



ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
DE ZARAGOZA



# PROYECTO FINAL DE CARRERA

## ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE SENSORES ELECTRÓNICOS PARA LA INTERPRETACIÓN MUSICAL

### MEMORIA

ALUMNO:	ALBERTO PUEYO GIMENO
ESPECIALIDAD:	ELECTRÓNICA INDUSTRIAL
DIRECTOR:	JOSE MARÍA LÓPEZ
CONVOCATORIA:	SEPTIEMBRE 2010

## ÍNDICE

<b>1.INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1 Objeto del proyecto .....	3
1.2 Alcance.....	3
1.3 Antecedentes.....	3
1.3.1 1870-1915: Experimentos tempranos.....	4
1.3.2 1915-1960: La era del tubo de vacío.....	8
1.3.3 1960-1980: Circuitos Integrados.....	13
1.3.4 1980-presente: Digital.....	15
1.3.5 Conclusiones.....	18
<b>2. BÚSQUEDA DE SENSORES.....</b>	<b>19</b>
2.1 Introducción.....	19
2.2 Sensores de presión.....	19
2.3 Sensores de luz.....	27
2.4 Sensores de flexión.....	31
2.5 Sensores inductivos.....	34
2.6 Acelerómetros .....	37
2.7 Conclusiones .....	40
<b>3. EL ACCELERÓMETRO.....</b>	<b>40</b>
3.1 Fundamentos teóricos: aceleración.....	40
3.2 Acelerómetros.....	43
3.3 El acelerómetro ADXL330.....	47
3.4 Aplicaciones musicales.....	49
3.4.1 Aplicación: aceleración.....	50
3.4.1.1 Planteamiento de interpretación.....	50
3.4.1.2 Diagrama de bloques.....	51
3.4.1.3 Circuito.....	52
3.4.2 Aplicación: inclinación.....	53
3.4.2.1 Planteamiento de interpretación.....	53
3.4.2.2 Diagrama de bloques.....	55
3.4.2.3 Circuito.....	56
3.4.3 Aplicación: posición.....	58
3.4.3.1 Planteamiento de interpretación.....	59
3.4.3.2 Diagrama de bloques.....	61
3.4.3.3 Circuito.....	61
3.5 Conclusiones.....	63



---

<b>4. PELOTA MUSICAL.....</b>	<b>65</b>
4.1 Introducción.....	65
4.2 Planteamiento de uso.....	65
4.3 Diagrama de bloques .....	65
4.4 Circuito emisor.....	66
4.5 Circuito receptor.....	69
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>73</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 OBJETO DEL PROYECTO:

Este proyecto tiene por objetivo la realización de una exploración y estudio de los principales sensores electrónicos que hay en el mercado para su uso en el mundo de la interpretación y ocio musical, luego va a ser un proyecto de **tipo B**.

Se quiere obtener una visión de los sensores más allá de su función principal, normalmente en entornos industriales, y usarla para desarrollar nuevos instrumentos y juguetes musicales.

Con este trabajo no pretendo desarrollar un producto en concreto, si no que es una aportación de ideas creativas que **pueden servir para futuros proyectos o desarrollos**.

El tema fundamental es la sinergia entre arte y tecnología, en este caso, lo que puede ofrecer ésta al mundo musical, ya sea en forma de instrumentos musicales, juguetes o nuevas formas de "hacer" música.

Este estudio puede servir como punto de partida para trabajos o proyectos futuros, es un campo con muchas aplicaciones necesarias de creatividad e imaginación.

### 1.2 ALCANCE:

El ámbito de este proyecto se divide en dos partes. Por un lado está el estudio teórico de los diferentes sensores que se pueden utilizar para la interpretación musical, profundizando más en los acelerómetros, así como su desarrollo y sus posibles aplicaciones dentro del mundo artístico.

Con el acelerómetro lo que buscaremos será construir pequeños artefactos que creen sonido a partir de movimientos físicos, explorando las posibilidades y viendo hasta dónde se puede llegar. Esas aplicaciones han sido probadas y montadas con sus correspondientes circuitos, a modo de prototipo, obteniéndose resultados que veremos más adelante.

Por otro lado esta el diseño y construcción de un pequeño juguete musical, utilizando uno de los sensores del estudio, en este caso, el acelerómetro. El juguete en sí será una pelota musical, sensible a los choques y cambios de aceleración.

### 1.3 ANTECEDENTES:

#### HISTORIA DE LOS INSTRUMENTOS MUSICALES ELECTRÓNICOS:

Los instrumentos musicales electrónicos se definen como instrumentos que sintetizan sonidos de una fuente electrónica. Vamos a ver la historia de estos instrumentos y como han ido evolucionando a lo largo del tiempo.



---

## ORÍGENES:

Los orígenes de la música electrónica se pueden remontar al trabajo analítico de **Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz** (1821-1894) físico y matemático alemán, autor de la obra "DEL TONO: Base psicológica para la teoría de la música" (1860).

**Helmholtz** construyó un instrumento electrónicamente controlado para analizar combinaciones de tonos, el "**resonador de Helmholtz**", con los dientes del metal electromagnético que vibraban y las esferas de resonancia del cristal o del metal, la máquina se utilizaba para analizar los tonos constitutivos que crean sonidos naturales complejos.

**Helmholtz** se centró solamente en el análisis científico del sonido y no tenía ningún interés en usos musicales directos, las ideas musicales teóricas fueron proporcionadas por el compositor italiano **Ferruccio Busoni**.

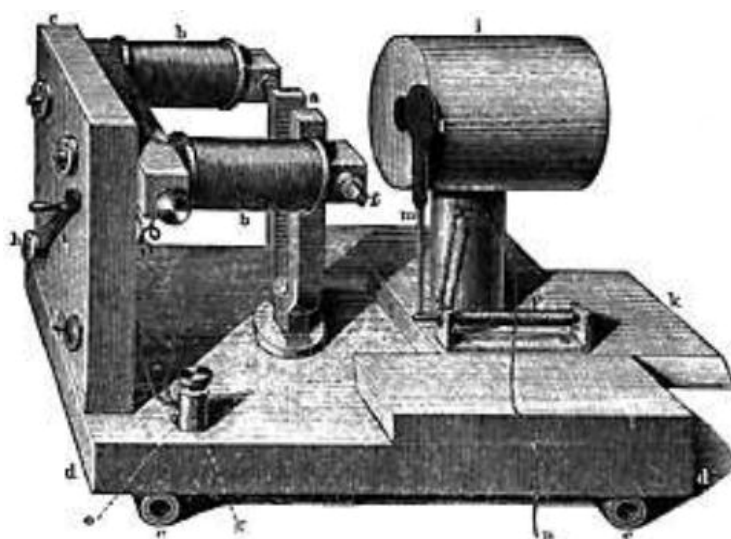


Figura 1: El resonador de Helmholtz

### 1.3.1 1870-1915: Experimentos tempranos:

Los primeros instrumentos electrónicos contruidos desde 1870 a 1915 utilizaron una variedad de técnicas para generar el sonido: la rueda del tono (usada en el **Telharmonium** y el **Choralcello**) era un disco de metal que rotaba en un campo magnético causando variaciones en una señal eléctrica, una chispa electrónica causaba fluctuaciones directas en el aire (usado únicamente en el "**Arco del Cantar**" de **Duddell** en 1899). **Elisha Gray** creó "**el telégrafo musical**", un efecto de la tecnología del teléfono.

"Dynamophone/Telharmonium" De Thaddeus Cahill (1897)

El "**Telharmonium**" o "**Dynamophone**", ideado por **Thaddeus Cahill**, puede considerarse el primer instrumento musical electrónico significativo. El primer modelo completamente terminado fue presentado al público en 1906 en Holyoke.

El **Telharmonium** era esencialmente un grupo de 145 dinamos modificados que empleaba

un número de ejes especialmente engranados y de inductores asociados para producir las corrientes alternas de diversas frecuencias de audio.

Estas señales estaban controladas por un sistema múltiple de teclados sensibles polifónicos y por bancos asociados de controles.

En los primeros modelos, el sonido que resultaba era audible a través de los cuernos acústicos del piano. Los últimos modelos fueron conectados directamente a la red de teléfono (era la única manera de amplificar el sonido en la era del preamplificador). El **Telharmonium** suministró de 1 amperio a cada receptor del teléfono. Podía oírse la música sin el receptor del teléfono al oído, sin embargo esto también enmascaraba e interrumpía cualquier otra señal en la línea. El instrumento se tocaba a cuatro manos y reproducía generalmente la música "respetable" de la época: Bach, Chopin, Grieg, Rossini, etc.

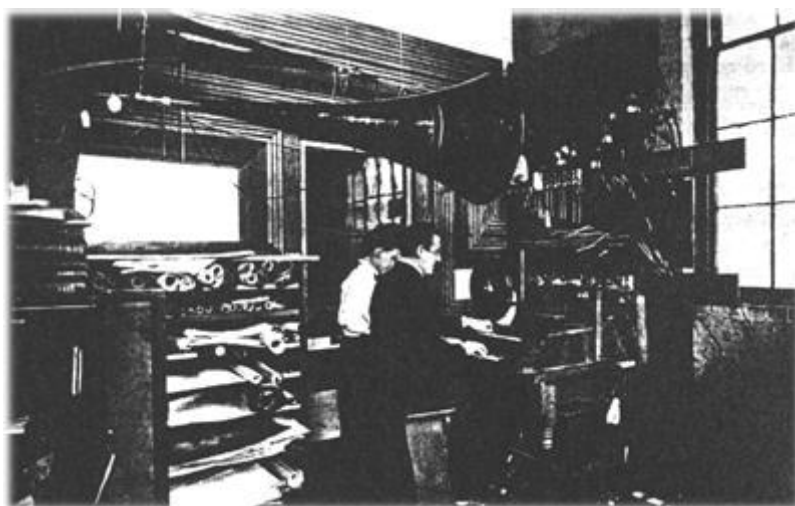


Figura 2: El Telharmonium

#### Órgano eléctrico de Choralcello (1888-1908)

El **Choralcello** ("voces divinas") era un instrumento electrónico y electro-acústico híbrido. El **Choralcello** fue diseñado y desarrollado por **Melvin Severy** con la ayuda de su hermanastro **George B. Sinclair**.

La máquina fue fabricada en Boston como órgano casero y fue presentado al público en 1909. Por lo menos seis de los instrumentos fueron vendidos y continuaron siendo utilizados hasta los años 50.



Figura 3: El Choralcello

El **Choralcello** era un contemporáneo directo del **Telharmonium**; aunque no era tan grande, seguía siendo un instrumento enorme que usaba una sistema electromagnético similar al del sonido de la rueda del tono del **Telharmonium**. El **Choralcello** consistía en dos teclados, el superior (del piano) que tenía 64 llaves y el inferior con 88 (piano y órgano), controlando (en modelos más últimos) 88 ruedas de tono y un sistema de las secuencias del piano que vibraban gracias a unos electroimanes y un sistema de martillos.

Los teclados también tenían un sistema de paradas al estilo del órgano para controlar el timbre y tono.

El **Choralcello** también incorporó un mecanismo de rodillo de papel al estilo del de la pianola y un sistema de tablero de pedal de 32 notas. La máquina entera podía ocupar dos sótanos de una casa; los teclados y los altavoces eran las únicas piezas visibles del instrumento.

Guillermo Du Bois Duddell y "cantar Arc" (1899)

Antes de que **Thomas Alva Edison** inventara la iluminación eléctrica de calle, la iluminación con arco de carbón se extendía por toda Europa.

El problema con este método de iluminación, aparte de la matidez de la luz y del uso insuficiente de la electricidad, era el ruido constante del tarareo del arco. Designaron al físico británico **Guillermo Duddell** para solucionar el problema en Londres en 1899 y durante sus experimentos encontró que variando el voltaje provisto a las lámparas se podían crear frecuencias audibles controlables.



Figura 4: Lámpara de arco de carbón

Uniéndolo a un teclado a las lámparas de arco **Duddell** creó el primer instrumento electrónico que era audible sin usar el sistema de teléfono como amplificador/altavoz.

Elisha Gray y "El Telégrafo musical" (1876)

**Elisha Gray** (Barnesville, Ohio, 1835 - Newtonville, Massachusetts, 1901) habría sido conocido por todo el mundo como el inventor del teléfono si **Alexander Graham Bell** no hubiera llegado una hora antes a la oficina de patentes. En su lugar, entró en la historia como el creador accidental de uno de los primeros instrumentos musicales electrónicos, **el telégrafo musical**.





Figura 5: E. Telégrafo musical

**Gray** descubrió que podría controlar el sonido que vibraba en el circuito electromagnético y al intentarlo inventó accidentalmente un oscilador básico. El "**telégrafo musical**" utilizaba cañas de acero para que las oscilaciones fueran creadas y transmitidas sobre una línea telefónica a través de los electroimanes.

**Gray** también construyó un dispositivo simple de altavoz en sus últimos modelos, que consistía en un diafragma que vibraba en un campo magnético para hacer el oscilador audible.

### **1.3.2 1915-1960: La era del tubo de vacío**

El ingeniero y prolífico inventor norteamericano **Lee De Forest** patentó el primer tubo de vacío o "el triodo" en 1906, un refinamiento de la válvula electrónica de **John A. Fleming**.

El uso principal del tubo de vacío estaba en la tecnología de radio pero De Forest descubrió que era posible producir sonidos audibles por un proceso conocido como vigésimo siglo de Heterodyning. El efecto de Heterodyning es creado por dos ondas acústicas altas de frecuencia similar pero que varían, se combinan y crean una frecuencia audible más baja, igual a la diferencia entre las dos radiofrecuencias (aproximadamente de 20 hertzios a 20.000 hertzios).

De Forest en 1915 creó el "**piano del audión**". Otros instrumentos que explotaron el tubo de vacío fueron el "**Theremin**" (1917), "**Ondes Martenot**" (1928), el "**Sphäraphon**" (1921), y el "**Pianorad**" (1926).

"El Audión piano" de Lee De Forest

**Lee De Forest** inventó la válvula electrónica de triodo o "**la válvula audión**" en 1906, un desarrollo mucho más sensible que la válvula de diodo de **John A. Fleming**. El uso inmediato de la válvula del triodo de **De Forest** estaba en la tecnología de radio de la cual **De Forest** era un tenaz promotor.

**De Forest** también descubrió que la válvula era capaz de crear frecuencias de audio usando la técnica de la frecuencia heterodyning/beat (combinar dos señales de alta frecuencia para crear una frecuencia compuesta más baja dentro de la gama audible).

**"El Audión piano"** (1915) de **De Forest** fue el primer instrumento del tubo de vacío. Era un instrumento simple de teclado, pero era el primero en utilizar el sistema heterodyning. **De Forest** utilizó una sola válvula de triodo por octava que estaban controladas por un sistema de llaves.

La salida del instrumento era enviada a un sistema de altavoces que se podían colocar alrededor de un cuarto para dar al sonido un efecto dimensional. **De Forest** planeó una versión más avanzada del instrumento con válvulas separadas por llaves permitiendo la polifonía.



Figura 6: Válvula de triodo

Lev Sergeivitch Termen y "El Theremín" (1917)

El **Theremín** monofónico era un instrumento bastante raro que se tocaba sin que el intérprete tuviera que poner las manos encima. Dos antenas metálicas salían de una caja de madera; la vertical controlaba el tono y la horizontal el volumen.

Al mover las manos cerca de las antenas, la capacidad natural del cuerpo del intérprete provocaba fluctuaciones en los osciladores correspondientes, lo que causaba una subida del tono y un aumento del volumen.

Lev Termen (o Leo Theremín como se le conoció con posterioridad) ideó este nuevo concepto en 1917, cuando aún era ciudadano de la recién formada Unión Soviética. El instrumento básico se completó en 1920, y dos años después Theremín fue reclamado para presentar y demostrar su invención ante el mismísimo Lenin.



Figura 7: Termen tocando el Theremín

A diferencia de los anteriores instrumentos electrónicos, el **Theremín** no dejó nunca de utilizarse, y se convirtió en el instrumento único y duradero que todavía se emplea.

#### El Ondes-Martenot (1928)

El **Ondes-Martenot**, inventado en 1928 por el francés **Maurice Martenot**, era bastante parecido al **Theremin**, ya que utilizaba los mismos circuitos básicos para generar el sonido y podía producir ruidos parecidos.

Por contra, su extraña apariencia barroca (una especie de clavicordio acoplado a tres armarios) contradecía el hecho de que tocarlo resultase muy fácil. Además del teclado "estilo piano", el **Ondes-Martenot** contaba igualmente con un controlador de cinta que servía para imitar la forma de tocar el **Theremin**.

Esto último permitía obtener a la vez melodías precisas y barridos de cambios de tono. Los tres armarios eran un altavoz, un resonador de cuerdas (similar al cuerpo de una guitarra acústica) y un resonador tipo gong. Cada una de las unidades imprimía un timbre característico al sonido, que también podía modificarse con los controles incorporados al teclado.

