ensayo, con su correspondiente circuito de recuperación de energía. Después se ha trabajado con otra viga con unos insertos piezoeléctricos mejor adaptados y sobre la cual se han encontrado evidentemente unos resultados más satisfactorios.

Entre las diferentes medidas realizadas, he aquí las más significativas:

- Frecuencias de resonancia (fundamentales + armónicos). Tanto para la primera como para la segunda viga.
- Coeficiente de acoplamiento (k). Según la fórmula $k^2 = 1 - \left(\frac{f_{s1}}{f_{s2}} \right)^2$ donde f_{s1} es la frecuencia de resonancia de la viga con los parches en corto-circuito y f_{s2} es la frecuencia de resonancia de la viga con los parches en circuito abierto.
- Tensión obtenida en bornas de los parches piezoeléctricos.
- Energía recuperada en los circuitos de recuperación de energía y mejora de estos circuitos.

1. Primera viga

Buscando que la recuperación de energía sea óptima, es necesario que la viga y los parches tengan los mismos coeficientes de rigidez a la flexión. Es necesario conocer por tanto todas las características de la viga así como las de los insertos piezoeléctricos.

La primera viga está hecha de fibra de vidrio y tiene una dimensión de 500x50x3mm. Se la ha hecho vibrar sobre una longitud de 300mm, el resto queda a la izquierda de la fijación.

Al no haber dispuesto de todas las informaciones sobre las características de la viga ha sido imposible determinar las dimensiones de los insertos piezoeléctricos y la única manera de conocerlas ha sido a base de ensayos en el laboratorio.

En un principio se utilizaron unos parches de 1.3mm de espesor pegados muy cerca de la fijación de la viga (allí donde la presión es máxima).

He aquí los diferentes valores de frecuencias de resonancia de la primera viga obtenidos :

Orden	0	1	2	3	4
Frecuencia (Hz)	8,1	16,4	23,5	46,3	94,6
Amplitud pico a pico (Volts)	36,2	6,5	0,55	6,64	1,10

Después se realizó un intento de medir el coeficiente de acoplamiento entre la viga y los insertos que sirve para saber si el rendimiento energético es bueno. No se ha podido determinar este coeficiente pues las frecuencias de resonancia y de antiresonancia estaban tan próximas que no se ha conseguido distinguirlas. Esto quiere decir que el coeficiente de acoplamiento es casi nulo. Esto hecho se debe a que la viga es muy flexible y que los parches son demasiado gruesos para deformarse con la viga.

Otra medida realizada ha sido la tensión en bornas de los insertos piezoeléctricos. Como indica el principio SSHI hay que poner una bobina en serie con los parches piezoeléctricos. Teniendo en cuenta que los parches tienen una naturaleza capacitiva, se forma de esta manera un circuito oscilatorio LC que produce una sobretensión durante la conmutación del circuito de recuperación de energía. Cuanto más importante sea esta sobre tensión mejor va a ser la recuperación de energía.

Se ha elegido de manera experimental la inductancia que ofrecía los mejores resultados.

Esta es la gráfica en bornas de los parches piezoeléctricos con una bobina de 10 mH en el circuito de recuperación de energía (gráfica en amarillo) :



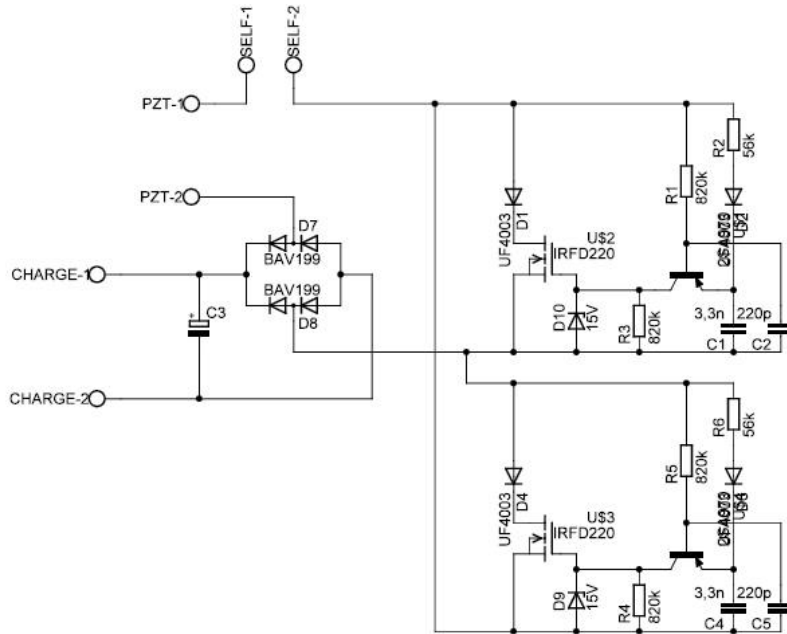
a continuación la misma gráfica pero con una bobina de 250 mH :



Se puede ver que la pendiente, cuando conmuta en un máximo, es ligeramente menos pronunciada.

La elección final ha sido la de una bobina de 10 mH con unos insertos de 1,3 mm pues se produce una sobretensión superior.

Seguidamente el circuito de recuperación de energía basado en la técnica SSHI (Synchronised Switch Harvesting on Inductance)



No se han buscado otros esquemas eléctricos alternativos a éste pues esta técnica ya ha habido sido estudiada y mejorada en el seno del laboratorio. Sólo ha hecho falta dimensionar correctamente los valores de los componentes del circuito.

El objetivo del circuito electrónico es cortocircuitar el parche piezoeléctrico cuando la tensión en sus bornas pase por un máximo. Es importante conmutar en los máximos para poder tener una recuperación de energía óptima.

Los valores de los componentes se han escogido después de realizar diferentes pruebas. En primer lugar se ha ensayado con condensadores de distintos valores. Se ha utilizado un condensador de 3,3nF en paralelo con C1 para llegar hasta 4,4nF. Se ha obtenido también un valor óptimo de la resistencia R2 de 8,4 k Ω . Los cambios han sido realizados tanto en la parte positiva como en la parte negativa del circuito, es decir, el valor de la resistencia R6 es de 8,4k Ω y el valor de la capacidad C4 es de 4,4nF. Gracias a estos cambios se consigue llegar a cargar el condensador de almacenamiento C3 de valor 470 μ F hasta una tensión de 10V en 5 minutos aproximadamente. De la misma forma se vio que se pueden quitar los condensadores C2 y C5 sin ningún tipo de consecuencias negativas para la recuperación de energía.

2. Segunda viga

Para la primera viga el grosor de los insertos (1,3 mm) no estaba adaptado a la viga. Los parches eran, por así decir, más rígidos que la viga. Para esta segunda viga se han utilizado unos parches piezoeléctricos más flexibles (0,3 mm) con lo que se ha conseguido

mejorar el coeficiente de acoplamiento así como recuperar la energía mucho más rápidamente.

Los valores de los componentes del circuito están evidentemente ligados a la frecuencia de resonancia de la viga así como a las características de los parches piezoeléctricos. Se ha tenido que volver a hacer todo el dimensionamiento de los componentes para esta nueva viga.

He aquí los diferentes valores obtenidos de las frecuencias de resonancia de la segunda viga :

Orden	0	1
Frecuencia (Hz)	7,56	15,09

El coeficiente de acoplamiento es todavía muy bajo pero esta vez es posible medirlo. Es del orden de 0,1.

El circuito de recuperación de energía es el mismo que en el primer ensayo. De nuevo se han escogido los valores de los componente después de haber realizado una serie de test. El valor de la resistencia R2 optimal es de 10 k Ω y para el condensador C1 de 10nF. Los cambios han sido realizados evidentemente tanto en el lado positivo como en el negativo del circuito, con lo que R6 vale 10k Ω y C4 vale 10nF. Gracias a estos cambios la recuperación de energía ha sido realmente mejorada ya que sólo hacen falta 50 seg para cargar el condensador C3 hasta 10V.

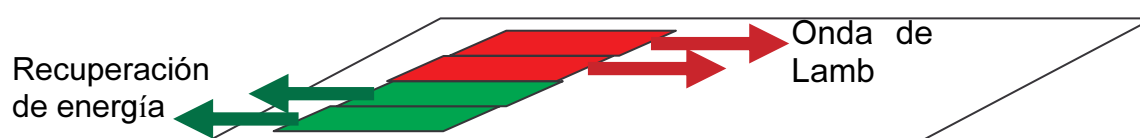
3. Tabla resumen de los valores de los componentes

	Parches de 1,3 mm	Parches de 0,3 mm
R	8,4 kOhms	10 kOhms
C	4,4 nF	10 nF
L	10 mH	10 mH
Tensión recuperada	5V en 2 min (5,9mJ)	5V en 10s

B Onda de Lamb

La tarjeta de conmutación, que permite conmutar del circuito de recuperación de energía al circuito de emisión de las ondas de Lamb o viceversa, ha sido causa de multitud de problemas en las diferentes pruebas realizadas. Los switches analógicos deben estar alimentados todo el tiempo y presentan un consumo de energía más importante que la esperada, indicada en los datasheets. El problema principal se sitúa en la resistencia interna demasiado grande de los switches. Se situaron unos switches en serie, cada uno de una resistencia de 20 Ohms. A partir de ese momento el circuito de recuperación de energía dejó de funcionar como consecuencia de una resistencia en serie demasiado grande.

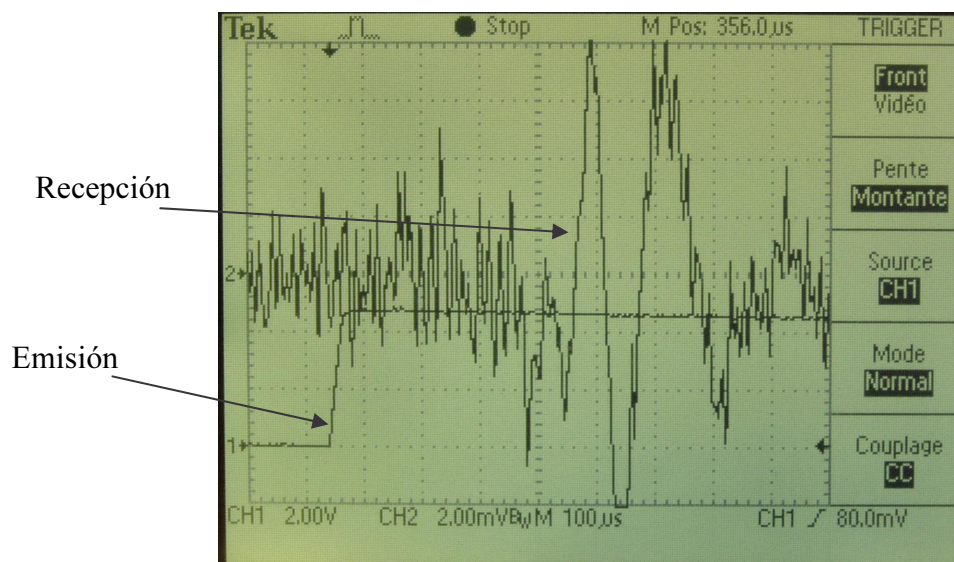
Para solucionar este problema es necesario separar los circuitos. Por lo que se han utilizado dos parches para la recuperación de energía y otros dos para la emisión de las ondas de Lamb. (Esta ha sido la solución definitiva).



Esta solución definitiva tiene la ventaja de un funcionamiento más sencillo. Tiene de todas formas el inconveniente de tener que dedicar dos parches por función y por lo tanto dividir los recursos además de aumentar el número de cables que llegan a molestar un poco.

Al haber disminuido a dos el número de parches para la recuperación de energía, ésta se realiza de forma más lenta. Afortunadamente la energía recuperada es aún suficiente para los fines del proyecto.

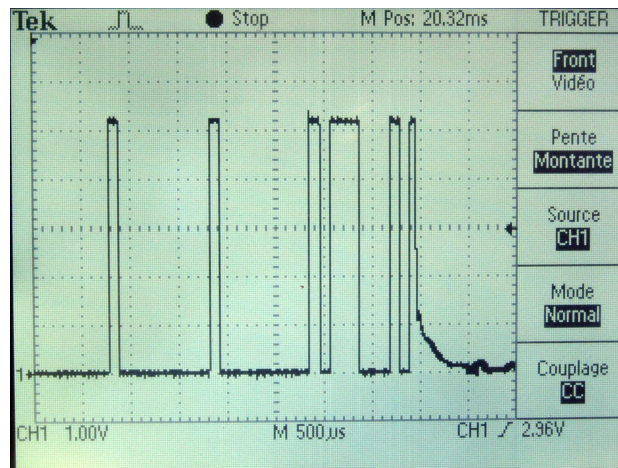
Con esta nueva configuración la transmisión se realizó correctamente y prueba de ello es este gráfico :



Recepción de la onda de Lamb

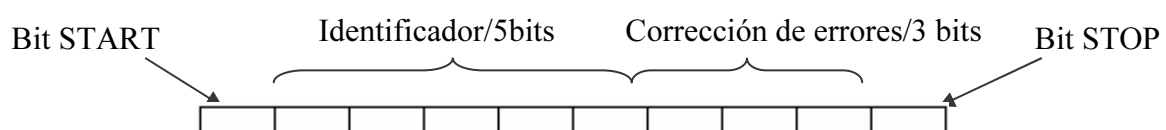
C Transmisión UHF

La transmisión UHF se efectua sin problemas.



Trama UHF recibida

Para enviar la información del identificador del parche se ha utilizado la salida USART (serie) del microprocesador. Hay, como en toda transmisión serie, un bit de START, los bits de datos y un bit de STOP al final. Se han añadido además del identificador, 3 bits de corrección, que durante la recepción de la palabra informa si ha habido algún error de transmisión. El contenido del identificador es 1, 2, 3 o 4 y depende por tanto del número de parches utilizado para enviar la onda de Lamb. La velocidad de transmisión es de 4800 baudios.



D Almacenamiento de la energía

Una vez la energía recuperada se va a almacenar antes de utilizarla.

El almacenamiento lo lleva a cabo un condensador que se carga hasta un umbral determinado. Una vez llegado a este umbral se puede utilizar la energía recuperada para la aplicación que se crea conveniente.

Se ha utilizado una capacidad de $470\mu\text{F}$ que se carga hasta cerca de 5V . Esto es aproximadamente $5,9\text{mJ}$.

Hace falta energía para alimentar el PIC, el transmisor UHF y generar las ondas Lamb. El PIC sólo consume algunos μA durante un periodo inferior a 500ms . La generación de ondas de Lamb es tan poca que se puede prácticamente despreciar. La emisión UHF es la que consume más pero sólo dura un instante: consume aproximadamente 10mW pero durante menos de 10ms .

He aquí una tabla que muestra el consumo de las diferentes partes :

Utilización	PIC	HF	Lamb
Consumo	0.5mW	10mW	1mW
Duración	500ms	10ms	1ms
Energía necesaira	0.25mJ	0.1mJ	$1\mu\text{J}$

Se han realizado las siguientes medidas en el laboratorio para ver el tiempo de recuperación y de utilización de energía :

Con una buena vibración de la viga se necesita cerca de 10s para cargar el condensador a 5V .

Sacando un corriente de 10mA del condensador, hacen falta 500ms para vaciar completamente la capacidad.