En definitiva, el **Ondes-Martenot** fue un instrumento mucho más versátil que el **Theremín**, cuya limitación se establecía en un sólo sonido.

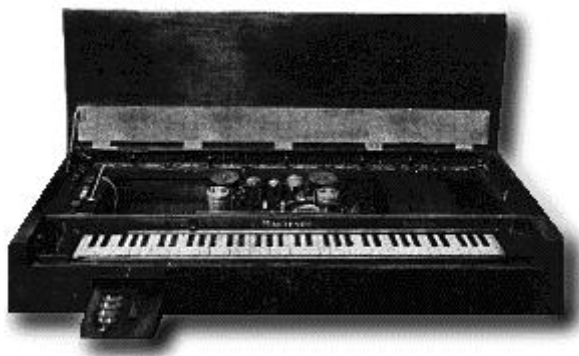


Figura 8: Versión temprana del Ondes-Martenot

Mientras que el **Theremín** se escucha con especial preponderancia en las composiciones de música pop y en bandas sonoras de hoy en día, el **Ondes-Martenot** sigue estando conceptualizado como un instrumento orquestal.

### El Electrophon, el Sphäraphon, el Partiturophon y el Kaleidophon

#### El Electrophon (1921)

La gama de instrumentos electrónicos **Sphäraphon** fue desarrollada en Berlín de 1921 a 1928 por el músico **Jörg Mager** específicamente para la música microtonal. El instrumento inicial, "**el Electrophon**", construido con la ayuda de la compañía electrónica **Lorenz**, era un instrumento basado en el generador Heterodyning.

El **Electrophon** estaba controlado por una manija que el músico movía a través de un dial semicircular que creaba un efecto continuo del glissando y no tenía ningún control manual del teclado.



Figura 9: Jörg Mager tocando el Kurbel-Sphäraphon (1923)

#### Kurbel-sphäraphon.

El **Kurbelsphäraphon** era un **Electrophon** mejorado con filtros que mejoraban el timbre y evitaban el glissando continuo. Tenía dos manijas y un pedal doble de pie para controlar el volumen.

El **Kurbel-Sphäraphon** fue terminado en 1923 y presentado en el festival de Donaueschingen en 1926 donde fue ignorado por todo el mundo. El compositor **Georgy Rimsky-Korsakov** (nieto del célebre compositor ruso) compuso algunas piezas experimentales para el instrumento.

#### El Partiturophon

El "**Partiturophon**" tenía cuatro (en modelos más últimos, cinco) teclados. Este instrumento permitía al intérprete tocar cuatro (o cinco) voces simultáneamente, una voz por teclado.



Figura 10: Jörg Mager con el "Partiturophon"

### El Kaleidophon

El "**Kaleidophon**" fue terminado en 1939 y aunque su historia está bastante indocumentada se describe como "un instrumento monofónico electrónico con mezclas".

Los instrumentos de **Mager** fueron utilizados principalmente en producciones de teatro en Alemania; no se sabe sin embargo si sobrevivió alguno a la Segunda Guerra Mundial.

### El Staccatone (1923)

El **Staccatone** fue diseñado por el periodista de radio **Hugo Gernsback**. El **Staccatone** utilizaba un determinado número de osciladores LC para producir una nota con tono agudo, ataque, y decaimiento.

### El Pianorad (1926)

El **Pianorad** era un desarrollo del **Staccatone** diseñado otra vez por **Gernsback** y construido por **Clyde Finch** en los laboratorios de radio de Nueva York.

El **Pianorad** tenía 25 osciladores. Cada uno de ellos tenía su propio altavoz independiente, montado en un cuerno grande del altavoz encima del teclado y el conjunto entero estaba contenido en una cubierta que se asemejaba a un harmonium. El **Pianorad** fue presentado el 12 de junio de 1926 en la estación de radio **WRNY** en New York City; y durante mucho tiempo acompañó conciertos de piano y violín.



Figura 11: El pianorad

### **1.3.3 1960-1980: Circuitos Integrados**

Los circuitos integrados nacieron a principios de los años 60. Robert Moog, Donald Buchla y otros crearon una nueva generación de instrumentos electrónicos de fácil uso, fiables y populares.

#### Robert Moog

A finales de 1963, a raíz de un encuentro casual con el profesor de música y compositor experimental **Herb Deutsch**, **Robert Moog** apartó los Theremíns y los amplificadores portátiles de guitarra para aplicar los osciladores electrónicos a un posible uso musical. Su trabajo en casa le llevó a conseguir la unión de varios circuitos, un par de osciladores, sendos amplificadores y un modulador.

Lo revolucionario del diseño de **Moog** fue su empleo del control de la tensión para variar el tono del oscilador o el volumen del amplificador.

Los instrumentos anteriores, como el Theremín, se basaban en condensadores que modificaban el tono de un oscilador, mientras que los teclados previos sólo recurrían a un conjunto de osciladores, uno por cada tecla, fijados de forma permanente a un tono definido.

El año siguiente, con la colaboración de **Herb Deutsch**, **Moog** presentó más circuitos controlados por tensión (incluido un filtro con un agradable carácter chillón) hasta que dio vida al primer Moog modular.

Los prototipos de **Moog** circularon entre los miembros de la comunidad académica musical y, en el otoño de 1964, **Moog** pudo por fin hacer una demostración del mismo en la **Audio Engineering Society**.

En esta convención, **Moog** ya recibió sus primeros pedidos, y descubrió que, en apenas tiempo, se encontraba sumergido de lleno en el negocio de la fabricación de sintetizadores modulares.

Muchos músicos interesados en los sintetizadores se desanimaron ante la realidad de siete u ocho metros cuadrados de armario sólido, repleto de botones conectados por medio kilómetro de cables.

La mayoría pidió algo más pequeño para poder transportarlo sin la ayuda de una maquinaria de elevación pesada, y su demanda recibió respuestas desde diversas fuentes.

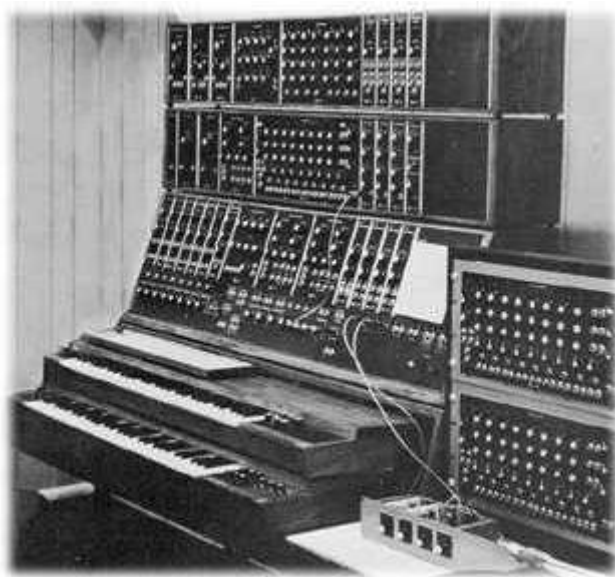


Figura 12: Moog Modular Synthesiser(1967)

El resultado fue el **VCS3**. Las siglas se referían a Voltage Controlled Synthesizer, mientras que la cifra describía su número de osciladores. Se trataba de una carcasa de madera con forma de L de unos 45 centímetros de altura, y lo bastante ligero como para que una sola persona pudiera transportarlo, lo que sin duda respondía a los sueños de cualquier intérprete de sintetizador.

Para empezar, el **VCS3** desarrollaba un concepto modular y utilizaba una matriz de pines en lugar de cables para conectar los diversos circuitos. Esto lo hizo muy flexible (razón por la que gustaba a mucha gente), aunque su resultado aún era desalentador (a muchos no les gustaban sus limitaciones).

También sufrió el efecto de unos **VCO** muy inestables, que causaban una pobre estabilidad tonal. Estas carencias motivaban que el VCS3 no aguantara afinado un concierto completo. No obstante, los fallos no disuadieron a un joven Brian Eno a la hora de subirse al escenario con un peinado estrafalario y un **VCS3** como instrumento de acompañamiento de **Roxy Music**, en 1971. Su intención era emplearlo a fondo para dar forma al sonido del grupo.

Pese a sus defectos, el **VCS3** fue el primer sintetizador portátil, ganando por poco incluso al más famoso y buscado instrumento de la posteridad.

El **MiniMoog** apareció en el verano de 1970, y se ha consagrado como el sintetizador más clásico de la historia. Aunque hoy es habitual, su camino de señal previo a la conexión supuso una enorme innovación que permitía al usuario tocar música desde que enchufaba el instrumento. Esto, junto al teclado incorporado, lo convirtieron en el sintetizador con el aspecto más amigable del mercado.

Si le añades su famoso sonido cálido, obtendrás la fórmula de un triunfador absoluto. O no... Lejos de recibir las alabanzas que su legendaria condición le reporta en la actualidad, en su momento las tiendas musicales americanas no recibieron con buenos ojos la existencia del **MiniMoog**.

Es más, no veían un mercado real para ningún sintetizador y durante el primer año de vida del aparato no cambiaron de opinión.

Por suerte para **Moog** (y para el mundo del sintetizador en general), un tal **Dave Van Koeveering** decidió montar su propia empresa para vender unidades de **MiniMoog** a tiendas musicales poco predispuestas, bajo la premisa de no aceptar nunca una negativa por respuesta.

Su mezcla de determinación y astutas técnicas de venta hizo que los comercios del ramo empezaran a llevarse el MiniMoog poco a poco. Ya a finales de 1971 comenzaba a formarse la leyenda que hoy conocemos.



Figura 13: Moog Minimoog

#### 1.3.4 1980-presente: Digital

La siguiente generación de instrumentos electrónicos fueron los sintetizadores digitales de los años 80. Estos sintetizadores eran de control complejo y se controlaban a partir de un software.

Posteriormente, con la rápida evolución de los ordenadores y el tratamiento de información, se desarrollaron nuevos programas de sintetizadores muy potentes, que permitían combinar múltiples sonidos y efectos sonoros de cualquier tipo.

Un ejemplo de ellos es el Fruity Loops Studio.



Figura 14: Fruity Loops Studio





Otro cambio significativo que se produce en esta época es la aparición de los videojuegos musicales y los instrumentos virtuales.

Nace una nueva forma de interactuar con el instrumento para crear música, gracias al uso de sensores de aceleración, infrarrojos, contacto, etc.

#### ALFOMBRAS DE BAILE

Aunque la Wii ha puesto de moda los juegos con más interactividad y que, incluso, representan una manera de hacer ejercicio divertida, lo cierto es que los orígenes de este tipo de actividades son bastante lejanos en el tiempo, y la propia Nintendo NES disponía de un controlador con el que podíamos realizar una función similar.



Figura 15: Power Pad

El Power Pad es un accesorio para la Nintendo NES en forma de alfombra, que se coloca en el suelo, y dispone de 12 sensores de presión que se activan pisando sobre ellos.

Pocos fueron los juegos que se desarrollaron para este accesorio, apenas unos 10.

La mayoría de ellos se basaban en coordinar los movimientos al pisar cada uno de los puntos o en hacerlo a gran velocidad.



Figura 16: Dance Dance revolution

Pero fue Dance Dance Revolution la que puso de moda las alfombras de baile. Este juego nació como una recreativa en 1998, cuando se distribuyó en Japón. La idea es similar a la de juegos como Guitar Hero, coordinar las acciones que debemos hacer con las que aparecen en pantalla, aunque en este caso se trata de pisar los diferentes puntos de la alfombra en el momento correspondiente, como si estuviéramos bailando.

Existen dos tipos de alfombras de baile: las duras y las blandas. Las duras, que son las que podemos encontrar en las recreativas, están fabricadas en metal o en madera y resisten mucho mejor el uso que las blandas. Pueden adquirirse también para usarlas en casa, aunque son más grandes y más caras.

Las blandas son más delgadas y, normalmente, están fabricadas en plástico, pudiendo plegarlas y guardarlas fácilmente.



Figura 17: Wii Balance Board



Aunque no es exactamente una pista de baile, la Wii Balance Board tiene un funcionamiento similar. Esta plataforma dispone de diversos sensores de presión con los que podemos controlar el movimiento de los personajes en pantalla.

#### WII REMOTE Y NUNCHUK:

En 2006 Nintendo lanzó al mercado su nueva consola Wii, con su innovador mando inalámbrico, Wii Remote.

El Wii Remote tiene la capacidad de detectar la aceleración a lo largo de tres ejes mediante la utilización de tres acelerómetros ADXL330. El Wiimote también cuenta con un sensor óptico PixArt, lo que le permite determinar el lugar al que el Wiimote está apuntando.

A diferencia de un mando que detecta la luz de una pantalla de televisión, el Wiimote detecta la luz de la barra sensor de la consola, lo que permite el uso coherente, independientemente del tipo o tamaño de la televisión.

La posición y seguimiento del movimiento del Wii Remote permite al jugador imitar las acciones reales de juego, como blandir una espada o tocar un tambor, en lugar de simplemente pulsar los botones.



**Figura 18: Wii Remote y Nunchuk**

Junto con la extensión del mando, Nunchuk, se pueden simular múltiples instrumentos musicales simplemente imitando sus movimientos característicos, lo que crea una nueva forma de crear música e interactuar con el “instrumento”.

#### **1.3.5 Conclusiones:**

Hemos visto de forma general la historia de los instrumentos musicales electrónicos, cómo se han ido desarrollando nuevos y mejores instrumentos a medida que avanzaba la tecnología.

Una vez visto esto, mi planteamiento de actuación va a ser analizar los principales tipos de sensores que en mi opinión, tienen más posibilidades dentro del mundo musical.

En este análisis vamos a ver las ventajas e inconvenientes que tiene cada tipo de sensor, sus posibles aplicaciones y algunos ejemplos de prototipos musicales ya desarrollados.

Lo que busco con esto es idear nuevas formas de tocar un instrumento, que sean divertidas, creativas y que sirvan, por qué no, para el diseño de nuevos instrumentos musicales en el futuro.

## 2. BÚSQUEDA DE SENSORES

### 2.1 Introducción

En este capítulo vamos a ver los principales tipos de sensores que he estudiado para su aplicación a funciones musicales.

### 2.2 Sensores de presión

Fundamento teórico:

La presión es una fuerza por unidad de superficie, y para su medida se procede bien a su comparación con otra fuerza conocida, bien a la detección de su efecto sobre un elemento elástico (medidas por deflexión).

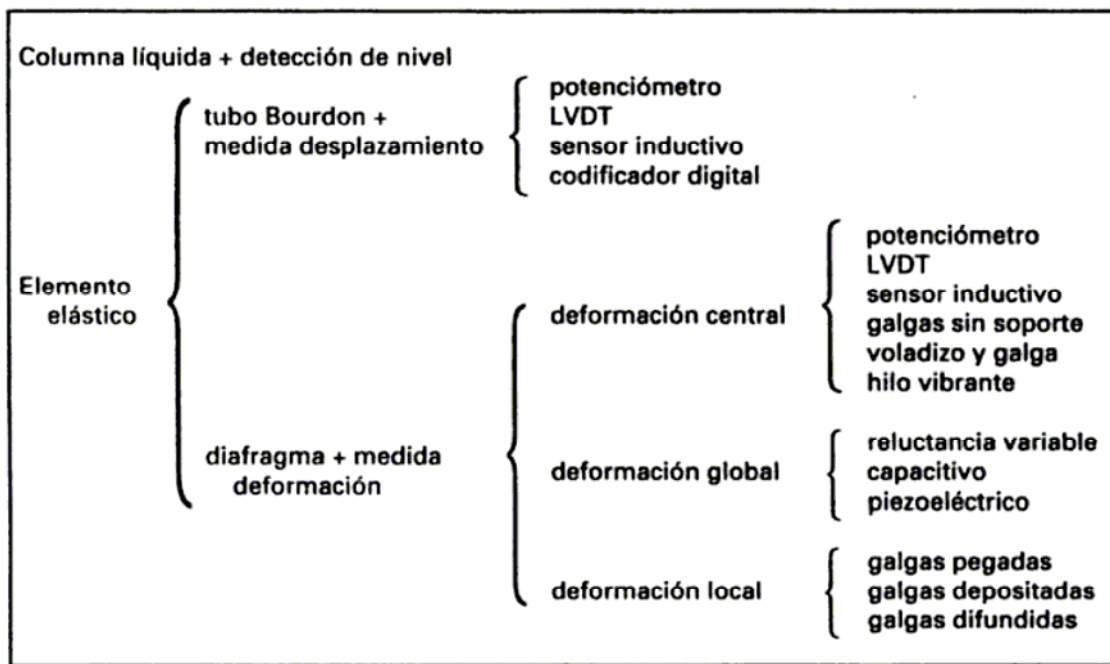


Figura 19: Algunas alternativas para la medida de presiones en el margen habitual

En los manómetros de columna de líquido, como el tubo en U de la figura 20, el resultado de la comparación de la presión a medir y una presión de referencia, si se desprecian efectos secundarios, es una diferencia de nivel de líquido  $h$ ,

$$h = \frac{P - P_{ref}}{\rho g}$$



donde  $\rho$  es la densidad del líquido y  $g$  es la aceleración de la gravedad.

Un sensor de nivel(fotoeléctrico, flotador, etc)permite entonces obtener una señal eléctrica.

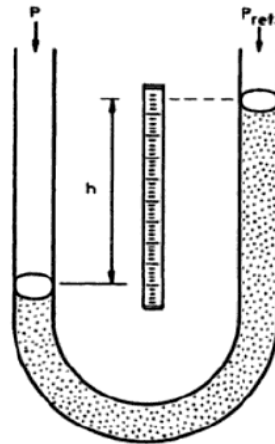


Figura 20: Manómetro en U

Al aplicar una presión a un elemento elástico, éste se deforma hasta el punto en que las tensiones internas igualan la presión aplicada. Según sean el material y la geometría empleados, el desplazamiento o deformación resultantes son más o menos amplios, pudiéndose aplicar luego unos u otros sensores.

Los dispositivos utilizados derivan bien del tubo Bourdon, bien del diafragma empotrado o sujeto por sus bordes.

#### Clasificación de los sensores de presión:

**-Mecánicos**

**-Neumáticos**

**-Electromecánicos.**

**-Electrónicos de vacío.**

De estos 4 tipos, vamos a centrarnos en los sensores de presión electromecánicos, que nos proporcionan una señal de salida interpretable eléctricamente. Los sensores de presión electrónicos están diseñados para operar con gases, y los mecánicos y neumáticos no proporcionan una señal de salida eléctrica.

### -Electromecánicos:

Formados por un elemento mecánico elástico mas un transductor eléctrico.

El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos.

#### Tipos:

##### 1. Resistivos:

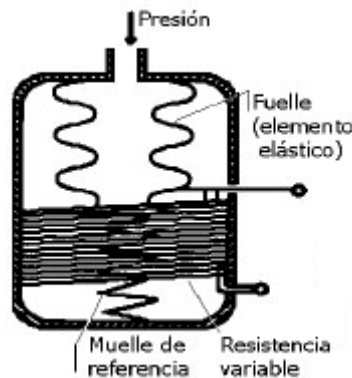


Figura 21: Transductor resistivo

- Consisten en un elemento elástico que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. Éste está conectado a un puente de Wheatstone.
- Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación.
- Son sensibles a la vibración.
- La señal de salida no es continua (salta de una espira a otra).
- El intervalo de medida de estos sensores/transmisores corresponden al elemento de presión que utilizan(tubo Bourdon, fuelle, etc) y varía en general de 0 a 300 kg/cm<sup>2</sup>.



## 2. Magnéticos:

### 1. De inductancia variable:

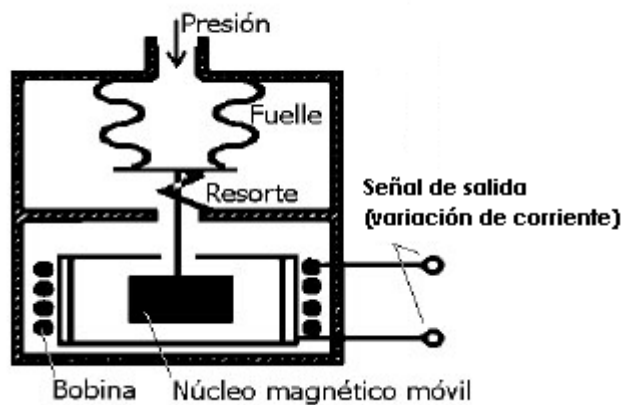


Figura 22: Transductor de inductancia variable

- El desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina. Esto hace aumentar la tensión inducida en el bobinado.
- No producen rozamiento en la medición.
- Tienen una respuesta lineal.
- Son pequeños y de construcción robusta.
- Su precisión es del orden del 1%.

### 2. De reactancia variable:

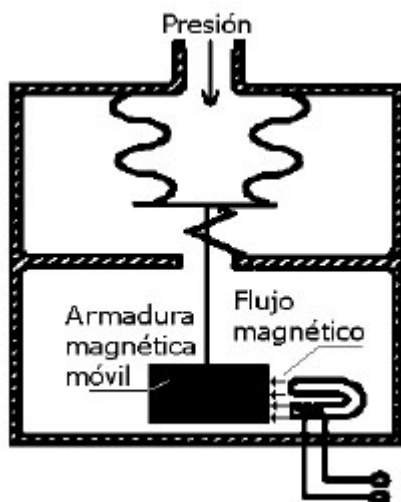


Figura 23: Transductor de reactancia variable.

- Consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético.
- El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante, con lo cual, al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.
- Alta sensibilidad a las vibraciones.
- Sensibles a la temperatura.

### 3. Capacitivos.

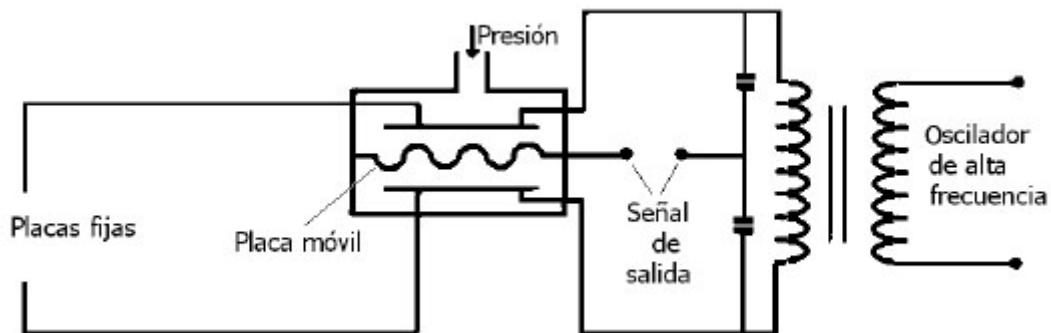


Figura 24. Transductor capacitivo

- Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión
- Consisten en dos condensadores, uno de capacidad fija (referencia) y el otro de capacidad variable, la cual da la medida.
- Pequeño tamaño, construcción robusta.
- Adecuados para medidas estáticas como dinámicas.
- Señal de salida débil, con lo cual requieren de amplificación en su salida.
- Sensibles a la variación de temperatura.
- Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0.5-600 bar y su precisión es del orden 0.2 a 0.5%.





#### 4. Transductores piezoeléctricos.

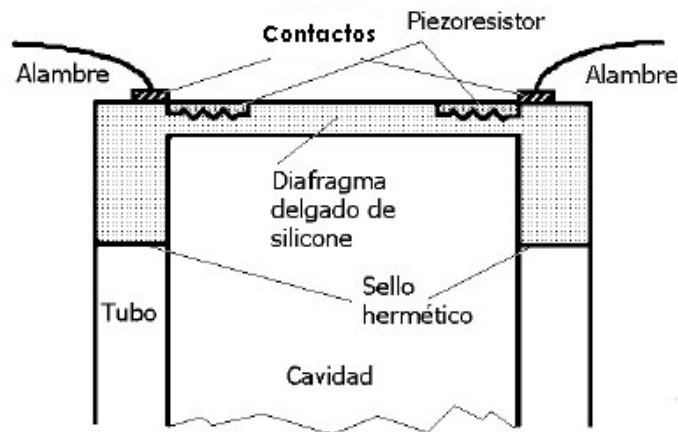


Figura 25. Transductor piezoeléctrico

- Se componen de elementos de estructura cristalina que al deformarse físicamente por la acción de la presión generan una señal eléctrica (aparece una polarización en el material deformado).
- El efecto es reversible, y al aplicar una diferencia de potencial entre dos de las caras de un material piezoeléctrico, aparece una deformación.
- Material de los transductores: cuarzo y titanato de Bario capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230° C en servicio intermitente.
- Ligeros, de pequeño tamaño y robustos.  
Adecuados para medidas dinámicas.  
Sensibles a los cambios de temperatura.
- Señal de salida relativamente débil, por lo que precisan amplificadores y acondicionadores de señal.

#### 5. Sensores de contacto

Los sensores de contacto nos indican simplemente si ha habido contacto o no con algún objeto. Suelen ser dispositivos sencillos cuyo uso es muy variado.

Estos sensores suelen ser interruptores de límite o microinterruptores, que son dispositivos eléctricos que cuando se contacta con ellos cambian de estado.

## CONCLUSIONES

Vamos a ver las ventajas e inconvenientes que tienen este tipo de sensores.

### Ventajas:

- Son de tamaño pequeño, por lo que se pueden poner en muchos objetos y prendas fácilmente.
- Facilidad de uso como interruptores de presión.

### Inconvenientes:

- Se produce un desgaste físico de los contactos del sensor.
- Depende del tipo pueden tener un precio alto.
- Pueden tener problemas con posibles vibraciones o movimientos bruscos.

Una vez visto los pros y contras, la opción más viable para estos sensores es su uso como interruptores de presión, de modo que obtenemos un control digital sobre la señal.

Al ser de tamaño pequeño, los podría llevar un artista camuflados en la ropa, o en objetos que utilice sobre el escenario, como por ejemplo una varita, un reloj de muñeca o simplemente adheridos en la palma de la mano. También se pueden poner en objetos móviles que no lleve el artista con él, pero habría que incluir comunicación inalámbrica para transmitir la señal.

El medio para interactuar con estos sensores es el contacto físico, lo que implica un desgaste con el tiempo.

El contacto se puede producir con cualquier objeto de cualquier material, siempre con la presión suficiente para hacer conmutar al sensor.

Se pueden poner, por ejemplo, pegados al suelo en diferentes lugares, de modo que el músico o artista pisa sobre ellos dando lugar a notas musicales, efectos sonoros, efectos de luces, etc. Vamos a ver dos ejemplos de aplicación.

### APLICACIONES MUSICALES:

Un ejemplo de aplicación de estos sensores es su uso en la suela de los zapatos de un músico/bailarín. Se ponen 2 sensores por zapato de la siguiente forma:

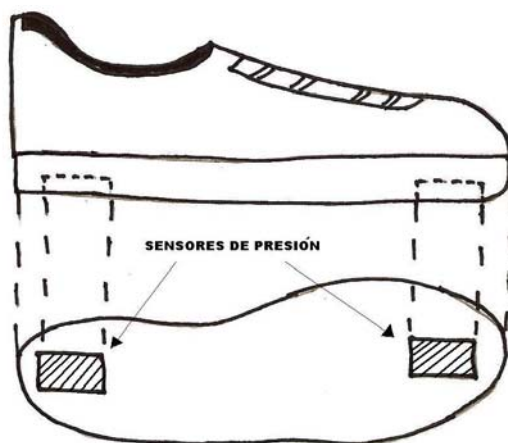


Figura 26. Zapatos con sensores de presión



El cableado de los sensores va camuflado por el tejido del zapato hasta un módulo de comunicación inalámbrica que lleva el artista adherido al cuerpo, y que transmite las señales al receptor (ordenador, micro, etc) para reproducir los sonidos.

De esta forma, el artista interactúa con los sensores apoyando el talón o la puntera del pie, pudiendo así crear ritmos musicales conforme hace una coreografía y se va moviendo por el escenario.

También lo pueden utilizar aquellos artistas que ya están tocando un instrumento con las manos de pie o sentados, creando así un ritmo distinto de sonidos musicales.

Otro ejemplo de aplicación puede ser unas maracas musicales, utilizando sensores piezoeléctricos, por ejemplo.



Figura 27: Maracas musicales

El cableado puede ir pegado al brazo o usar comunicación inalámbrica. Se obtiene de este modo un instrumento real, con una apariencia muy similar al original, pero con una fuente de sonido muy diferente.

## **2.3 Sensores de luz**

### Fundamento teórico:

La luz es una onda electromagnética capaz de ser percibida por el ojo humano y cuya frecuencia determina su color.

En términos generales, el espectro electromagnético abarca, según un orden creciente de frecuencia:

- Las de radio.
- Las microondas
- Los rayos infrarrojos.
- La luz visible
- la radiación ultravioleta.
- Los rayos X.
- Los rayos gamma.



Figura 28: Colores según longitud de onda

La luz visible forma parte de una estrecha franja que va desde longitudes de onda de 380 nm(violeta) hasta los 780 nm(rojo). Los colores del espectro se ordenan como en el arco iris, formando el llamado espectro visible.

Frecuencia y longitud de onda se relacionan por la expresión:

$$C = f * \lambda$$

donde **C** es la velocidad de la luz en el vacío, frecuencia **f** ó  $\nu$ , y longitud de onda  **$\lambda$** .

Existen dos tipos de objetos visibles: aquellos que por sí mismos emiten luz y los que la reflejan. El color de estos depende del espectro de la luz que incide y de la absorción del objeto, la cual determina qué ondas son reflejadas.

La luz blanca se produce cuando todas las longitudes de onda del espectro visible están presentes en proporciones e intensidades iguales.

Las ondas que tienen menor frecuencia que la luz (por ejemplo las de radio), tienen mayor longitud de onda, por eso rodean los objetos sin interactuar con ellos, las ondas de mayor frecuencia que la luz tienen una longitud de onda tan pequeña que atraviesan la materia, por ejemplo los rayos X atraviesan algunos materiales como la carne humana, aunque no los huesos.

Es sólo en la franja del espectro que va desde el violeta hasta el rojo donde las ondas electromagnéticas interactúan (se reflejan o absorben) con la materia y nos permiten ver los objetos, sus formas, su posición, y dentro de esta franja del espectro podemos determinar



---

qué frecuencia o conjunto de frecuencias refleja o emite cada objeto, es decir, el color que tiene.

#### Tipos de sensores de luz.

##### Fotodiodos:

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz.

El mecanismo básico de operación de estos dispositivos tiene su origen en la generación de pares electrón-hueco como consecuencia de la aplicación de una iluminación exterior.

El material empleado en la composición de un fotodiodo es un factor crítico para definir sus propiedades. Suelen estar compuestos de silicio, sensible a la luz visible (longitud de onda de hasta 1  $\mu\text{m}$ ); germanio para luz infrarroja (longitud de onda hasta aprox. 1,8  $\mu\text{m}$ ); o de cualquier otro material semiconductor.

##### Fototransistores:

Se llama fototransistor a un transistor sensible a la luz, normalmente a los infrarrojos. La luz incide sobre la región de base, generando portadores en ella. Esta carga de base lleva el transistor al estado de conducción. El fototransistor es más sensible que el fotodiodo por el efecto de ganancia propio del transistor.

En el mercado se encuentran fototransistores tanto con conexión de base como sin ella y tanto en cápsulas plásticas como metálicas (TO-72, TO-5) provistas de una lente.

Se han utilizado en lectores de cinta y tarjetas perforadas, lápices ópticos, etc. Para comunicaciones con fibra óptica se prefiere usar detectores con fotodiodos p-i-n.

##### Fotorresistencias:

Una fotorresistencia es un componente electrónico cuya resistencia disminuye con el aumento de intensidad de luz incidente. Puede también ser llamado fotorresistor, fotoconductor, célula fotoeléctrica o resistor dependiente de la luz, cuya siglas, LDR, se originan de su nombre en inglés *light-dependent resistor*. Su cuerpo está formado por una célula o celda y dos patillas.

El valor de resistencia eléctrica de un LDR es bajo cuando hay luz incidiendo en él (puede descender hasta 50 ohms) y muy alto cuando está a oscuras (varios megaohmnios).

La variación del valor de la resistencia tiene cierto retardo, diferente si se pasa de oscuro a iluminado o de iluminado a oscuro. Esto limita a no usar los LDR en aplicaciones en las que la señal luminosa varía con rapidez. El tiempo de respuesta típico de un LDR está en el orden de una décima de segundo.

Esta lentitud da ventaja en algunas aplicaciones, ya que se filtran variaciones rápidas de iluminación que podrían hacer inestable un sensor (ej. tubo fluorescente alimentado por corriente alterna). En otras aplicaciones (saber si es de día o es de noche) la lentitud de la detección no es importante.

Una vez visto como funcionan, vamos a ver las ventajas e inconvenientes de este tipo de sensores.

#### Ventajas:

- Son de tamaño reducido, por lo que se pueden colocar en muchos objetos y prendas fácilmente.
- Su precio es accesible.
- Se pueden utilizar como interruptores dependientes de luz, distinguiendo umbrales.
- Desgaste mínimo al no hacer contacto sobre ellos.

#### Inconvenientes:

- Deben ir al descubierto para que la luz incida sobre ellos.
- No funciona en entornos oscuros, necesitan una fuente de luz para funcionar

Vistas las ventajas y desventajas, vamos a ver cómo se pueden usar para la interpretación musical.

Estos sensores se pueden utilizar bien como interruptores dependientes de luz, para obtener un control digital de la señal, o bien de una forma más analógica, para obtener una señal proporcional a la luz.