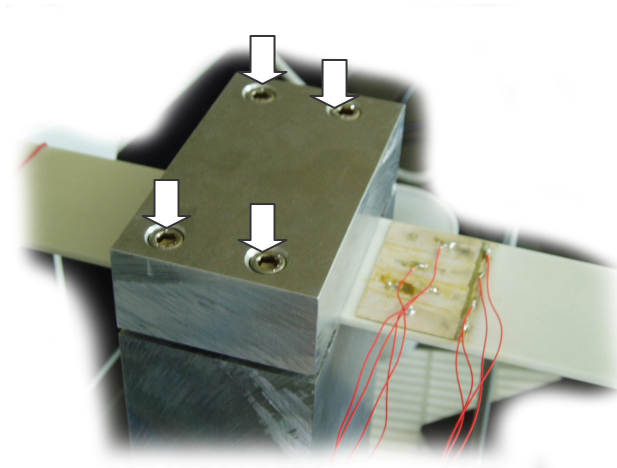
VII MODO DE EMPLEO

A. Soporte

Es el soporte físico del proyecto. Se utiliza para fijar la viga y situar el electroimán que la hace vibrar.

La fijación de la viga se realiza colocando la viga entre las dos partes de un pilar (piezas de aluminio). Hay que tener cuidado en centrar bien la viga y ponerla en paralelo con el soporte.

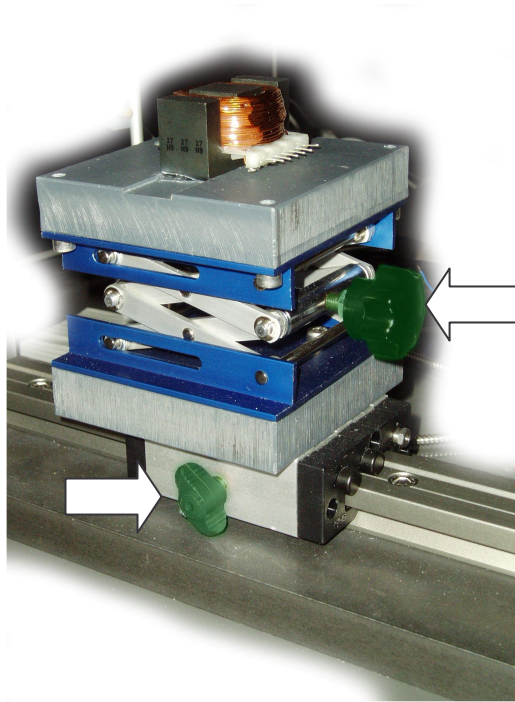
Una vez la viga correctamente colocada, hay que añadir 4 tornillos para que se mantenga firme.



El electroimán se puede colocar en distintos lugares de la viga gracias a un sistema formado por una guía y un plato elevador.

El posicionamiento longitudinal se hace con la ayuda de una guía.

El posicionamiento vertical se realiza gracias a un plato elevador. Sólo hay que girar un tornillo para poder subir o bajar el electroimán.



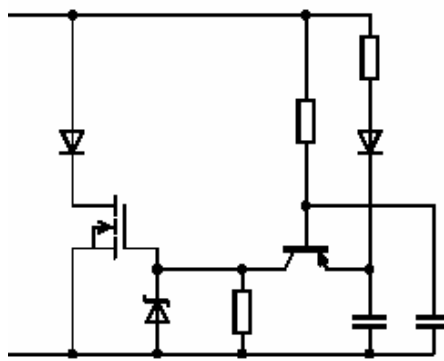
El electroimán está diseñado para hacer vibrar la viga de fibra de vidrio. La corriente máxima admisible por el hilo de cobre es de 2A. Está alimentado por un amplificador de potencia (tipo ampli audio). La entrada del amplificador está conectada a un generador de baja frecuencia GBF que genera una señal sinusoidal a la frecuencia deseada (típicamente la frecuencia de resonancia). Hay que tener cuidado con las propiedades magnéticas del electroimán, pues su frecuencia es el doble de la frecuencia del GBF. Por lo que para una señal de frecuencia 8Hz a la salida del GBF, la viga vibrará a 16MHz.

Los reglajes típicos de estos aparatos son :

- amplitud pico a pico a la salida del GBF: 250mV
- volumen del amplificador : entre un tercio y la mitad
- distancia entre el electroimán y la viga : de 1 a 2 cm

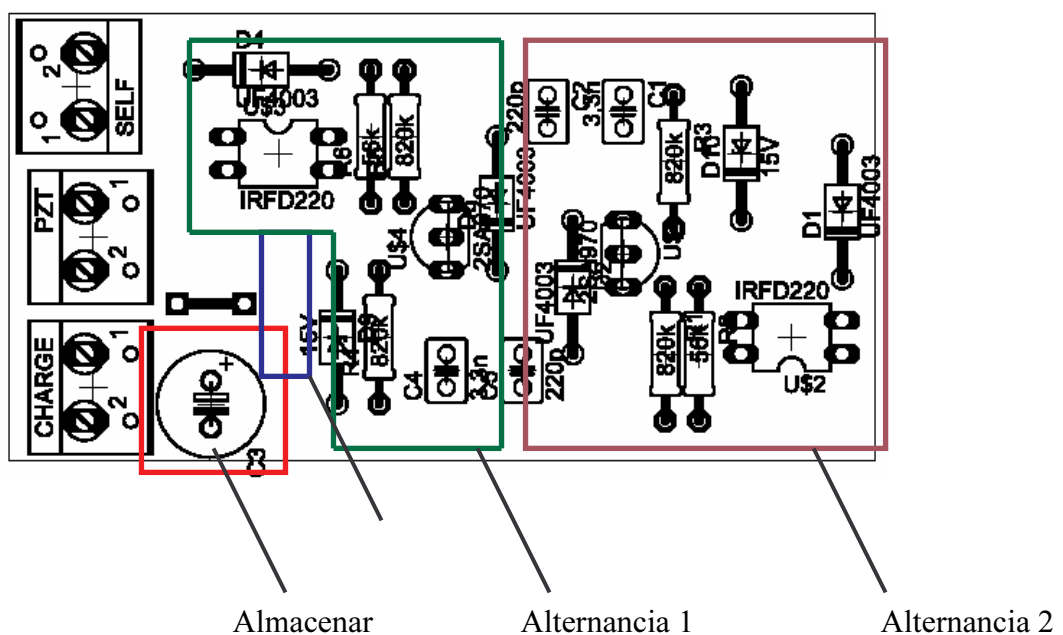
B. Tarjeta de recuperación

La tarjeta de recuperación utiliza el sistema de recuperación SSHI cuyo esquema es el siguiente :



Este esquema permite recuperar energía pero sólo en una de las alternancias de la señal. La tarjeta de recuperación de energía final integra este esquema dos veces con objeto de recuperar energía en las dos alternancias de la señal.

La tarjeta contiene igualmente un condensador para poder almacenar la energía.



La tarjeta tiene tres bornas sobre las cuales se pueden conectar :