Son de tamaño pequeño, con lo que, al igual que los sensores de presión, se pueden colocar en prendas y objetos fácilmente. No necesitan contacto físico para funcionar, así que no conllevan desgaste con el tiempo.

Necesitan un emisor de luz para operar, este puede ser, según el entorno, luz natural, focos de luz, linternas, luz infrarroja, etc.

Operando como interruptores, se puede interactuar de dos modos:



1. El sensor no está orientado hacia ninguna fuente de luz, y es el artista o músico quien enfoca una fuente de luz para conmutarlo. Puede ser, por ejemplo, un músico con una linterna, que apunta en un escenario a varios lugares donde hay sensores de luz, y al hacerlo va sonando una melodía. O al revés, el músico puede llevar un traje o un objeto con varios sensores de luz acoplados, y se va moviendo por el escenario entre varios focos de luz, de modo que al pasar bajo la luz suene un efecto sonoro distinto.
2. El sensor está orientado hacia una fuente de luz permaneciendo conmutado, y es el artista quien irrumpe en ese haz ya sea con la mano, utilizando objetos, etc, para cambiar la señal. Se puede imaginar una serie de "chorros" de luz, cada uno con su foco de luz y sensor, dispuestos verticalmente, y que el músico irrumpa en cada uno con la mano, sonando una nota distinta.

Operando de forma analógica, se pueden conseguir parámetros musicales dependientes con la luz, por ejemplo, el tono, el volumen, ritmo musical, etc. El músico puede controlar con la mano o un objeto el flujo de luz que le llega al sensor, tapándolo más o menos de la fuente emisora.

Estos sensores no tienen que servir exclusivamente para dar conciertos o diseñar instrumentos solo con ellos, si no que pueden incluirse en espectáculos de baile, teatro, shows de magia, etc.

#### APLICACIONES MUSICALES

Un ejemplo claro del uso de estos sensores como elementos musicales es el del Thérémin óptico.

El Theremín óptico es una versión avanzada del clásico Theremín, no utiliza antenas, si no que el tono musical y el volumen son controlados por la luz que le llega a los sensores , normalmente de tipo LDR.

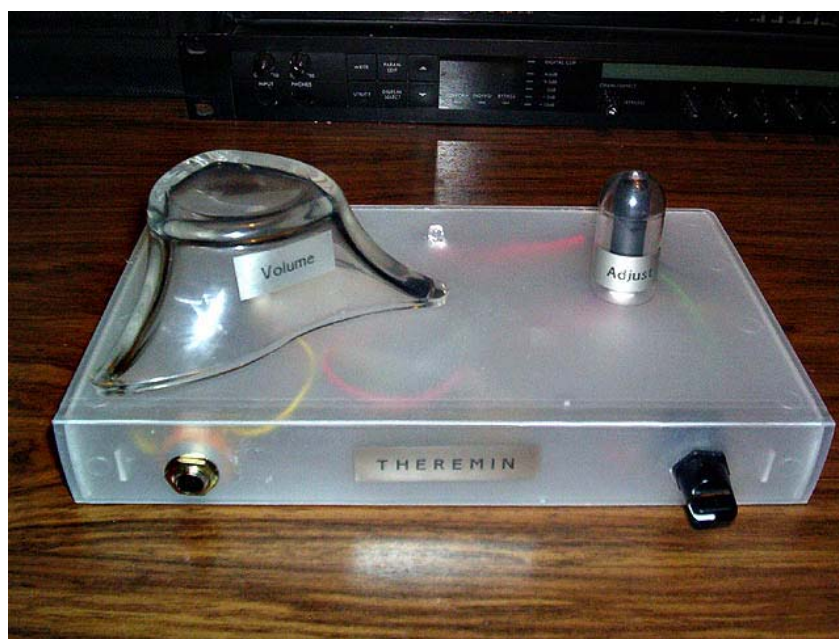


Figura 29: Theremín óptico

Acercando o alejando las manos se controla el flujo de radiación luminosa que llega a los sensores, consiguiendo así tonos mas graves o agudos.

## **2.4 Sensores de flexión**

Fundamento teórico.

Los sensores de flexión (bend sensors) miden el grado de deformación causado al doblarlos siguiendo una curvatura.

Los tres tipos de sensores de flexión mas comunes son:

- Sensores “*conductive ink-based*”
- Sensores de fibra óptica.
- Sensores basados en resistencia conductora.

Características de los sensores de flexión:

-Rango de flexión: determina el ángulo máximo de doblado que se puede medir.

-Sensibilidad uni- vs bi-direccional: algunos sensores incrementan su resistencia cuando son doblados dos direcciones opuestas, sin embargo no hay diferencias en la medida con respecto a la dirección en que se ha doblado.

-Sensibilidad uni- vs bi-polar: un sensor bipolar mide la flexión en dos direcciones contrarias dando medidas diferentes.

-Rango de resistencia: los sensores de flexión pueden variar notablemente (incluso el mismo producto) en términos de su rango de resistencia, medida como la diferencia entre su resistencia nominal y su resistencia en ángulo de doblado máximo.





Figura 30: Sensor de flexión

Una vez visto como funcionan, vamos a ver las ventajas e inconvenientes de este tipo de sensores.

Ventajas:

- Son de tamaño pequeño, por lo que se pueden adherir fácilmente a prendas o articulaciones.
- Se obtiene una señal de salida dependiente de la flexión realizada.

Inconvenientes:

- Su precio puede ser elevado.
- Sufren un desgaste físico al doblarlos.

Las posibilidades que ofrecen estos tipos de sensores están orientadas a la captura de movimientos, normalmente de una extremidad o articulación del cuerpo humano.

Normalmente operan de forma analógica, distinguiendo umbrales de flexión según la resistencia del sensor.

Como son de pequeño tamaño, se pueden colocar fácilmente sobre prendas, como guantes, coderas, rodilleras, que pueden ir camufladas bajo la ropa.

Pero se pueden poner también en objetos, por ejemplo, una barra de goma flexible, que al doblarla reproduzca un sonido de rotura.

El uso de estos sensores conlleva un desgaste físico al doblarlos, pudiendo dar problemas a largo plazo.

Se pueden conseguir movimientos que simulen, por ejemplo, estar tocando un instrumento musical como el violín, o convertir el cuerpo humano en un instrumento en sí mismo, depende de los movimientos que hagamos con piernas y brazos, pueden sonar diferentes tonos musicales.

### APLICACIONES MUSICALES

Un ejemplo de uso son los guantes de datos, que incorporan uno o más sensores de flexión en cada dedo, según el tipo.

Con estos guantes se puede identificar el movimiento de la mano, de los dedos, o de una parte de ellos, pudiendo así servir para la simulación e interpretación de instrumentos como la flauta, la guitarra o el piano.



Figura 31: Guante de datos

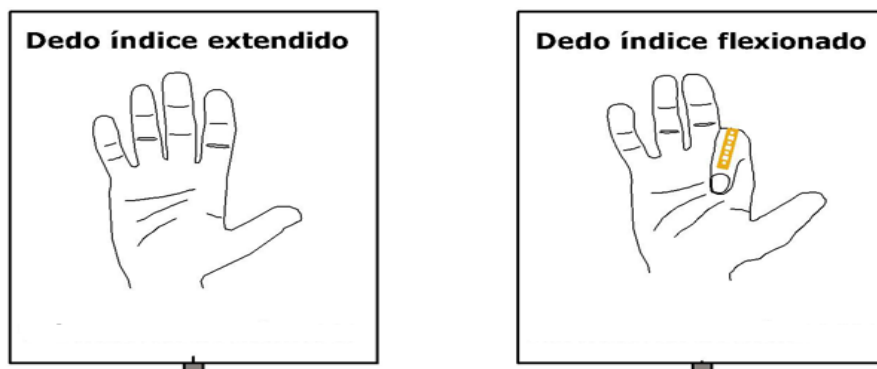


Figura 32: Sensor de flexión



## 2.5 Sensores inductivos y magnéticos

### Fundamento teórico:

La inductancia de un circuito indica la magnitud de flujo magnético que concatena debido a una corriente eléctrica. Si se trata de una corriente circulando por el propio circuito, se habla de autoinductancia,  $L$ .

En caso contrario, se habla de inductancia mutua. La inductancia se puede expresar como:

$$L = N \frac{d\phi}{di}$$

donde  $N$  es el número de vueltas del circuito,  $i$  la corriente y  $\phi$  el flujo magnético.

Los sensores inductivos hacen uso de las propiedades magnéticas de diversos materiales, y de las variaciones de diferentes parámetros asociados a los circuitos magnéticos (longitudes o secciones de núcleos, entrehierros, ...), para alterar la inductancia de bobinas normalmente fijas, consiguiendo variar la geometría del circuito magnético, permitiéndole detectar la presencia de objetos metálicos.

Cuando un metal conductor o placa metálica se mueven dentro de un campo magnético, sobre la placa o el metal se generan unas corrientes eléctricas conocidas como corrientes de Foucault.



Figura 33: Sensor inductivo

Este es el principio que usan la mayor parte de los sensores inductivos empleados en la industria. En ellos la bobina sensora está provista de un núcleo descubierto hacia el lado de detección, al aplicar tensión al sensor la bobina produce un campo magnético alterno de alta frecuencia, dirigido hacia el lado activo o sensible.

Al acercarse un metal al lado activo, se presenta en éste una inducción parásita y unas corrientes parásitas, las cuales influyen en el circuito oscilador, reduciendo la amplitud de oscilación y reduciendo el consumo de corriente del sensor. Estas señales son tratadas por el circuito rectificador y comparador, emitiendo la correspondiente señal de salida.

### Magnetorresistencias

La magnetorresistencia es una propiedad que tienen ciertos materiales de variar su resistencia eléctrica cuando son sometidas a un campo magnético. Este efecto fue descubierto por William Thomson en el 1857 aunque no fue capaz de disminuir la resistencia en más de un 5% (Hoy en día se llega hasta el 600%).

### Efecto Hall

El efecto Hall consiste en la aparición de un campo eléctrico en un conductor cuando es atravesado por un campo magnético. A este campo eléctrico se le llama campo Hall. Llamado efecto Hall en honor a su descubridor Edwin Duntey Hall.

El sensor de efecto Hall se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos o corrientes o para la determinación de la posición.

Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente.

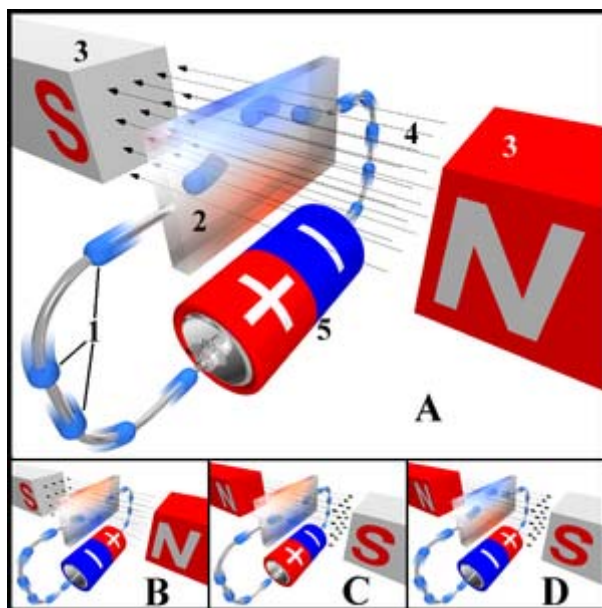


Figura 34: El efecto Hall

1. Electrones
2. Sensor o sonda Hall
3. Imanes
4. Campo magnético
5. Fuente de energía

Si se conoce el valor de la corriente, entonces se puede calcular la fuerza del campo magnético; si se crea el campo magnético por medio de corriente que circula por una



---

bobina o un conductor, entonces se puede medir el valor de la corriente en el conductor o bobina.

Vamos a ver las ventajas e inconvenientes de este tipo de sensores

#### Ventajas:

- Son de tamaño pequeño, por lo que se pueden colocar en objetos y prendas fácilmente.
- No se produce contacto físico, luego el desgaste es mínimo.
- Facilidad de uso como interruptores magnéticos.
- Su precio es accesible, según el tipo.

#### Inconvenientes:

- Sólo detectan objetos metálicos o campos magnéticos
- La distancia de detección suele ser pequeña.
- En magnetorresistencias y sensores Hall, el campo magnético debe estar orientado en una determinada dirección.

El modo de operación más adecuado de estos sensores para fines musicales es utilizarlos como interruptores, para obtener un control digital de la señal. Son de tamaño pequeño, por lo que se pueden colocar sobre prendas u objetos de forma sencilla. No implican contacto físico en la operación, con lo que no se produce desgaste al usarlos.

Se pueden utilizar de dos modos:

1. Para detectar objetos metálicos. El artista puede llevar, por ejemplo, prendas con alguna parte metálica, o un anillo de metal en el dedo, de forma que al pasarlo sobre los sensores inductivos éstos detectan el objeto y conmutan la señal.
2. Para interactuar con campos magnéticos. En este caso, lo más adecuado sería utilizar imanes para conmutar los sensores magnéticos. El artista puede llevar pequeños imanes en la mano, en la suela de los zapatos, o en objetos que manipule. Los sensores pueden estar colocados en instrumentos musicales, en el suelo, dispuestos sobre estructuras, etc.

De estos dos modos, el más adecuado en mi opinión es utilizar campos magnéticos, ya que los sensores de presencia inductivos son más caros que los magnéticos, y el precio de los imanes es accesible.

## APLICACIONES MUSICALES

Actualmente podemos encontrar sensores magnéticos bajo los teclados de los instrumentos de música modernos (órganos, órganos digitales, sintetizadores) evitando así el desgaste que sufren los contactos eléctricos tradicionales. Operan como interruptores para cada tecla, pero sin producirse contacto físico.



Figura 35: Órgano con sensores magnéticos

## **2.6 Acelerómetros**

Aunque el acelerómetro vamos a verlo en profundidad en el capítulo siguiente, lo he incluido aquí para ver sus ventajas e inconvenientes y compararlo con el resto de sensores estudiados.

### Fundamento teórico

La aceleración es una magnitud vectorial que nos indica el ritmo o tasa de cambio de la velocidad de un móvil por unidad de tiempo. En otras palabras, cuánta rapidez adquiere un objeto durante el transcurso de su movimiento, según una cantidad definida de tiempo.

### Tipos de acelerómetros

- Mecánicos: Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricas, incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación.
- Capacitivos: Modifican la posición relativa de las placas de un pequeño condensador cuando está sometido a aceleración.
- Piezoeléctricos: Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico. Una deformación física del material causa un cambio en la estructura cristalina y así cambian las características eléctricas.



- 
- Piezoresistivos: Una deformación física del material cambia el valor de las resistencias del puente.

El tipo más adecuado para nuestros propósitos es el acelerómetro capacitivo, que tiene las siguientes ventajas.

#### Ventajas:

- Su coste es bajo.
- Son de bajo ruido.
- Son de tamaño pequeño, muy manejables.
- Tienen muchas posibilidades de actuación y desarrollo.
- Su señal de salida es fácilmente interpretable.

#### Inconvenientes:

- Son de baja potencia

Este tipo de sensores tiene muchas posibilidades de desarrollo en el mundo artístico. Detectan los cambios de aceleración y la inclinación, con lo que se puede detectar prácticamente cualquier movimiento.

No implican contacto físico para funcionar, y su tamaño es pequeño, por lo que pueden ir acoplados en prendas u objetos fácilmente. Sus aplicaciones musicales son extensas, como veremos en el capítulo siguiente.

Se pueden simular muchos instrumentos musicales, como ha hecho la Wii con su mando Wii Remote.

Pero aparte de instrumentos se puede pensar también en juguetes musicales, por ejemplo, un frisby o plato volador con un acelerómetro adherido, que suena cuando se lanza y el tono del sonido depende de la velocidad de giro.

O unas paletas de ping-pong con un acelerómetro en el mango, según los movimientos que se hagan sonarán diferentes notas.

## 2.7 Conclusiones

Hemos visto el funcionamiento y características de 5 tipos de sensores que pueden dar juego en aplicaciones musicales, utilizando magnitudes como la presión, el magnetismo, el grado de flexión, la aceleración o una onda, como es la luz. El cuadro siguiente resume lo que hemos visto.