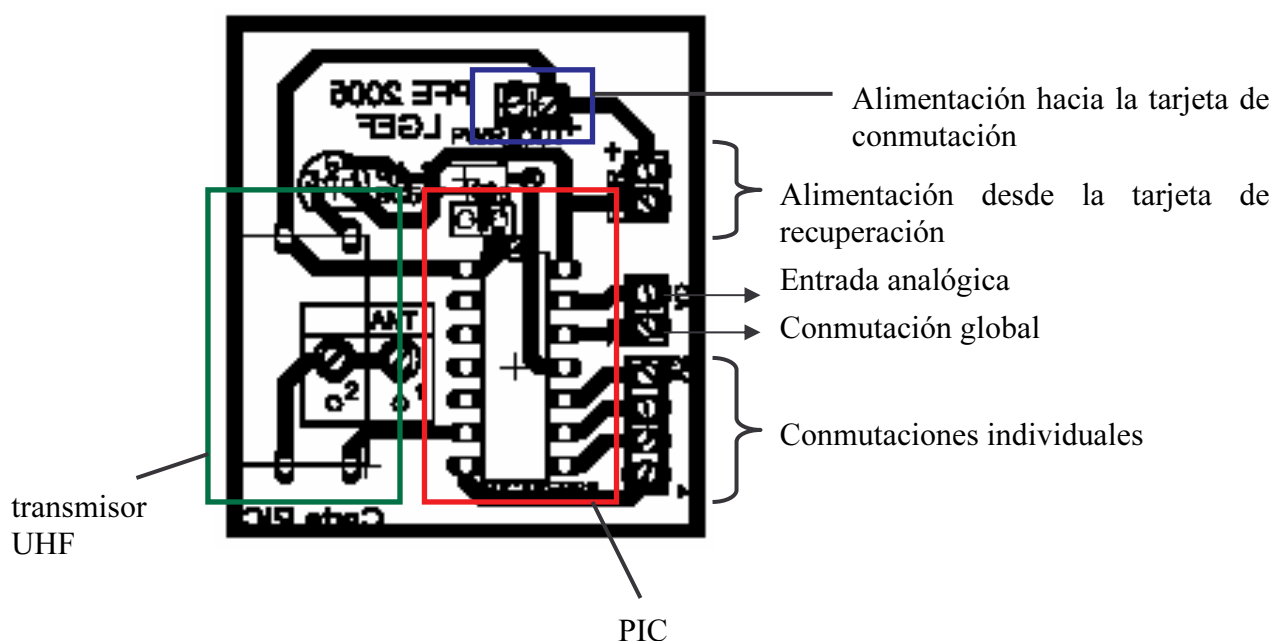
- La bobina, que se ha situado en serie con los insertos piezoeléctricos
- Los insertos piezoeléctricos.
- La carga, que tomará su alimentación del condensador de almacenamiento.

Los componentes de la tarjeta han sido especialmente optimizados para el funcionamiento de la segunda viga. Así como las constantes de tiempo que han sido ajustadas para conmutar a la máxima tensión de las bornas de los insertos piezoeléctricos.

C. Tarjeta microcontrolador

La tarjeta microcontrolador contiene un microcontrolador PIC16F688 y un transmisor UHF Aurel TX-4MDIL. También tiene diferentes bornas sobre las que se han conectado la alimentación y las entradas y salidas.

La alimentación proviene de la tarjeta de recuperación de energía, las salidas del PIC son dirigidas a la tarjeta de conmutación y una última borna está disponible para poder transmitir la alimentación a la tarjeta de conmutación.



Las bornas llamadas « conmutaciones individuales » corresponden a las salidas del PIC que van a generar las ondas de Lamb sobre cada parche. Se podrán conectar estas salidas sobre los transistores de la tarjeta de conmutación o bien sobre las entradas de comando de los switches analógicos.

Las bornas llamadas « conmutación global » sólo serán utilizadas en el caso de utilizar los transistores.

Estas salidas, conmutación global o inividuales, permiten a los parches piezoeléctricos conmutar del circuito de recuperación de energía al circuito de emisión de las ondas de Lamb o viceversa.

1. Programación del PIC

La programación del PIC se hace transfiriendo el fichero .hex a la memoria con la ayuda de un programador.

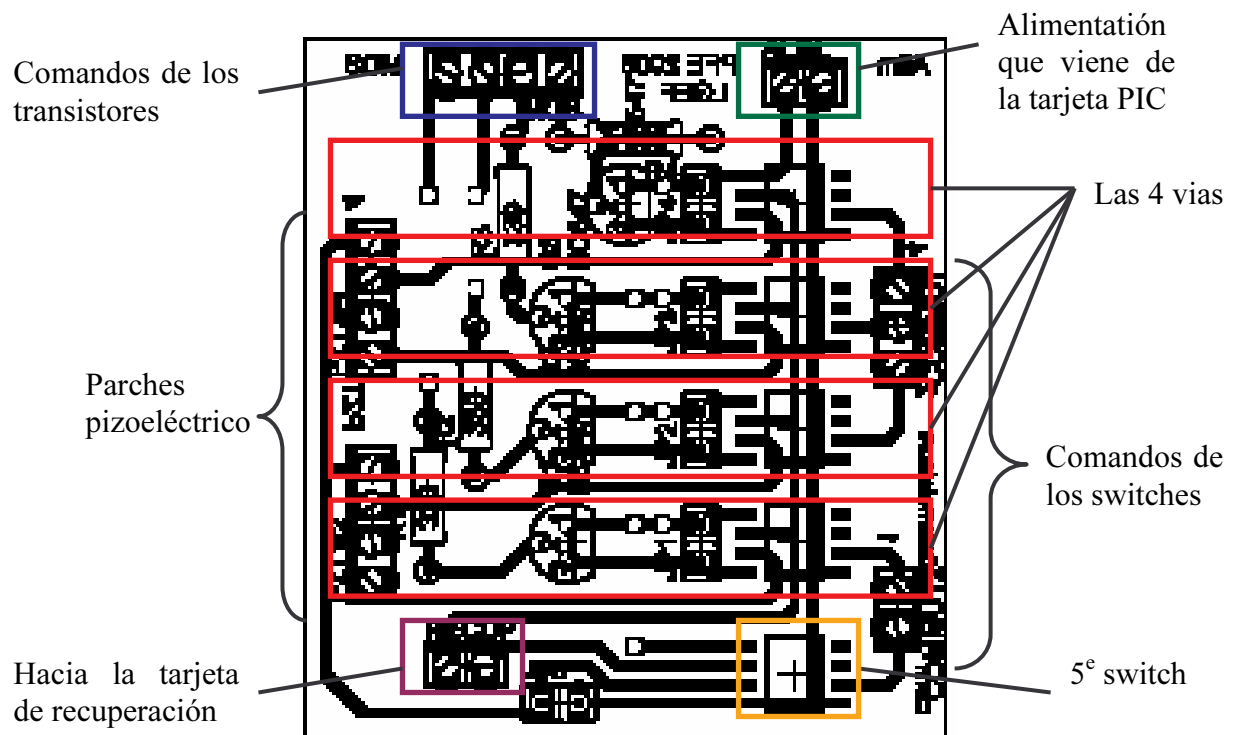
La dificultad reside en el hecho que el PIC utilizado es un PIC de última generación y que no está tenido en cuenta por la mayoría de los programadores.

Si se dispone de un programador adecuado, esta etapa no crea ningún problema. Pero si no se dispone del programador la situación cambia. Ya que se ha tenido que colocar un adaptador para poder programar con un programador clásico. Hay que enchufar el PIC, que tiene 14 pines, en el adaptado y a continuación enchufar el adaptador sobre un soporte de 40 pines previsto para el PIC16F877 del programador.

D. Tarjeta de conmutación

Esta tarjeta realiza las conmutaciones de los insertos piezoeléctricos entre los circuitos de recuperación de energía y los de emisión de las ondas de Lamb. Como se explicó en la parte resultados, este modo no funciona. De todas maneras se va a describir el proceso con el fin de presentar la idea.

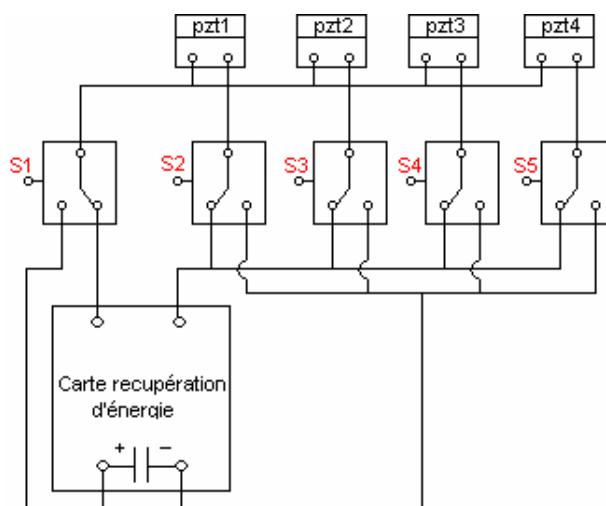
La tarjeta contiene cuatro vías (una por cada inserto piezoeléctrico) formadas por un switch analógico y un transistor bipolar en conmutación. El switch permite conectar el parche al circuito de recuperación o al transistor. El transistor sirve para enviar una señal cuadrada a las bornas de un inserto piezoeléctrico, lo que va a generar la onda de Lamb. Un quinto switch está presente en esta tarjeta y juega el mismo papel de conmutación que los otros cuatro pero para los electrodos positivos de los cuatro insertos piezoeléctricos.