Tipo de sensor	Ventajas	Inconvenientes	Aplicaciones musicales
Presión	-Tamaño pequeño -Facilidad de uso como interruptores de presión	-Desgaste físico por el contacto -Precio elevado según el tipo	-Interruptores de presión -Zapatos musicales -Maracas musicales
Luz	-Tamaño pequeño -Precio accesible -No hay desgaste por contacto físico	-Deben estar al descubierto -No funcionan en entornos oscuros	-Theremin óptico -Interruptores dependientes de luz, distinguiendo umbrales
Flexión	-Tamaño pequeño	-El precio puede ser elevado -Desgaste físico al doblarlos	-Guantes de datos -Medidas de flexión en articulaciones
Inductivos y magnéticos	-Tamaño pequeño -No hay desgaste por contacto físico -Precio accesible	-Solo detectan objetos metálicos o campos magnéticos -Distancia de detección pequeña	-Contactos en teclados de instrumentos modernos -Interruptores magnéticos, usando imanes
Acelerómetros (tipo capacitivo)	-Tamaño pequeño -Bajo coste -Múltiples posibilidades de actuación -No hay desgaste por contacto físico	-Son de baja potencia	-Simulación instrumentos musicales -Juguetes musicales -Formas de tocar innovadoras

Además de este estudio, he analizado el acelerómetro de forma más profunda, realizando pruebas y circuitos con el objetivo de idear pequeños artefactos que creen música, aprovechando las posibilidades que ofrece este tipo de sensor.

He elegido el acelerómetro para estudiarlo más intensamente por los siguientes motivos:

- Es un tipo de sensor que ofrece muchas posibilidades de actuación y desarrollo.
- Están disponibles en el laboratorio.
- Cuentan con experiencia sobre acelerómetros en el departamento de electrónica.
- Son de tamaño pequeño, de precio accesible y manejables.
- Proporcionan una señal analógica fácilmente interpretable.





### **3. ACELERÓMETRO**

En este capítulo vamos a ver en profundidad el acelerómetro: cómo funciona, tipos de acelerómetros y aplicaciones musicales.

#### **3.1 Fundamentos teóricos: aceleración**

La aceleración es una magnitud vectorial que nos indica el ritmo o tasa de cambio de la velocidad de un móvil por unidad de tiempo. En otras palabras, cuánta rapidez adquiere un objeto durante el transcurso de su movimiento, según una cantidad definida de tiempo.

En el contexto de la mecánica vectorial newtoniana se representa normalmente por  $\vec{a}$  o  $\mathbf{a}$ . Sus dimensiones son [Longitud]/[Tiempo]<sup>2</sup>. Su unidad en el sistema internacional es el m/s<sup>2</sup>

En mecánica newtoniana, una partícula no puede seguir una trayectoria curva a menos que experimente una cierta aceleración, ya que si ésta no existiese su movimiento sería rectilíneo. Asimismo, cuando una partícula en movimiento rectilíneo cambia su velocidad implica la presencia de una aceleración (positiva si acelera, negativa si desacelera).

Algunos ejemplos del concepto de aceleración serían:

- La llamada aceleración de la gravedad en la Tierra es la aceleración que produce la fuerza gravitatoria terrestre; su valor en la superficie de la Tierra es, aproximadamente, de 9,8 m/s<sup>2</sup>. Esto quiere decir que si se dejara caer libremente un objeto, aumentaría su velocidad de caída a razón de 9,8 m/s por cada segundo que pasara (siempre que omitamos la resistencia aerodinámica del aire). El objeto caería, por tanto, cada vez más rápido, respondiendo dicha velocidad a la ecuación:

$$v = at = gt = 9.8 t$$

- Una maniobra de frenada de un vehículo, que se correspondería con una aceleración de signo negativo, o desaceleración, al oponerse a la velocidad que ya tenía el vehículo. Si el vehículo adquiriese más velocidad, a dicho efecto se le llamaría aceleración y, en este caso, sería de signo positivo.

#### **Aceleración media e instantánea**

Cada instante, o sea en cada punto de la trayectoria, queda definido un vector velocidad que, en general, cambia tanto en módulo como en dirección al pasar de un punto a otro de la trayectoria.

La dirección de la velocidad cambiará debido a que la velocidad es tangente a la trayectoria y ésta, por lo general, no es rectilínea.

En la figura 36 se representan los vectores velocidad correspondientes a los instantes  $t$  y  $t+\Delta t$ , cuando la partícula pasa por los puntos P y Q, respectivamente. El cambio vectorial en la velocidad de la partícula durante ese intervalo de tiempo está indicado por  $\Delta \mathbf{v}$ , en el triángulo vectorial al pie de la figura.

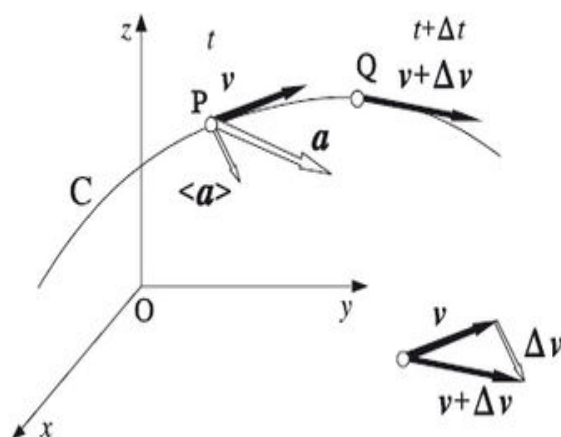


Figura 36: Aceleración de una partícula en un movimiento cualquiera

Definimos la **aceleración media** de la partícula, en el intervalo de tiempo  $\Delta t$ , como el cociente:

$$\langle \mathbf{a} \rangle = \bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$

que es un vector paralelo a  $\Delta \mathbf{v}$  y dependerá de la duración del intervalo de tiempo  $\Delta t$  considerado.

La aceleración instantánea la definiremos como el límite a que tiende el cociente incremental  $\Delta \mathbf{v} / \Delta t$  cuando  $\Delta t \rightarrow 0$ ; esto es, como la derivada del vector velocidad con respecto al tiempo:

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

Puesto que la velocidad instantánea  $\mathbf{v}$  a su vez es la derivada del vector de posición  $\mathbf{r}$  respecto al tiempo, la aceleración es la derivada segunda de dicho vector de posición con respecto del tiempo:

$$\mathbf{a} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}$$

#### Componentes intrínsecas de la aceleración: aceleraciones tangencial y normal

En tanto que el vector velocidad  $\mathbf{v}$  es tangente a la trayectoria, el vector aceleración  $\mathbf{a}$  puede descomponerse en dos componentes (llamadas componentes intrínsecas) mutuamente perpendiculares: una componente tangencial  $\mathbf{a}_t$  (en la dirección de la tangente a la trayectoria), llamada aceleración tangencial, y una componente normal  $\mathbf{a}_n$  (en la dirección de la normal principal a la trayectoria), llamada aceleración normal o centrípeta (este último nombre en razón a que siempre está dirigida hacia el centro de curvatura).

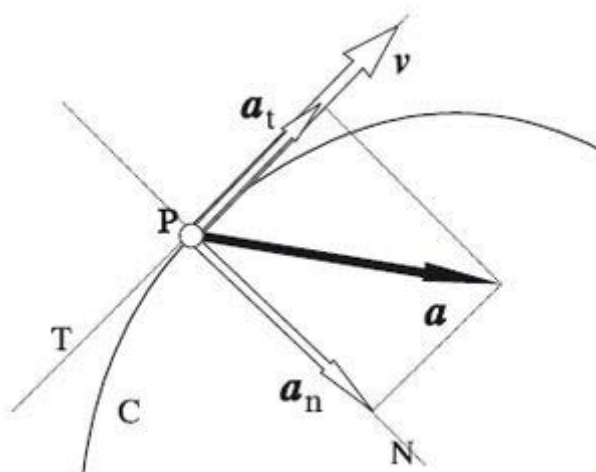


Figura 37: Componentes intrínsecas de la aceleración

Derivando la velocidad con respecto al tiempo, teniendo en cuenta que el vector tangente cambia de dirección al pasar de un punto a otro de la trayectoria (esto es, no es constante) obtenemos:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(v\hat{\mathbf{e}}_t) = \frac{dv}{dt}\hat{\mathbf{e}}_t + v\frac{d\hat{\mathbf{e}}_t}{dt} = \mathbf{a}_t\hat{\mathbf{e}}_t + v(\mathbf{w} \times \hat{\mathbf{e}}_t)$$

siendo  $\hat{\mathbf{e}}_t$  el versor tangente a la trayectoria en el mismo sentido que la velocidad y  $\mathbf{w}$  la velocidad angular. Resulta conveniente escribir la expresión anterior en la forma

$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt}\hat{\mathbf{e}}_t + \frac{v^2}{\rho}\hat{\mathbf{e}}_n = \mathbf{a}_t\hat{\mathbf{e}}_t + \mathbf{a}_n\hat{\mathbf{e}}_n$$

siendo:

- $\hat{\mathbf{e}}_n$  el versor a la trayectoria, esto es dirigido hacia el centro de curvatura de la misma,

- $\rho$  el radio de curvatura de la trayectoria, esto es el radio de la circunferencia osculatriz a la trayectoria.

Las magnitudes de estas dos componentes de la aceleración son:

$$\mathbf{a}_t = \frac{dv}{dt} \qquad \mathbf{a}_n = \frac{v^2}{\rho}$$

Cada una de estas dos componentes de la aceleración tiene un significado físico bien definido. Cuando una partícula se mueve, su celeridad puede cambiar y este cambio lo mide la aceleración tangencial. Pero si la trayectoria es curva también cambia la dirección de la velocidad y este cambio lo mide la aceleración normal.

- Si en el movimiento curvilíneo la celeridad es constante ( $v=cte$ ), la aceleración tangencial será nula, pero habrá una cierta aceleración normal, de modo que en un movimiento curvilíneo siempre habrá aceleración.
- Si el movimiento es circular, entonces el radio de curvatura es el radio  $R$  de la circunferencia y la aceleración normal se escribe como  $a_n = v^2/R$ .
- Si la trayectoria es rectilínea, entonces el radio de curvatura es infinito ( $\rho \rightarrow \infty$ ) de modo que  $a_n = 0$  (no hay cambio en la dirección de la velocidad) y la aceleración tangencial  $a_t$  será nula o no según que la celeridad sea o no constante.

Los versores que aparecen en las expresiones anteriores son los versores del triedro de Frenet que aparece en la geometría diferencial de curvas del siguiente modo:

$-\hat{e}_t$  es el versor tangente a la curva.

$-\hat{e}_n$  es el versor normal a la curva.

$-\mathbf{w}$  es el vector velocidad angular que es paralelo al versor binormal a la curva.

## **4.2 Acelerómetros**

Se denomina acelerómetro a un instrumento o sensor destinado a medir aceleraciones. Por la Ley Fundamental de la Dinámica o Segunda Ley de Newton, se sabe que:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

Donde "F" representa las fuerzas que actúan sobre la masa "m", y "a" es la aceleración.

Tipos de acelerómetros:

Mecánicos:

Emplean una masa inerte y resortes elásticos. Los cambios se miden con galgas extensiométricas, incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación.



Elementos:

- Masa
- Mecanismo de suspensión
- Sensor

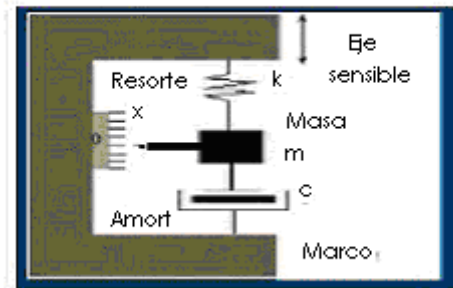


Figura 38: Estructura de un acelerómetro mecánico

Capacitivos:

Modifican la posición relativa de las placas de un pequeño condensador cuando está sometido a aceleración.

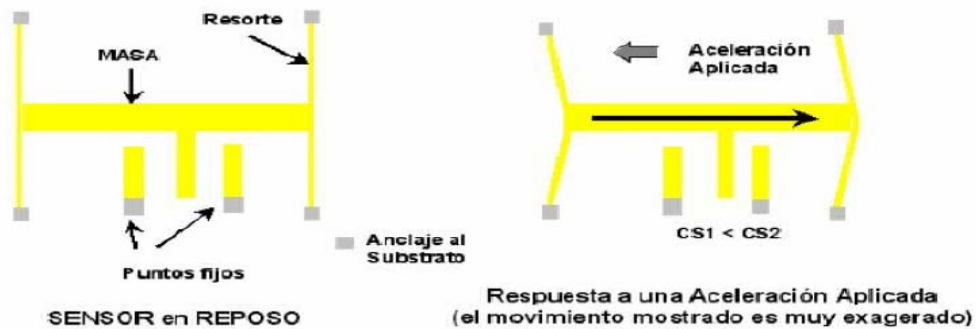


Figura 39: Acelerómetro capacitivo

Piezoeléctricos

Su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico. Una deformación física del material causa un cambio en la estructura cristalina y así cambian las características eléctricas.

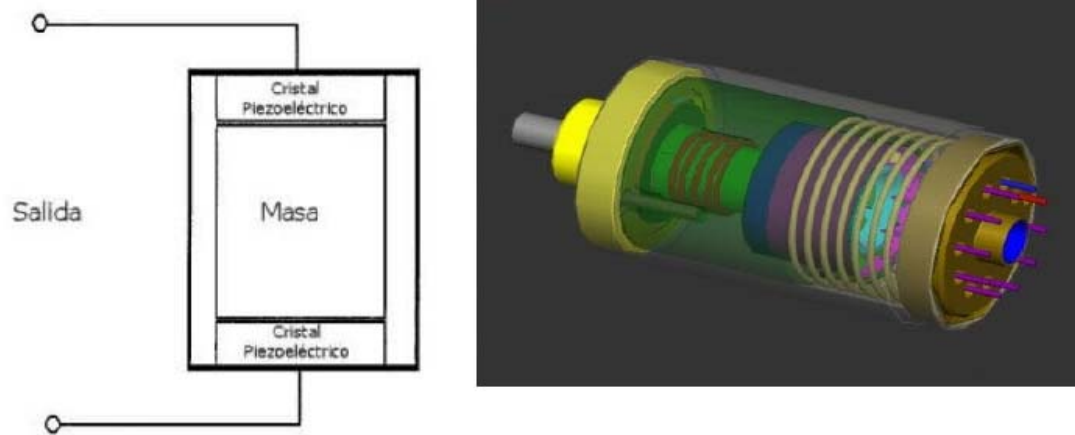


Figura 40: Acelerómetro piezoeléctrico

### Piezoresistivos

Una deformación física del material cambia el valor de las resistencias del puente.

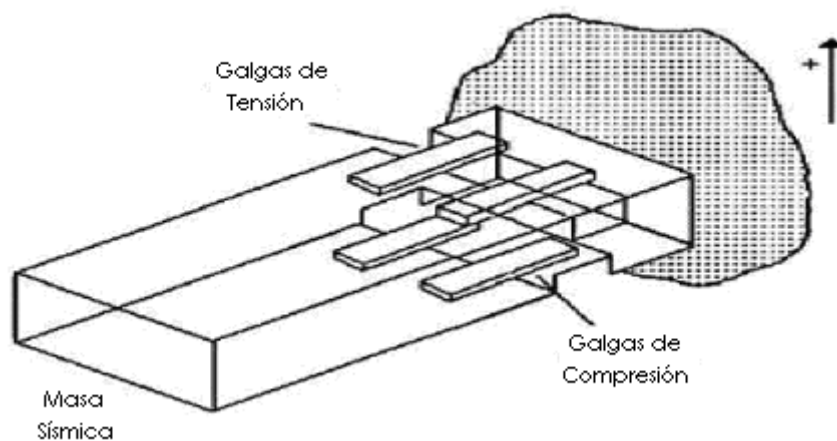


Figura 41: Acelerómetro piezoresistivo



<b>Tipo</b>	<b>Margen de medida</b>	<b>Ancho de banda (Hz)</b>	<b>Ventajas e inconvenientes</b>	<b>Aplicaciones</b>
Piezoeléctricos	0 a 2000g	10 a 20000	-Sensibilidad media -Uso complejo -Bajas temperaturas -No funcionan en continua	-Vibración -Impacto -Uso industrial
Piezoresistivos	0 a 2000g	0 a 10000	-Respuesta en alterna y continua -Prestaciones medias -Bajo coste -Tamaño y peso mínimo -Alta sensibilidad	-Vibración -Impacto -Automoción -Biodinámica -Ensayos en vuelo -Test en túneles de viento
Capacitivos	0 a 1000g	0 a 2000	-Funciona en continua -Bajo ruido -Baja potencia -Excelentes características -Bajo coste	-Uso general -Uso industrial -Sistemas de alarma y seguridad -Mediciones sísmicas
Mecánicos	0 a 200g	0 a 1000	-Alta precisión en continua -Lentos -Alto coste	-Navegación inercial -Guía de misiles -Herramientas -Nivelación

Figura 42: Tipos de acelerómetros

### 4.3 El acelerómetro ADXL330

El acelerómetro objeto de estudio ha sido el ADXL330 de Analog Devices. Es un acelerómetro de 3 ejes y bajo consumo, con una sensibilidad típica de 300mV/G. Su rango de detección es de  $\pm 3G$ , mide tanto aceleraciones dinámicas como estáticas y proporciona una tensión analógica de salida en cada eje.

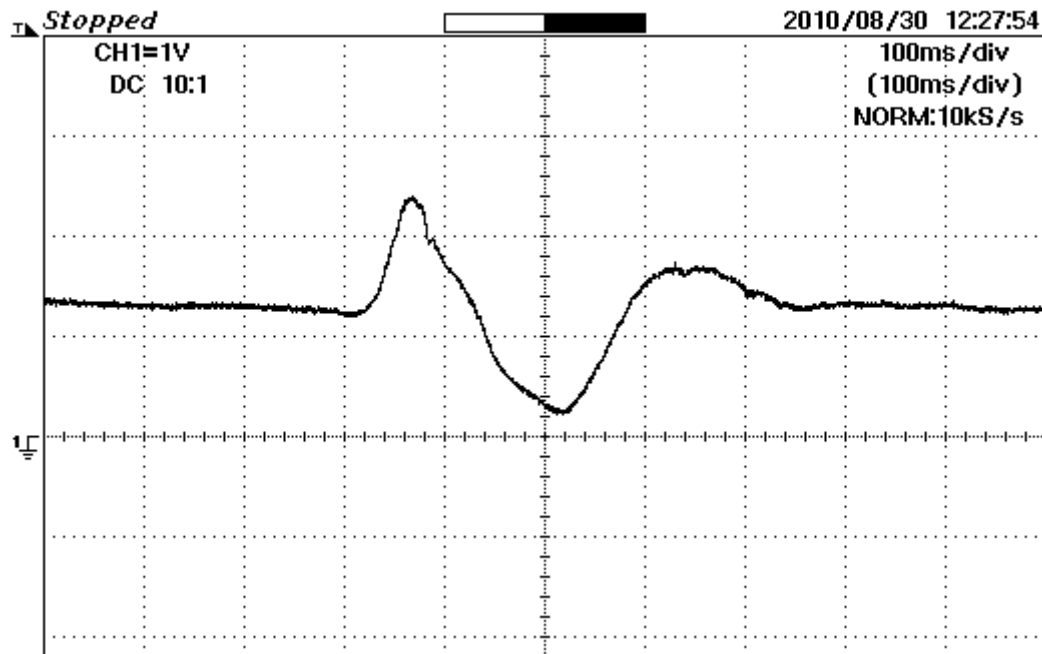


Figura 43: Forma de onda del eje para un movimiento típico de ida y vuelta

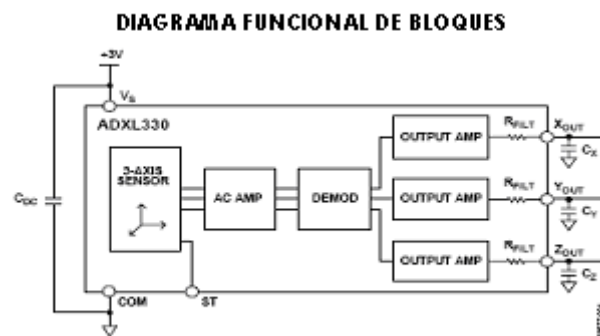


Figura 44: Diagrama funcional del ADXL330

El sensor es una superficie de polisilicio construida en la cima de una oblea de silicio (litografía).



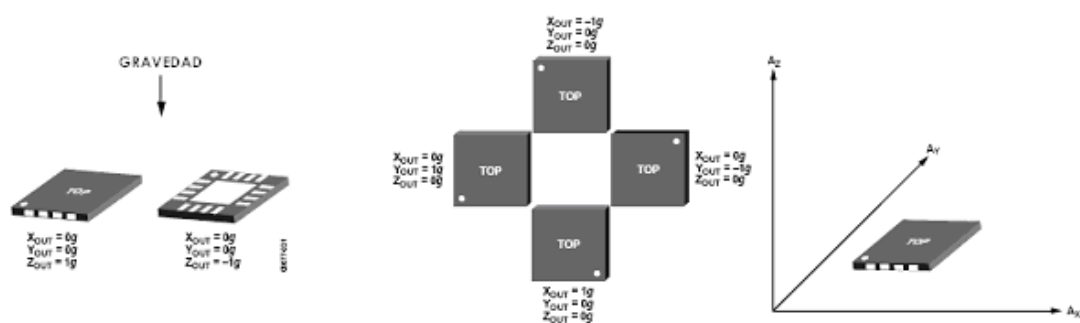


Figura 45: Ejes de aceleración

La deformación de la estructura es medida utilizando un condensador diferencial que consiste en placas fijas independientes y placas adjuntas a la masa sísmica en movimiento.

La aceleración desvía el movimiento de las masas y los desequilibrios modifican el condensador diferencial resultante, cuya amplitud es proporcional a la aceleración.

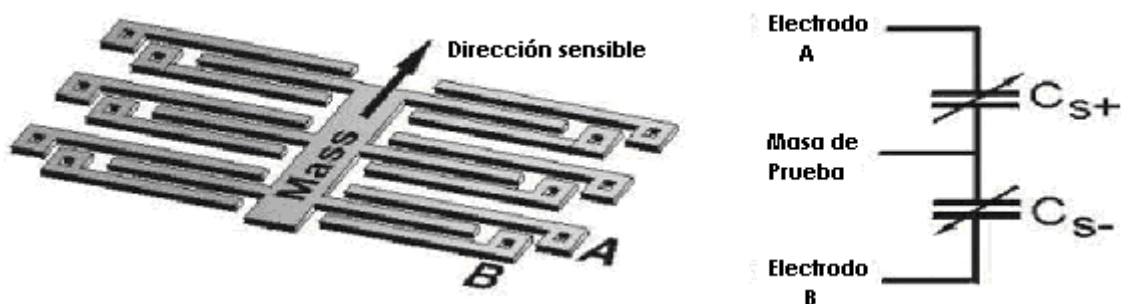


Figura 46: Sensor de aceleración

## **4.4 Aplicaciones musicales**

### PLANTEAMIENTO GENERAL

Una vez visto el funcionamiento teórico del ADXL330, se parte de una idea base con un fin musical.

A partir de un movimiento del acelerómetro(hay varias combinaciones, las veremos más adelante) se quiere obtener una nota o tono musical a través de un altavoz. Las pruebas las he efectuado con los circuitos montados sobre protoboards, normalmente cogidas con la mano, como si de una baqueta se tratase.

### TRATAMIENTO DE INFORMACIÓN

Para recibir y operar con las señales provenientes del bloque del acelerómetro se ha hecho necesario el uso de un microcontrolador, en este caso, he utilizado el MC9S08QG8 de Freescale.

El criterio de decisión principalmente está basado en el conocimiento de desarrollo de sistemas con micro estudiado hasta el momento de la realización de este proyecto, y que está limitado a la familia HCS08QG de Freescale de microcontroladores.

Características principales del QG8 enfocadas al desarrollo:

- 8 Kbytes de memoria FLASH
- 12 pines de entrada/salida, con corriente máx de salida = 10mA por pin.
- Timer interno con función de comparación
- Conversor A/D interno de 8 o 10 bits.

Los programas se han desarrollado en lenguaje C, y están disponibles tanto el código que he usado como los flujogramas en el **ANEXO** de la carpeta **DESARROLLOS** del cd.

### GENERACIÓN DE SONIDO

Tras evaluar varias opciones para generar el tono musical, me decidí implementar la generación de sonido mediante software, creando una envolvente ADSR en amplitud y aplicándola a una onda cuadrada, todo construido mediante programa desarrollado en lenguaje C.

ADSR - *Attack/Decay/Sustain/Release* (Ataque, Decaimiento, Sostenido y Relajación).

Son la estructura de las envolventes, que le dan el ciclo de vida a cada sonido. La curva comienza en cero, se eleva al máximo (ataque), baja hasta un nivel fijo (decaimiento), permanece ahí mientras se mantiene pulsada la nota (sostenimiento), y desciende hasta cero (liberación). No todos los instrumentos tienen las cuatro etapas.

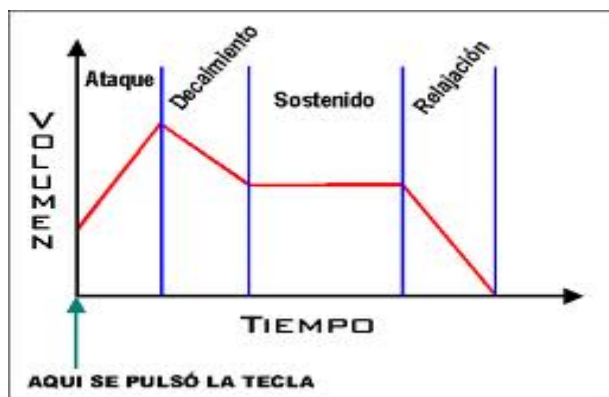


Figura 47: Envolvente ADSR

### **3.4.1 Aplicación: aceleración**

Esta aplicación musical se basa en la aceleración dinámica del acelerómetro, aplicada en cualquiera de sus tres ejes y en cualquier sentido.

#### **3.4.1.1 Planteamiento de interpretación**

La forma de interactuar con el "instrumento" se describe como un movimiento típico de baqueta de batería, como si de tocar una maraca se tratase.

Los sonidos se producen al efectuar un movimiento en la dirección de uno de los ejes, con la consiguiente aceleración del sensor.

El movimiento puede ser solo de ida, o de ida y vuelta, el programa evalúa y compara la pendiente de la señal del acelerómetro y autoriza o no la salida del tono.



Figura 48: Agarre del acelerómetro

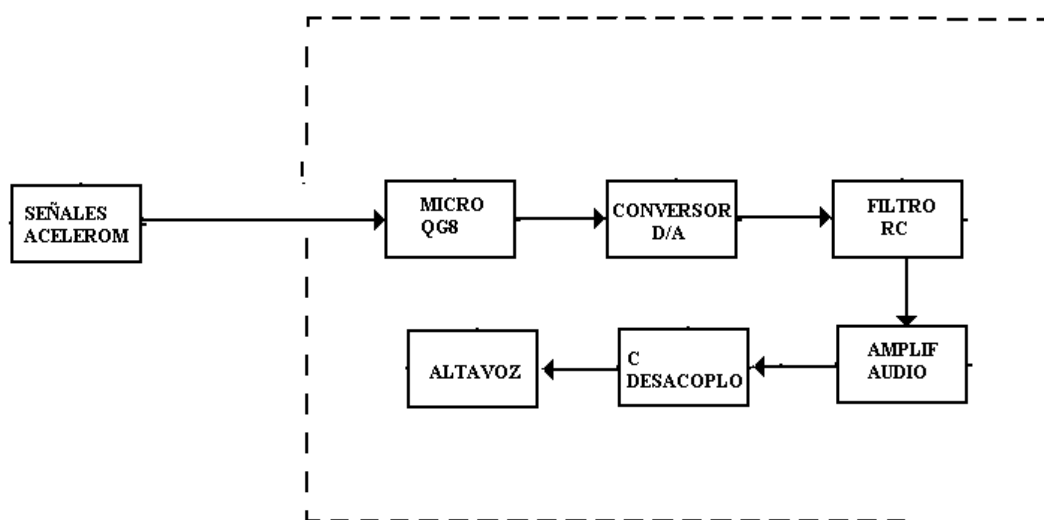
Distingue dos tipos de movimientos en cada sentido de cada eje: ataque rápido y ataque lento, dando para cada uno de ellos un sonido diferente.

### Condiciones

Para obtener una interpretación clara hay que evitar en lo posible los movimientos en diagonal o combinado, ya que el programa tomará la primera señal que cumpla las condiciones del tono y ejecutará el sonido correspondiente.

Al acabar de ejecutarse un sonido, el acelerómetro debe quedar en posición de reposo un instante (unos 24ms) para recuperar la referencia del offset de cada eje.

#### 3.4.1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES



Las tensiones de cada eje del acelerómetro van directamente al puerto de entrada del micro, donde se muestrean cada 8 ms y se convierten a digital usando su conversor AD interno.

Se trata la información recibida a través del programa, se toma la señal y se resta el nivel de offset(en reposo) previamente calculado.



Figura 49: Formas de onda de la señal de un eje

Una vez ejecutada la rutina, el micro pone en el puerto de salida una tensión digital en binario(8 bits), que se convierte a analógica pasando por el conversor DA.

La señal, ya analógica, pasa por un filtro RC paso bajo para eliminar las frecuencias más altas y el posible ruido.

Se aumenta a través de un amplificador de audio y se desacopla mediante un



condensador electrolítico. Finalmente la señal llega al altavoz donde es convertida en sonido.

### 3.4.1.3 CIRCUITO

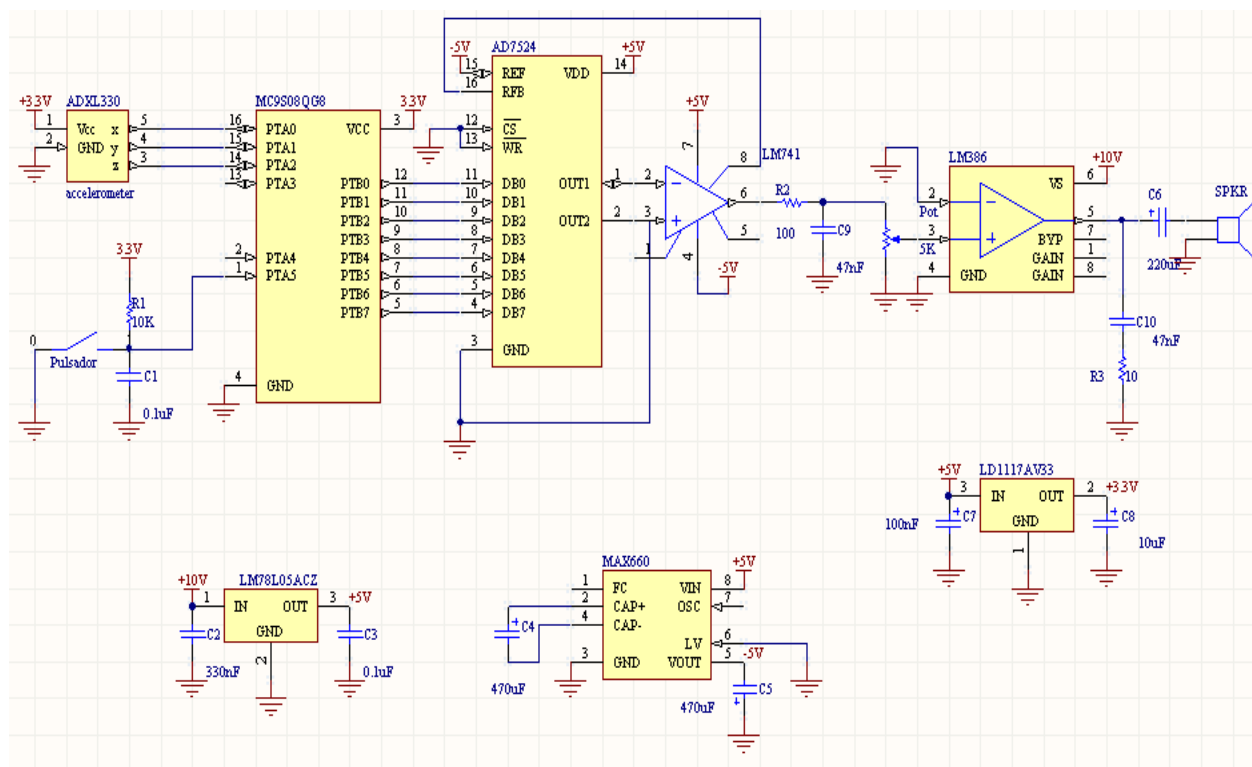


Figura 50: Circuito aceleración

El bloque se alimenta con una tensión de 10 voltios. A partir de ahí se generan tensiones de +5, -5 y 3.3 voltios, necesarias para el funcionamiento de los diferentes integrados.

El convertor D/A usado es el AD7524 de Analog Devices, operando en modo continuo (sin latch). Los reguladores usados para obtener las tensiones de alimentación son:

- LM7805: Regulador de voltaje positivo de +5 voltios, de National Semiconductor. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y dispone de protección interna ante sobrecargas térmicas y cortocircuitos.
- LD1117AV33: Regulador de voltaje positivo de +3.3 voltios, de ST Electronics. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y tiene una tensión de dropout baja, típica de 1.15 voltios (con corriente de salida de 1 A y temperatura de 25°C). Ésto permite alimentarlo desde la salida del regulador de 5 voltios, consumiendo menos potencia que si lo alimentamos desde 10 .
- MAX660: Regulador de capacidades conmutadas, de Maxim. En este caso opera en modo inversor, alimentado a 5 voltios, para dar en su salida -5. El integrado utiliza un oscilador interno para el control de los interruptores.

Los valores de condensadores de los reguladores son los mismos que recomiendan los fabricantes en sus datasheet.

El amplificador de audio utilizado es el LM386, de National Semiconductor.

Opera con un mínimo de componentes externos, la ganancia está fijada internamente a 20. Los valores de R3 y C10 son los recomendados en el datasheet para una mejor operación.