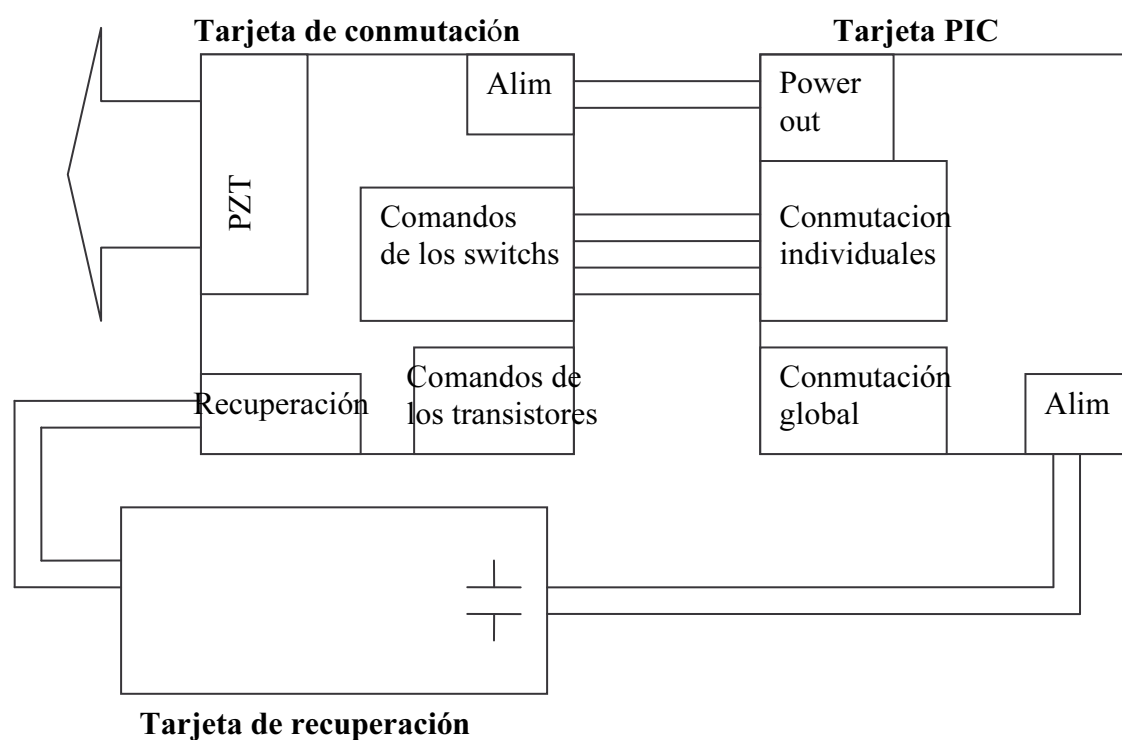
La tarjeta puede adoptar dos modos de funcionamiento según el cableado con la tarjeta PIC.

1. Comutación individual

En esta configuración se trata de transmitir con un solo parche mientras que los otros recuperan energía. Las bornas '+' de los parches están conectadas todo el tiempo al circuito de recuperación mientras que las otras bornas '-' están conectadas a los switches. Los transistores están cortocircuitados y la onda de Lamb es generada directamente al conmutar los switches .

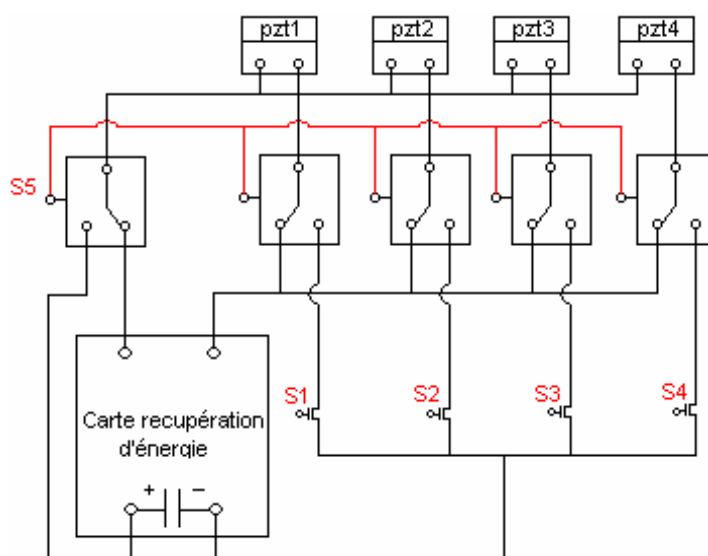


Para este modo de funcionamiento hay que conectar las tarjetas de la siguiente manera :

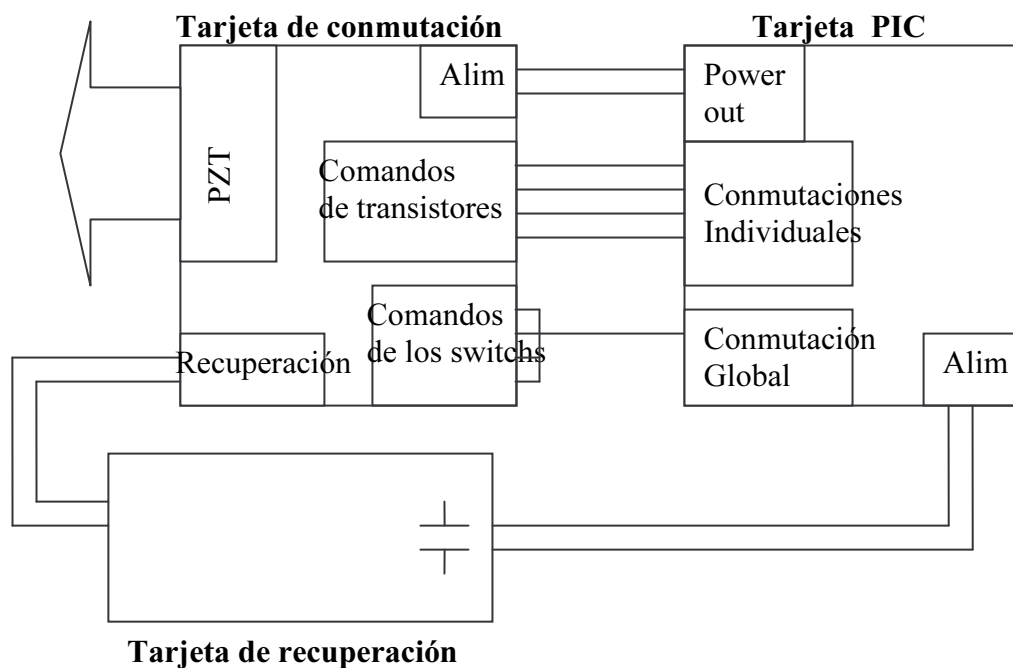


2. Conmutación global

En este modo de funcionamiento la emisión se realiza en dos tiempos. Primero se hace conmutar todos los switches al mismo tiempo para conectar todos los parches no al circuito de recuperación sino al circuito de emisión. Después se genera la onda de Lamb sobre la vía deseada con la ayuda de un transistor.