El circuito formado por el pulsador, R1 y C1 se usa para resetear el microcontrolador, los valores los he tomado de su datasheet.

El filtro RC formado por R2 y C9 tiene como finalidad eliminar las frecuencias altas y el posible ruido. He elegido una frecuencia de corte de unos 30 KHz. Para una onda periódica la frecuencia de corte es:

$$F_c = 1 / (2 \times \pi \times RC)$$

Con  $F_c = 30\text{KHz}$ , y tomando valores comerciales de R y C queda  $R = 100\ \Omega$  y  $C = 47\text{nF}$ .

El amplificador operacional LM741, de National Semiconductor, forma parte del conversor D/A, en su salida se toma la tensión analógica. Es un operacional de uso general.

### **3.4.2 Aplicación: inclinación**

Esta aplicación musical está basada en la aceleración estática del acelerómetro, producida por la gravedad en los tres ejes.

El ADXL330 proporciona en la salida de cada eje una tensión continua dependiente de la inclinación que tenga dicho eje con respecto a la dirección gravitatoria.

Esta tensión es máxima cuando la dirección del eje y el de la gravedad son paralelos, y su sentido el mismo, y mínima cuando tienen misma dirección pero sentidos opuestos.

Alimentando el acelerómetro a 3 V, los niveles de offset máximo y mínimo para cada eje han sido los mismos:

Misma dirección, mismo sentido(máximo) = 1.8 V

Misma dirección, sentido opuesto(mínimo) = 1.2 V

Direcciones eje-gravedad perpendiculares = 1.5 V

Esta funcionalidad del acelerómetro me ha servido para construir un inclinómetro, instrumento para medir inclinaciones, y obtener así una nueva forma de interactuar para generar tonos musicales.

#### **3.4.2.1 Planteamiento de interpretación**

He montado y probado esta aplicación musical utilizando 2 acelerómetros ADXL330, uno para cada mano.

La forma de "tocar" se describe a continuación.



Se coge un acelerómetro en cada mano(cada uno va montado en una protoboard), y se parte de una posición de referencia inicial. El agarre de los acelerómetros se asemeja a coger la empuñadura de una moto.

Para crear sonidos, se gira la muñeca hacia la izquierda, derecha, arriba o abajo, en cada situación sonará una nota distinta.

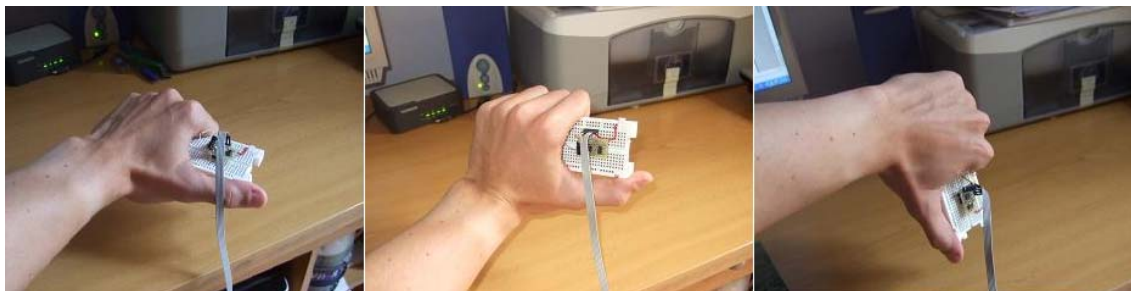


Figura 51: Inclinación del acelerómetro

Con la otra mano y el otro acelerómetro, los movimientos son exactamente los mismos, pero no se realizan para tocar una nota, si no para cambiar parámetros de ésta.

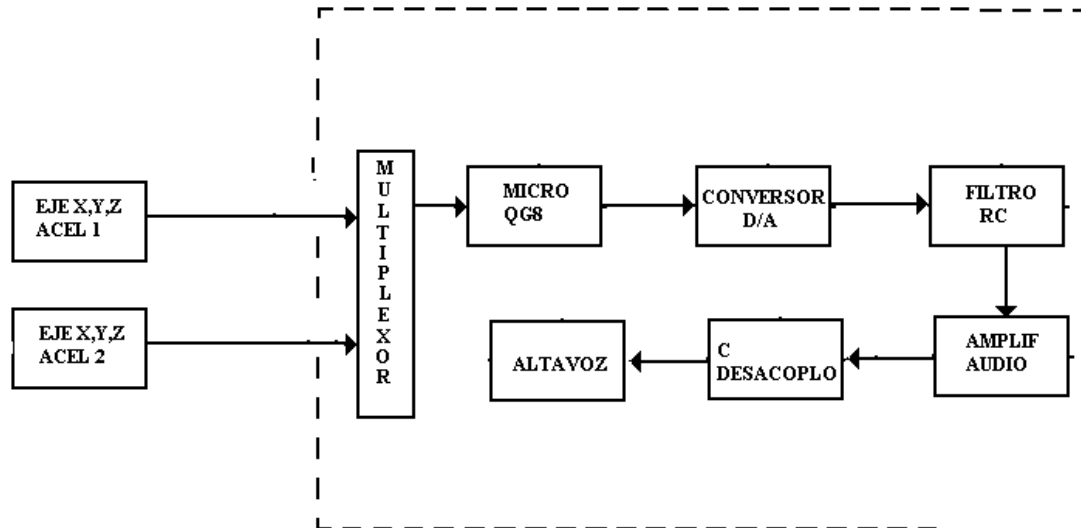
Por ejemplo, girando la mano hacia la izquierda consigo que todas las notas que toco con la mano derecha sean de un tono grave, si la giro hacia la izquierda, consigo tonos mas agudos, girando hacia arriba, obtengo notas de duración más larga, las combinaciones que se pueden lograr son muchas.

### Condiciones

Se empieza a tocar con una posición inicial de referencia establecida, de modo que en esa posición no suena nota alguna.

Al tocar una nota, hay que volver de nuevo a la posición inicial de referencia para tocar otra nota, aunque también he probado a mantener la misma nota encadenada sonando mientras se de la inclinación correspondiente.

### 3.4.2.2 DIAGRAMA DE BLOQUES



El proceso que siguen las señales es muy parecido al de la aplicación anterior, la diferencia está en que ahora hay dos acelerómetros.

Utilizo un multiplexor analógico de 8 canales para seleccionar una de las seis señales entrantes (3 de cada acelerómetro), ya que el puerto A del micro solo dispone de 4 pines entrada/salida.

De esta forma utilizo 3 pines del puerto como salida para seleccionar una de las 8 posibilidades del multiplexor, el pin restante del puerto es para la propia salida del multiplexor.

El proceso que siguen las señales hasta salir por el altavoz es exactamente el mismo que en el caso anterior.





### 3.4.2.3 CIRCUITO

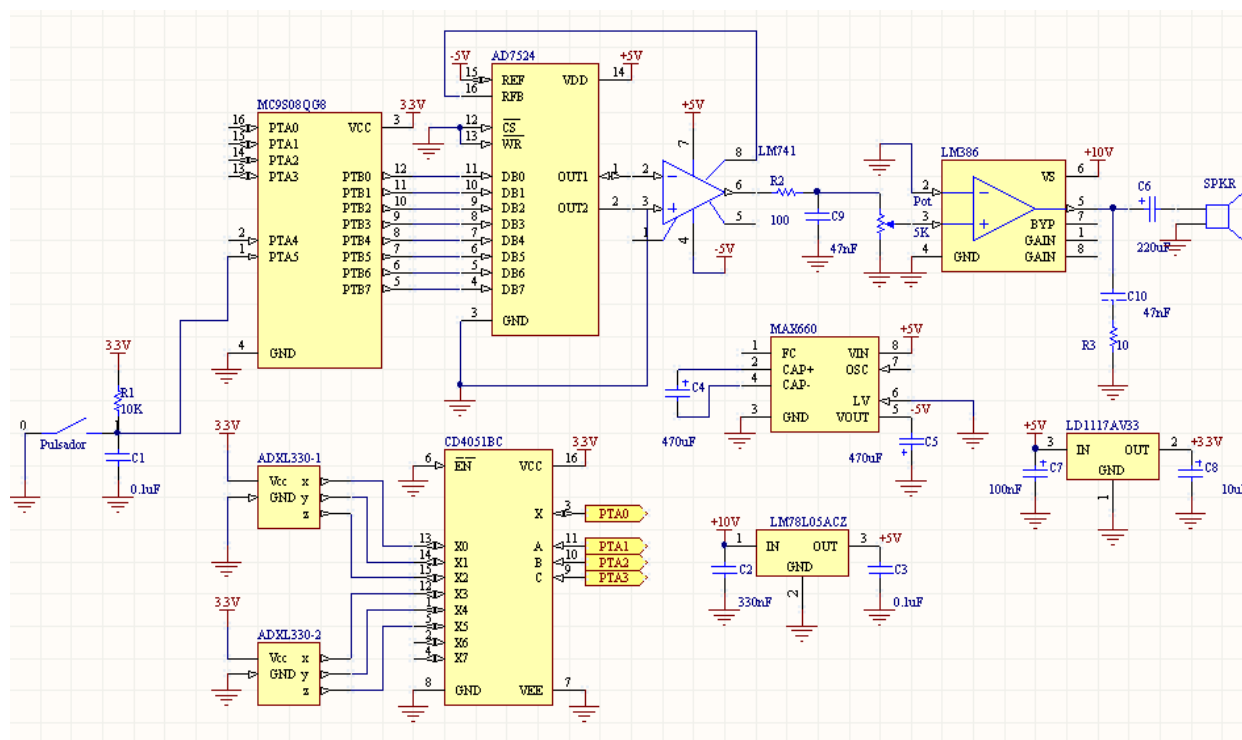


Figura 52: Circuito inclinación

El bloque se alimenta con una tensión de 10 voltios. A partir de ahí se generan tensiones de +5, -5 y 3.3 voltios, necesarias para el funcionamiento de los diferentes integrados.

El convertor D/A usado es el AD7524 de Analog Devices, operando en modo continuo (sin latch). Los reguladores usados para obtener las tensiones de alimentación son:

- LM7805: Regulador de voltaje positivo de +5 voltios, de National Semiconductor. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y dispone de protección interna ante sobrecargas térmicas y cortocircuitos.
- LD1117AV33: Regulador de voltaje positivo de +3.3 voltios, de ST Electronics. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y tiene una tensión de dropout baja, típica de 1.15 voltios (con corriente de salida de 1 A y temperatura de 25°C). Esto permite alimentarlo desde la salida del regulador de 5 voltios, consumiendo menos potencia que si lo alimentamos desde 10.
- MAX660: Regulador de capacidades conmutadas, de Maxim. En este caso opera en modo inversor, alimentado a 5 voltios, para dar en su salida -5. El integrado utiliza un oscilador interno para el control de los interruptores

Los valores de condensadores de los reguladores son los mismos que recomiendan los fabricantes en las datasheet.

El amplificador de audio utilizado es el LM386, de National Semiconductor.

Opera con un mínimo de componentes externos, la ganancia está fijada internamente a 20.

Los valores de R3 y C10 son los recomendados en la datasheet para una mejor operación. El circuito formado por el pulsador, R1 y C1 se usa para resetear el microcontrolador, los valores los he tomado de su datasheet.

El filtro RC formado por R2 y C9 tiene como finalidad eliminar las frecuencias altas y el posible ruido. He elegido una frecuencia de corte de unos 30 KHz. Para una onda periódica la frecuencia de corte es:

$$F_c = 1 / (2 \times \pi \times RC)$$

Con  $F_c = 30\text{KHz}$ , y tomando valores comerciales de R y C queda  $R = 100\Omega$  y  $C = 47\text{nF}$ .

El amplificador operacional LM741, de National Semiconductor, forma parte del conversor D/A, en su salida se toma la tensión analógica. Es un operacional de uso general.

El multiplexor analógico es el CD4051, de National Semiconductor. Dispone de 8 canales analógicos(en este caso usamos 6) y se alimenta a 3.3 voltios.



### 3.4.3 Aplicación: posición

Esta aplicación musical esta basada principalmente en la medida de posición relativa, en los ejes  $\underline{x}$  e  $\underline{y}$ .

Esta medida se obtiene a partir de la aceleración de cada movimiento.

Integrándola una vez con respecto al tiempo consigo una medida de velocidad, y si integro la velocidad respecto al tiempo consigo la posición.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad y \quad \vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} \quad \therefore \vec{a} = \frac{d(d\vec{s})}{dt^2}$$

$$v = \int (\vec{a}) dt \quad y \quad \vec{s} = \int (\vec{v}) dt \therefore \int \left( \int (\vec{a}) dt \right) dt$$

De este modo, a partir de la aceleración puedo obtener la posición, pero con un error considerable, como veremos ahora.

El método que he utilizado de integración ha sido una aproximación trapezoidal:

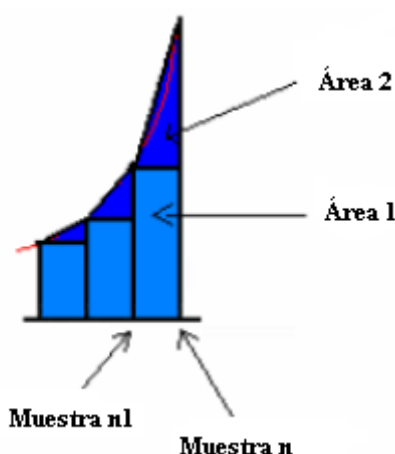


Figura 53: Señal muestreada por aproximación trapezoidal

Asumiendo el intervalo de tiempo entre muestras como la unidad(para eliminar multiplicaciones con fracciones y trabajar con números enteros) nos queda:

$$\text{Área } n = \text{Muestra } n + \frac{|\text{Muestra } n - \text{Muestra } n-1|}{2}$$

Repitiendo este proceso con la señal de velocidad obtenemos la posición:



Figura 54: Doble integración de la aceleración

Aunque de esta forma se obtiene una medida de posición, resulta prácticamente imposible mantener una referencia fija en el tiempo, y más utilizando este acelerómetro y micro, ya que el proceso de integración conlleva errores que se acumulan.

La prueba de esto la tuve al hacer un movimiento de ida y vuelta desde una posición fija. Teóricamente la velocidad tenía que ser cero al volver a la referencia, lo que no sucedía en ningún caso.

Por lo tanto, la aplicación que he desarrollado utilizando este método no tiene una posición de referencia fija, si no que se va reseteando cada cierto tiempo para borrar el error acumulado.

#### 3.4.3.1 Planteamiento de interpretación

La forma de interactuar con esta aplicación es a través de dos movimientos combinados, uno en el eje  $x$  o  $y$ , y el otro en el eje  $z$ .

La forma de coger el acelerómetro es la misma que la de la aplicación de aceleración, es decir, como si fuera una baqueta de batería.



Figura 55: Agarre del acelerómetro



A partir de esta posición, se realizan desplazamientos en los ejes  $x$ ,  $y$  o diagonales entre ambos, en cualquier sentido, seguidos de un pequeño movimiento en el eje  $z$ .

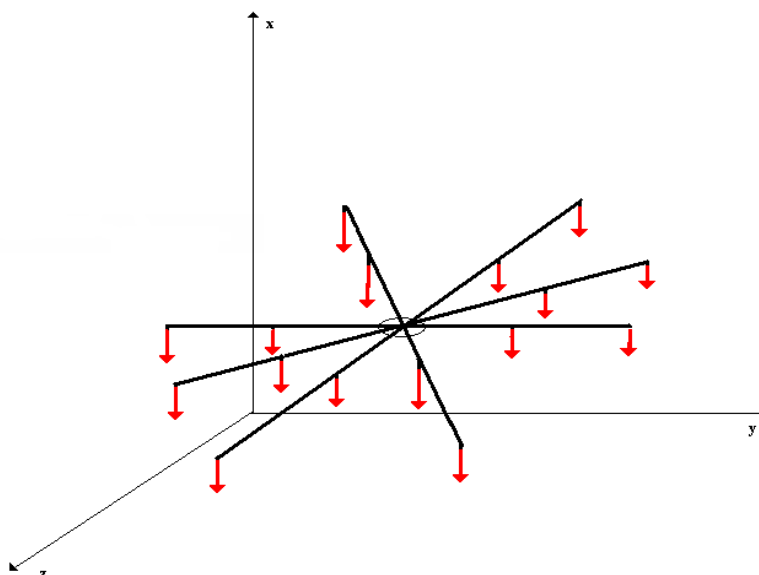


Figura 56: Mapa de movimientos tridimensional

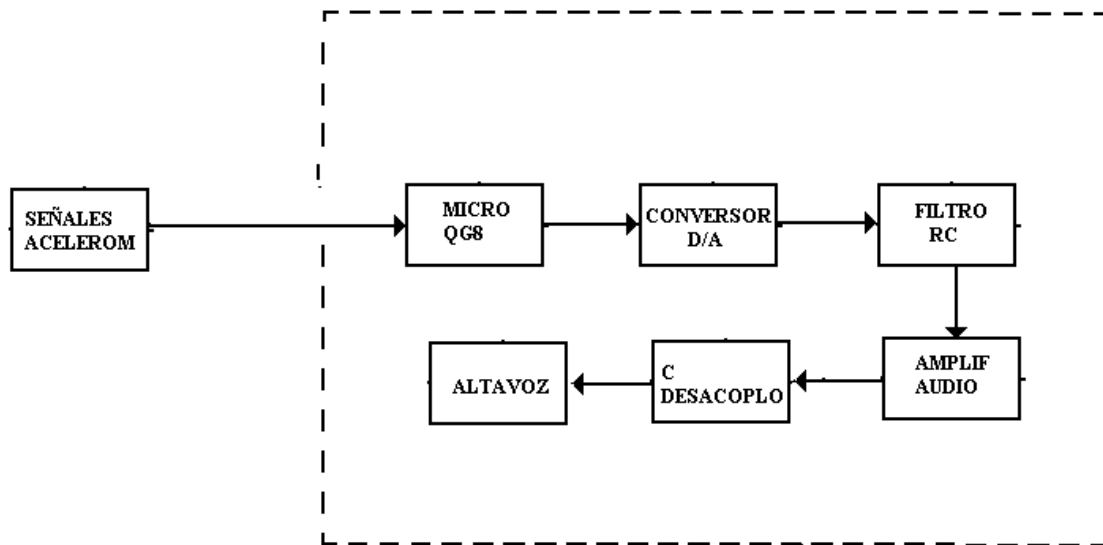
Como se ve en la figura, hay 16 movimientos posibles, ya que se distinguen 2 umbrales de posición en cada sentido de cada eje.