Las conexiones se realizan de la manera siguiente :

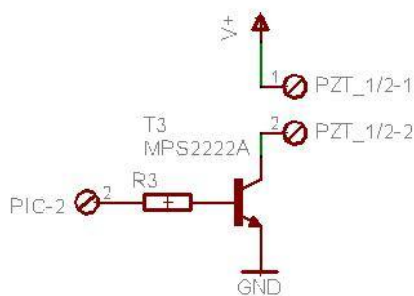


3. Parches piezoeléctricos dedicados

Teniendo en cuenta que el circuito de conmutación no funciona, se ha buscado una solución de parches dedicados. Se han repartido los parches piezoeléctricos en dos grupos : dos parches para la recuperación y dos parches para la transmisión de ondas Lamb.

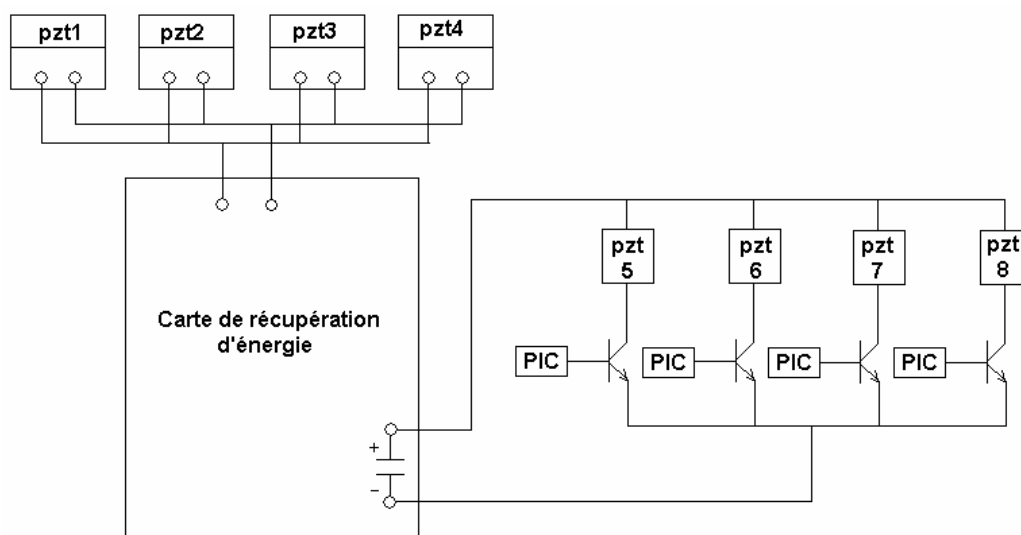
Los parches de recuperación son directamente conectados a la tarjeta de recuperación.

Las emisiones de Lamb son realizadas con la ayuda de simples trasistores NPN dirigidos por el PIC.



Esquema de generación de la onda de Lamb

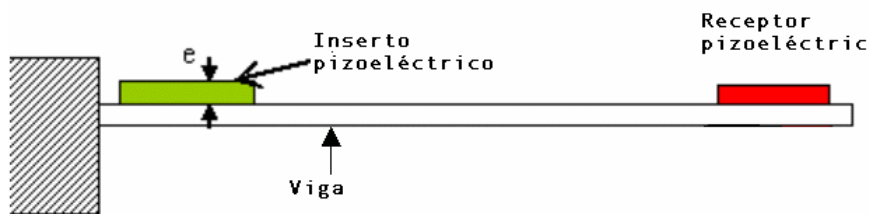
Para poder realizar un sistema completo, se tendrían que haber pegado otros cuatro parches bajo la viga. De este modo, los parches de la parte superior se dedicarían a la recuperación de energía y los de abajo a las emisiones de Lamb. Desafortunadamente y por falta de tiempo se han utilizado únicamente los parches situados en la parte superior de la viga para realizar las dos funciones.



Esquema de la idea con 4 parches para la emisión y 4 parches para la recuperación

E. Receptor piezoeléctrico

El receptor piezoeléctrico situado al final de la viga, permite adquirir las ondas de Lamb. En un principio se podrán ver en un osciloscopio. Para ello basta con conectar un osciloscopio digital a través de un filtro. El filtro está contenido en los cables que unen el parche piezoeléctrico al osciloscopio y sirve para eliminar el ruido de baja frecuencia. Es un filtro paso alta que comienza en 50Hz.



F. Receptor UHF

El receptor UHF sirve para recibir la señal de ultrafrecuencia. Se ha utilizado un ordenador para ver lo que se recibía. El receptor está integrado en una tarjeta que contiene también un convertidor RS232 –TTL. La tarjeta se enchufa sobre el puerto serie del ordenador. Desgraciadamente la unión con el ordenador no funciona por razones desconocidas.

La visualización de las tramas tendría que haberse hecho con la ayuda del programa Microsoft Hyperterminal. Hay que crear una nueva conexión sobre el puerto COM donde está conectada nuestra tarjeta. Los parámetros de la conexión son los siguientes :

- Velocidad de transferencia : 4800 baudios
- Bits de datos: 8
- Paridad : ninguna
- Bits de stop : 1
- Control de flujo : ninguno

Todas las características recibidas deberían pues quedar reflejadas en la pantalla.

VIII CONCLUSION

Con el fin de terminar mis estudios de ingeniero he realizado este proyecto fin de estudios que me ha permitido realizar la transición entre el medio escolar y el medio industrial. El objetivo ha sido iniciarme en la concepción y en el desarrollo de un sistema respetando los objetivos creados por el cliente, lo que refleja la vida en una empresa. He utilizado los conocimientos que me han sido inculcados a lo largo de mi periodo universitario con el fin de realizar un trabajo eficiente.

Como se ha explicado en la parte memoria justificativa (apartado 2 de este documento) el proyecto ha tenido lugar en la universidad del INSA de Lyon (Francia). Este hecho me ha permitido conocer el funcionamiento de otra universidad diferente a la mía, con una organización y unas formas de trabajo particulares que me han resultado muy enriquecedoras. Por ello considero un privilegio el haber podido realizar un proyecto en un país extranjero de la unión europea. Así mismo decir que no todo ha sido fácil pues la diferencia idiomática hace que no siempre resulte evidente la comunicación y el poder transmitir y adquirir las ideas. Aun así debo decir que mis tutores han tenido un comportamiento ejemplar y que han estado siempre a mi disposición para ayudarme hasta en el más mínimo detalle.

A continuación voy a citar las principales tareas que han sido realizadas con éxito: situación de los parches, recuperación de energía, programación del microcontrolador transmisión UHF, recepción UHF, transmisión de Lamb y recepción de Lamb. Todas estas tareas muestran el balance positivo y satisfactorio del proyecto. Evidentemente hay cosas a mejorar en un futuro trabajo como es el conseguir utilizar los mismos insertos piezoeléctricos para la transmisión de la onda de Lamb y para la recuperación de energía. Así como descifrar la recepción UHF en el ordenador. También sería interesante tratar de transmitir diferentes formas de ondas de Lamb : impulso unitario, onda sinusoidal, onda cuadrada, etc, y a diferentes frecuencias. Dejo todas estas mejoras para un futuro proyecto final de estudios en el seno del departamento de ingeniería eléctrica del INSA para el próximo curso.

IX ANEXOS

PROGRAMACION DEL PIC

```

    ;*****
**
    ;
    ; Fichero : pzt.asm
    ; Versión : 1.1
    ; Fecha : 13/06/2005
    ; Microprocesador : P16F688.inc
    ;*****
**
    ; Comentarios :
    ;
    ; Programa de gestión de la secuencia de emisión. Emite
    ; regularmente un identificador HF luego una onda de Lamb
    ; sobre el parche piézo asociado
    ;
    ;*****
**
    ;
    ;

    LIST      p=16F688          ;
    #include  <P16F688.inc>      ; Fichero include

    __CONFIG  _FCMEN_OFF & _IESO_OFF & _BODEN_OFF & _CPD_OFF
& _CP_OFF & _MCLR_OFF & _PWRTE_OFF & _WDT_OFF & _INTIO_OSC

/
    ;////////////////////////////////////
/
    ;      DEFINE
    ;////////////////////////////////////
/

#define pzt0 PORTC,0    ; conmutación individual sobre cada
#define pzt1 PORTC,1    ; inserto pizoeléctrico pzt
#define pzt2 PORTC,2
```

```

        #DEFINE pzt3  PORTC,3

        #DEFINE commut      PORTA,1          ; salida de conmutación
global
        #DEFINE      HF_pwr      PORTA,2          ; alimentación de la
HF
        #DEFINE      Vref      PORTA,0      ;      entrada      analógica
tensión de ref

        ;//////////////////////////////////////
/
        ;      ASIGNACIONES
        ;//////////////////////////////////////
/

        Id0      EQU      B'01001100'      ;      definición
identificadores
        Id1      EQU      B'01000111'
        Id2      EQU      B'01000101'
        Id3      EQU      B'01000110'
        sync      EQU      0x00

        ;//////////////////////////////////////
/
        ;      VARIABLES ZONA COMUN
        ;//////////////////////////////////////
/

        ; zone de 16 bits
        CBLOCK      0x70
        compteur:1 ; contador del número de pulsos por emisión
lamb
        cmpt1:1      ; contadores para los tempos
        cmpt2:1      ;      |
        cmpt3:1      ;      |

        ENDC

        ;//////////////////////////////////////
/
        ;      VARIABLES BANK 0
        ;//////////////////////////////////////
/

        ; zone de 80 bits
        CBLOCK      0x20

```

```

        ENDC

;////////////////////////////////////
/
;      VARIABLES BANK 1
;////////////////////////////////////
/

; zone de 80 bits
CBLOCK      0xA0

        ENDC

;////////////////////////////////////
/
;      VARIABLES BANK 2
;////////////////////////////////////
/

; zone de 80 bits
CBLOCK      0x120

        ENDC
;_____
;_____
;_____
;_____
;_____

;////////////////////////////////////
///
;      COMIENZO
;////////////////////////////////////
///

        org    0x0000
        GOTO   init

;////////////////////////////////////
///
;      INTERRUPCIONES
;////////////////////////////////////
///

        org    0x0004

        RETFIE

```

```

;////////////////////////////////////
///
;               INICIALIZACION
;////////////////////////////////////
///

init:
    BCF        STATUS,RP0        ; pasar a bank 0
    BCF        STATUS,RP1
    MOVLW      B'00000111'        ; configuración de los
comparadores
    MOVWF      CMCON0

    BSF        STATUS,RP0        ; pasar a bank 1
    CLRF       ANSEL              ; config de las entradas en
digital
    MOVLW      B'00000001'        ; configuración puerto A
(0:salida
    MOVWF      TRISA              ; 1:entrada)
    MOVLW      B'00110000'        ; configuración puerto C
(0:salida
    MOVWF      TRISC              ; 1:entrada)
    MOVLW      B'01100000'        ; configuración del reloj
    MOVWF      OSCCON             ; (4MHz internal clk)

    MOVLW      B'00001010'        ; configuración de las opciones
    MOVWF      OPTION_REG         ; (prédivisor 1:4 sobre wdt)

    BCF        STATUS,RP0        ; pasar a bank 0
    CLRF       PORTA              ; reset de los puertos
    CLRF       PORTC
    MOVLW      B'00010110'        ; prescaler wdt = 1:65536
    MOVWF      WDTCON

; Configuración USART
    MOVLW      D'25'
    MOVWF      SPBRG
    CLRF       SPBRGH
    MOVLW      B'00000100'
    MOVWF      TXSTA
    CLRF       RCSTA
    CLRF       BAUDCTL

;////////////////////////////////////
///
;               PROGRAMA
;////////////////////////////////////
///

```

```

start:

;//////////////////////////////////////
/////////
;////////////////////////////////**                               SLEEP
**////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////
/////////

BSF      WDTCON,0      ; activación del wdt
SLEEP                                ;despertar cuando depase del wdt(
~8,5")

BCF      WDTCON,0      ; desactivación del wdt


;#####
#####
;#####**                               PZT0
**#####
;#####
#####

;////////////////////////////////////
/////////
;////////////////////////////////**                               HF
**////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////
/////////

BSF      HF_pwr          ; HF Power enabled
CALL     Tempo5000
BSF      RCSTA,SPEN      ; Serial port enabled
BSF      TXSTA,TXEN      ; TX enabled

;///// emisión de 0 pr sincronizar la linea ////
MOVLW    0x14
MOVWF    compteur
bcl0:
MOVLW    sync
MOVWF    TXREG
NOP
NOP
WaitShift0:
BTFS    PIR1,TXIF
GOTO     WaitShift0
DECFSZ   compteur,f
GOTO     bcl0
;////////////////////////////////////
MOVLW    Id0              ; cargar el valor a emitir
MOVWF    TXREG            ; Emisión

```

```

NOP
NOP

waitTX0:
    BTFSS    TXSTA,TRMT    ; espera a que el tx termine
    GOTO     waitTX0

    BCF      HF_pwr        ; HF Power disabled
    BCF      TXSTA,TXEN    ; TX disabled
    BCF      RCSTA,SPEN    ; Serial Port disabled

;//////////////////////////////////////
//////////
;//////////////////////////////////////**          Onda    de    Lamb
**//////////
;//////////////////////////////////////
//////////
NOP
NOP
NOP          ; pequeña pausa entre la HF y
Lamb
NOP
NOP

    BSF      commut        ; conmutación global
    NOP      ; 2µs de espera para asegurar la conmutación
    NOP

    MOVLW    D'5'          ; envio de 5 pulsos
    MOVWF    compteur

LAMB0:
    BSF      pzt0          ; Envio de 5 voltios
    CALL     Tempo125      ; Pulso a 4 kHz
    BCF      pzt0          ; Envio de 0 Voltios
    CALL     Tempo9875     ; frecuencia de repetición 100
    decfsz   compteur,f    ; repetir 5 veces
    goto     LAMB0        ;

;
;

    BCF      commut        ; volver al reposo del
relé

```

```

;////////////////////////////////////
/////////
;////////////////////////////////**                               SLEEP
**////////////////////////////////
;////////////////////////////////
/////////

BSF      WDTCON,0    ; activación du wdt
SLEEP    ; despertar cuando depase del wdt (
~8,5")

BCF      WDTCON,0    ; desactivación del wdt

;#####
#####
;#####**                               PZT1
**#####
;#####
#####

;////////////////////////////////
/////////
;////////////////////////////////**                               HF
**////////////////////////////////
;////////////////////////////////
/////////

BSF      HF_pwr      ; HF Power enabled
CALL     Tempo2000
BSF      RCSTA,SPEN  ; Serial port enabled
BSF      TXSTA,TXEN  ; TX enabled

;///// emisión de 0 pr sincronizar la linea ///
MOVLW    0x14
MOVWF    compteur
bcl1:
MOVLW    sync
MOVWF    TXREG
NOP
NOP
WaitShift1:
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     WaitShift1
DECFSZ   compteur,f
GOTO     bcl1

;////////////////////////////////
MOVLW    Id1          ; cargar el valor a tx
MOVWF    TXREG        ; Emisión

NOP
NOP

```

```

waitTX1:
    BTFSS    TXSTA,TRMT        ; espera a que el tx termine
    GOTO     waitTX1

    BCF      HF_pwr            ; HF Power disabled
    BCF      TXSTA,TXEN        ; TX disabled
    BCF      RCSTA,SPEN        ; Serial Port disabled

;//////////////////////////////////////
//////////
;//////////////////////////////////////**                Onda    de    Lamb
**//////////////////////////////////////
;//////////////////////////////////////
//////////

    NOP
    NOP
    NOP
    NOP
    NOP

;

    BSF      commut
    NOP
    NOP

; transmitir la onda de lamb con el parche PZT1

    MOVLW    D'5'
    MOVWF    compteur

LAMB1:
    BSF      pzt1              ; Envio de 5 Voltios
    CALL     Tempo125
    BCF      pzt1              ; Envio de 0 Voltios
    CALL     Tempo9875
    decfsz   compteur,f ;
goto  LAMB1      ;

;

    BCF      commut

;//////////////////////////////////////
//////////

```

```

;////////////////////////////////////////**
**////////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////////
////////////////////////////////

BSF      WDTCON,0    ; activaci3n del wdt
SLEEP    ; despertar cuando depase del wdt(
~8,5")

BCF      WDTCON,0    ; desactivaci3n del wdt

;#####
#####
;#####**
**#####
;#####
#####

;////////////////////////////////////////
////////////////////////////////
;////////////////////////////////////////**
**////////////////////////////////////////
;////////////////////////////////////////
////////////////////////////////

BSF      HF_pwr      ; HF Power enabled
CALL     Tempo1000
BSF      RCSTA,SPEN  ; Serial port enabled
BSF      TXSTA,TXEN  ; TX enabled

;///// emisi3n de 0 pr sincronizar la linea ////
MOVLW    0x14
MOVWF    compteur
bcl2:
MOVLW    sync
MOVWF    TXREG
NOP
NOP
WaitShift2:
BTFSS    PIR1,TXIF
GOTO     WaitShift2
DECFSZ   compteur,f
GOTO     bcl2

;////////////////////////////////////////
MOVLW    Id2          ; cargar el valor a emitir
MOVWF    TXREG        ; Emisi3n

NOP
NOP

waitTX2:

```

```

        BTFSS      TXSTA,TRMT      ; esperar que el tx termine
        GOTO       waitTX2

        BCF        HF_pwr          ; HF Power disabled
        BCF        TXSTA,TXEN      ; TX disabled
        BCF        RCSTA,SPEN      ; Serial Port disabled

;//////////////////////////////////////
//////////;//////////////////////////////////**                Onda de Lamb
**//////////////////////////////////
;//////////////////////////////////////
//////////

        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP

        BSF      commut
        NOP
        NOP

; Emitir la onde de lamb con el parche PZT2

        MOVLW     D'5'
        MOVWF     compteur

LAMB2:

        BSF      pzt2              ; Envio de 5 Voltios
        CALL     Tempo125
        BCF      pzt2              ; Envio de 0 Voltios
        CALL     Tempo9875
        decfsz   compteur,f        ; Esta instrucción decrementa
una                                     ; variable y salta
                                     ; la instrucción siguiente
        goto     LAMB2             ; si el resultado de
                                     ; decrementar da un valor
                                     ; nulo.

;

        BCF      commut

;//////////////////////////////////////
//////////;//////////////////////////////////**                SLEEP
**//////////////////////////////////
;//////////////////////////////////////
//////////

```

```

        BSF      WDTCON,0    ; activación del wdt
        SLEEP                                ; despertar cuando depase del wdt (
~8,5")

        BCF      WDTCON,0    ; desactivación del wdt

;#####
#####
;#####**                                PZT3
**#####
;#####
#####

;////////////////////////////////////
/////////
;////////////////////////////////**                                HF
**/////////
;////////////////////////////////////
/////////

        BSF      HF_pwr                ; HF Power enabled
        CALL     Tempo5000
        BSF      RCSTA,SPEN            ; Serial port enabled
        BSF      TXSTA,TXEN            ; TX enabled

;///// emisión de 0 pr sincronizar la linea ////
        MOVLW    0x14
        MOVWF    compteur
bcl3:
        MOVLW    sync
        MOVWF    TXREG
        NOP
        NOP
WaitShift3:
        BTFSS    PIR1,TXIF
        GOTO     WaitShift3
        DECFSZ   compteur,f
        GOTO     bcl3

;////////////////////////////////////
        MOVLW    Id3                    ; carga del valor a tx
        MOVWF    TXREG                    ; Emisión

        NOP
        NOP

waitTX3:
        BTFSS    TXSTA,TRMT                ; esperar que el tx
termine
        GOTO     waitTX3

```

```

        BCF      HF_pwr           ; HF power disabled
        BCF      TXSTA,TXEN      ; TX disabled
        BCF      RCSTA,SPEN      ; Serial Port disabled

;//////////////////////////////////////
//////////;////////////////////////////////**          Onda   de   Lamb
**//////////
;//////////////////////////////////////
//////////
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP
        NOP

        BSF      commut
        NOP
        NOP

; Emitir la onda de lamb con el parche PZT3

        MOVLW     D'5'
        MOVWF     compteur

LAMB3:
        BSF      pzt3           ; Envio de 5 Voltios
        CALL     Tempo125
        BCF      pzt3           ; Envio de 0 Voltios
        CALL     Tempo9875
        decfsz    compteur,f     ; Esta instrucción decrementa
una                                     ; variable y salta
                                     ; la instrucción siguiente
        goto     LAMB3          ; si el resultado de
                                     ; decrementar da un valor
                                     ; nulo.

;

        BCF      commut

        GOTO     start

;-----

```

```

;#####
#####;#####**
**#####
;#####
#####

```

FUNCIONES

```

;//////////////////**
**//////////////////

```

Tempo de 125 µs

```

Tempo125:
    MOVLW    D'2'
    MOVWF    cmpt1
Boucle_125_2:
    MOVLW    D'18'
    MOVWF    cmpt2
Boucle_125_1:
    DECFSZ   cmpt2,f
    GOTO     Boucle_125_1
    DECFSZ   cmpt1,f
    GOTO     Boucle_125_2
    NOP
    NOP
    NOP
    NOP
    return

```

```

;//////////////////**
**//////////////////

```

Tempo de 9875 µs

```

Tempo9875:
    MOVLW    D'2'
    MOVWF    cmpt1
Boucle_9875_3:
    MOVLW    D'159'
    MOVWF    cmpt2
Boucle_9875_2:
    MOVLW    D'9'
    MOVWF    cmpt3
Boucle_9875_1:
    DECFSZ   cmpt3,f
    GOTO     Boucle_9875_1
    DECFSZ   cmpt2,f
    GOTO     Boucle_9875_2
    DECFSZ   cmpt1,f
    GOTO     Boucle_9875_3
    NOP
    NOP
    NOP
    NOP
    return

```

```

;////////////////////////**
**////////////////////////

```

Tempo de 5 ms

```

Tempo5000:
    MOVLW    D'23'
    MOVWF    cmpt1
Boucle_5000_2:
    MOVLW    D'71'
    MOVWF    cmpt2
Boucle_5000_1:
    DECFSZ   cmpt2,f
    GOTO     Boucle_5000_1
    DECFSZ   cmpt1,f
    GOTO     Boucle_5000_2
    NOP
    NOP
    NOP
    NOP
    RETURN

```

```

;////////////////////////**
**////////////////////////

```

Tempo de 2 ms

```

Tempo2000:
    MOVLW    D'11'
    MOVWF    cmpt1
Boucle_2000_2:
    MOVLW    D'59'
    MOVWF    cmpt2
Boucle_2000_1:
    DECFSZ   cmpt2,f
    GOTO     Boucle_2000_1
    DECFSZ   cmpt1,f
    GOTO     Boucle_2000_2
    return

```

```

;////////////////////////**
**////////////////////////

```

Tempo de 1 ms

```

Tempo1000:
    MOVLW    D'1'
    MOVWF    cmpt1
Boucle_1000_3:
    MOVLW    D'141'
    MOVWF    cmpt2
Boucle_1000_2:
    MOVLW    D'1'
    MOVWF    cmpt3
Boucle_1000_1:
    DECFSZ   cmpt3,f

```

```
GOTO      Boucle_1000_1
DECFSZ    cmpt2,f
GOTO      Boucle_1000_2
DECFSZ    cmpt1,f
GOTO      Boucle_1000_3
return
```

```
END
```