Cada movimiento puede dar lugar a un tipo de nota distinta, teniendo así 16 posibilidades de nota sonora.

#### Condiciones:

La única condición para tocar es mantener el acelerómetro (la placa en este caso) en su inclinación inicial, cuando calcula los valores de offset. Los movimientos deben realizarse manteniendo en lo posible esta inclinación respecto a los 3 ejes de referencia.

### 3.4.3.2 DIAGRAMA DE BLOQUES



Tanto el diagrama de bloques como el proceso que sigue la señal del acelerómetro son los mismos que para la aplicación de aceleración.

Los cambios mas notables de esta aplicación están en el programa de software, que está descrito en el ANEXO de la carpeta DESARROLLOS del cd.

### 3.4.3.3 CIRCUITO

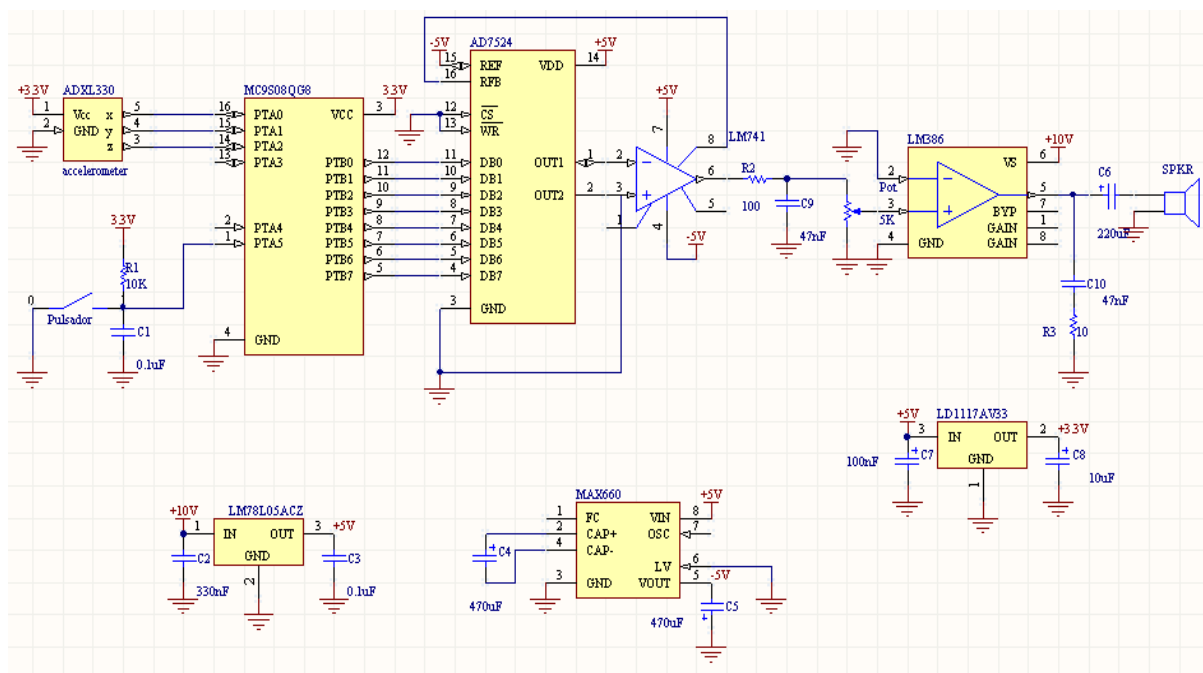


Figura 57: Circuito posición



El bloque se alimenta con una tensión de 10 voltios. A partir de ahí se generan tensiones de +5, -5 y 3.3 voltios, necesarias para el funcionamiento de los diferentes integrados.

El conversor D/A usado es el AD7524 de Analog Devices, operando en modo continuo (sin latch). Los reguladores usados para obtener las tensiones de alimentación son:

- LM7805: Regulador de voltaje positivo de +5 voltios, de National Semiconductor. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y dispone de protección interna ante sobrecargas térmicas y cortocircuitos.
- LD1117AV33: Regulador de voltaje positivo de +3.3 voltios, de ST Electronics. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y tiene una tensión de dropout baja, típica de 1.15 voltios (con corriente de salida de 1 A y temperatura de 25°C). Esto permite alimentarlo desde la salida del regulador de 5 voltios, consumiendo menos potencia que si lo alimentamos desde 10 .
- MAX660: Regulador de capacidades conmutadas, de Maxim. En este caso opera en modo inversor, alimentado a 5 voltios, para dar en su salida -5. El integrado utiliza un oscilador interno para el control de los interruptores

Los valores de condensadores de los reguladores son los mismos que recomiendan los fabricantes en las datasheet.

El amplificador de audio utilizado es el LM386, de National Semiconductor.

Opera con un mínimo de componentes externos, la ganancia está fijada internamente a 20. Los valores de R3 y C10 son los recomendados en la datasheet para una mejor operación.

El circuito formado por el pulsador, R1 y C1 se usa para resetear el microcontrolador, los valores los he tomado de su datasheet.

El filtro RC formado por R2 y C9 tiene como finalidad eliminar las frecuencias altas y el posible ruido. He elegido una frecuencia de corte de unos 30 KHz. Para una onda periódica la frecuencia de corte es:

$$F_c = 1 / (2 \times \pi \times RC)$$

Con  $F_c = 30\text{KHz}$ , y tomando valores comerciales de R y C queda  $R = 100\ \Omega$  y  $C = 47\text{nF}$ .

El amplificador operacional LM741, de National Semiconductor, forma parte del conversor D/A, en su salida se toma la tensión analógica. Es un operacional de uso general.

#### **4.5 Conclusiones**

Hemos visto tres modos de funcionamiento del acelerómetro, basándose en tres parámetros: aceleración, inclinación y posición relativa. El cuadro siguiente resume las características de cada uno.

<b>Modo</b>	<b>Forma de tocar</b>	<b>Condiciones de interpretación</b>	<b>Aplicaciones musicales</b>
Aceleración	Movimientos rápidos del acelerómetro	Hay que mantener una inclinación de referencia	Se puede poner en objetos que llevemos en la mano
Inclinación	Rotación del acelerómetro	Después de tocar una nota, hay que volver a la inclinación de referencia	Se puede poner en todo tipo de objetos o partes del cuerpo que podamos inclinar
Posición	Desplazamientos combinados del acelerómetro	Hay que mantener una inclinación de referencia	Se pueden crear mapas de posición relativa

Las aplicaciones musicales del acelerómetro son muchas. El sensor puede ir colocado en alguna prenda del artista, como guantes, zapatos, en la manga de una camisa, etc o en objetos que utilice como pueden ser baquetas, varitas, pelotas, en el mango de una guitarra...

Según los movimientos se puede utilizar un modo de funcionamiento u otro. Por ejemplo, el modo aceleración se puede aplicar a todo tipo de objetos que podamos mover y producirles cambios de aceleración, siempre manteniendo una inclinación de referencia. La mejor forma sería cogerlos con la mano, o pueden ir paralelos al eje de referencia, como un coche de juguete sobre el suelo.

El modo inclinación se puede aplicar a objetos que podamos girar o rotar, o a partes del cuerpo. Por ejemplo, podemos poner acelerómetros adheridos a los tobillos, de modo que cuando doblemos la rodilla subiendo el tobillo, el sensor se inclinará y dará lugar a una nota o melodía sonora. Se puede poner también dentro de un dado grande. Con el número uno en la cara superior estaría en reposo, pero una vez que se lanza y queda con otro número en esa cara sonaría una nota musical.





---

La mejor aplicación para el modo posición es la de crear mapas de movimientos, como ya hemos en la figura 56, de modo que golpeamos el aire en determinadas posiciones relativas para crear sonidos. El acelerómetro puede ir montado en objetos, que cogemos con la mano para tocar. También puede ser un objeto que se deslice sobre una superficie plana, manteniendo así la inclinación de referencia.

## **4. PELOTA MUSICAL**

### **4.1. Introducción**

Como parte del proyecto, he desarrollado y construido un prototipo de juguete musical, utilizando como sensor el acelerómetro ADXL330.

El objetivo de esta aplicación es utilizar realmente el acelerómetro para desarrollar un juguete musical, una vez vistas las posibilidades que ofrece.

El juguete en si es una pelota de esponja que reacciona a los choques o cambios bruscos de aceleración, dando un tono musical de salida desde un altavoz.

Se compone de dos partes:

Una pelota de esponja, donde va el bloque emisor.

Un bloque receptor con altavoz.

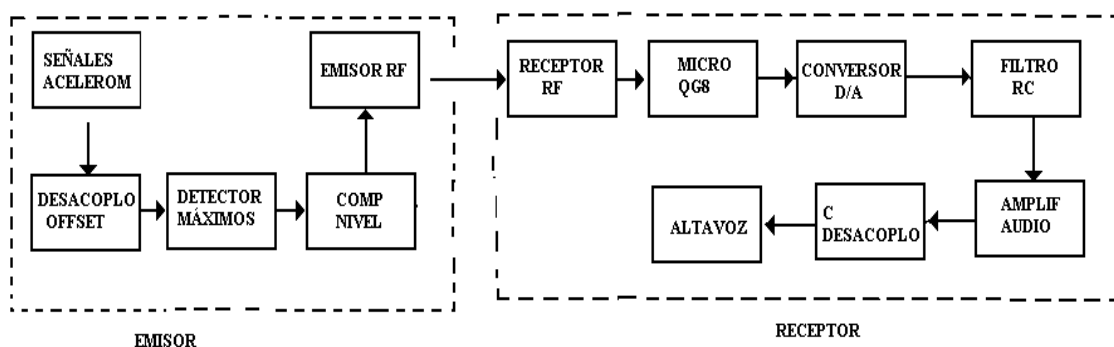
### **4.2 Planteamiento de uso**

La función de la pelota musical esta orientada a su uso como juguete más que como instrumento.

Su manejo es igual al de una pelota de esponja normal y corriente, se puede golpear con el pie, con las manos, lanzarla, etc.

Puede servir para desarrollar diversos juegos musicales en los que intervengan varias personas, gymkhanas, o simplemente como juguete infantil.

### **4.3 Diagrama de bloques**



Como se ve en el diagrama de bloques, el circuito está dividido en dos partes, emisor y receptor.

La parte del emisor va dentro de la pelota de esponja, que va a girar aleatoriamente en cualquier dirección.

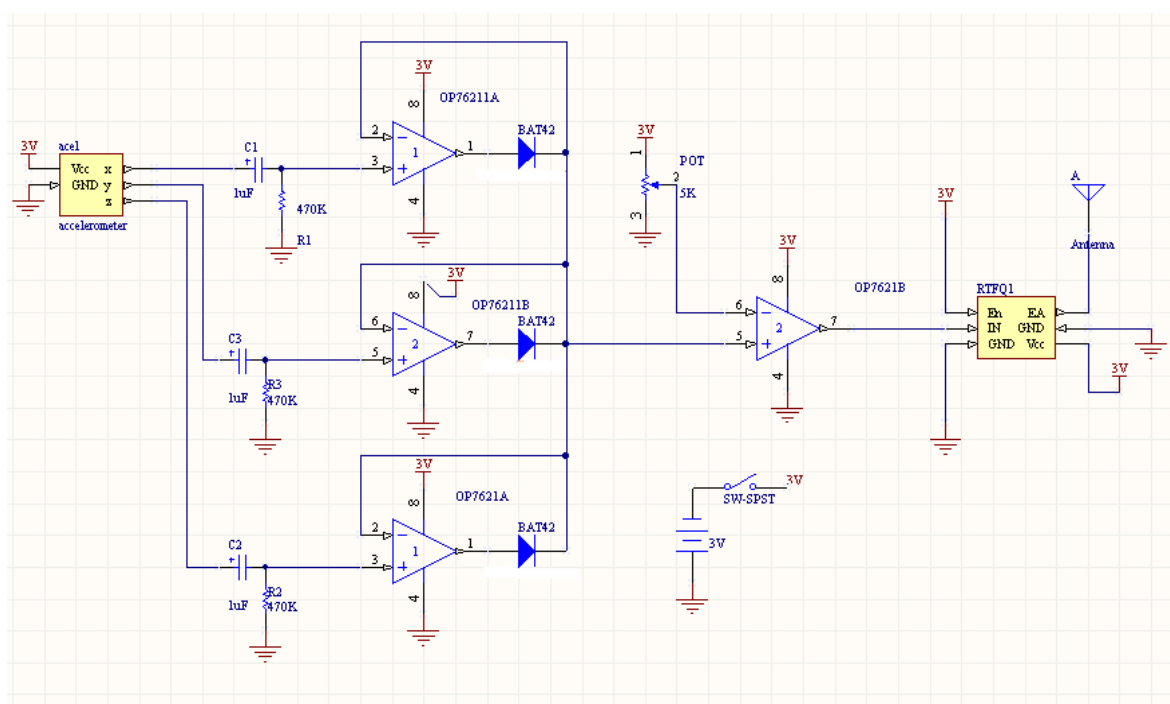


Las señales del acelerómetro pasan por un filtro para desacoplar el nivel de offset, parámetro que no controlamos. Después se detecta la máxima señal entre los 3 ejes, ya que tampoco sabemos en que posición respecto a los ejes estará el acelerómetro cuando se produzcan los choques o cambios de aceleración.

La señal máxima se compara en todo momento con un nivel de tensión variable manualmente, para así poder ajustar la sensibilidad de la pelota. Cuando la señal supera el nivel de referencia, el emisor de radiofrecuencia se encarga de transmitir al receptor la autorización de nota.

El receptor recibe la información y se la comunica al micro, donde se ejecuta la rutina de programa y se pone en el puerto de salida la nota correspondiente. El proceso restante que sigue la señal hasta que sale por el altavoz es el mismo que para las aplicaciones antes desarrolladas.

#### **4.4 Circuito emisor**



**Figura 58: Circuito emisor pelota musical**

El bloque del emisor se alimenta con una tensión de 3V. Los diodos del detector de máximos son diodos Schottky, que tienen una menor caída de tensión en polarización directa que los diodos 1N4148.

Los amplificadores operacionales utilizados son los ICL7621 de Intersil, operacionales de baja potencia con tecnología CMOS y diseñados para aplicaciones portátiles.

El emisor de radiofrecuencia utilizado es el módulo RTFQ1 de RFSolutions, que transmite a 433 Mhz.

Dispone de un pequeño interruptor ON-OFF para encender o apagar el sistema, y funciona con una pila de botón de 16mm tipo CR1620 capaz de suministrar 70 mAh, siendo el consumo medio del emisor de unos 8 mA.

El potenciómetro de 5K sirve para regular la sensibilidad de la placa a los choques o cambios de aceleración.

La antena utilizada, según recomienda el datasheet del módulo RF, es un trozo de cable de 17,3 cm.

La constante de tiempo del filtro RC es:

$$\tau = R \cdot C = 1\mu F \cdot 470k\Omega = 470 \text{ ms.}$$

En nuestro caso la descarga o carga del condensador no se produce totalmente, varía entre 1.8 y 1.2 voltios, máximo y mínimo del offset en cualquier eje. Por lo tanto, suponiendo que el condensador se carga casi del todo en  $4\tau$ , los cambios de offset se realizarán en menos tiempo.

#### PCB

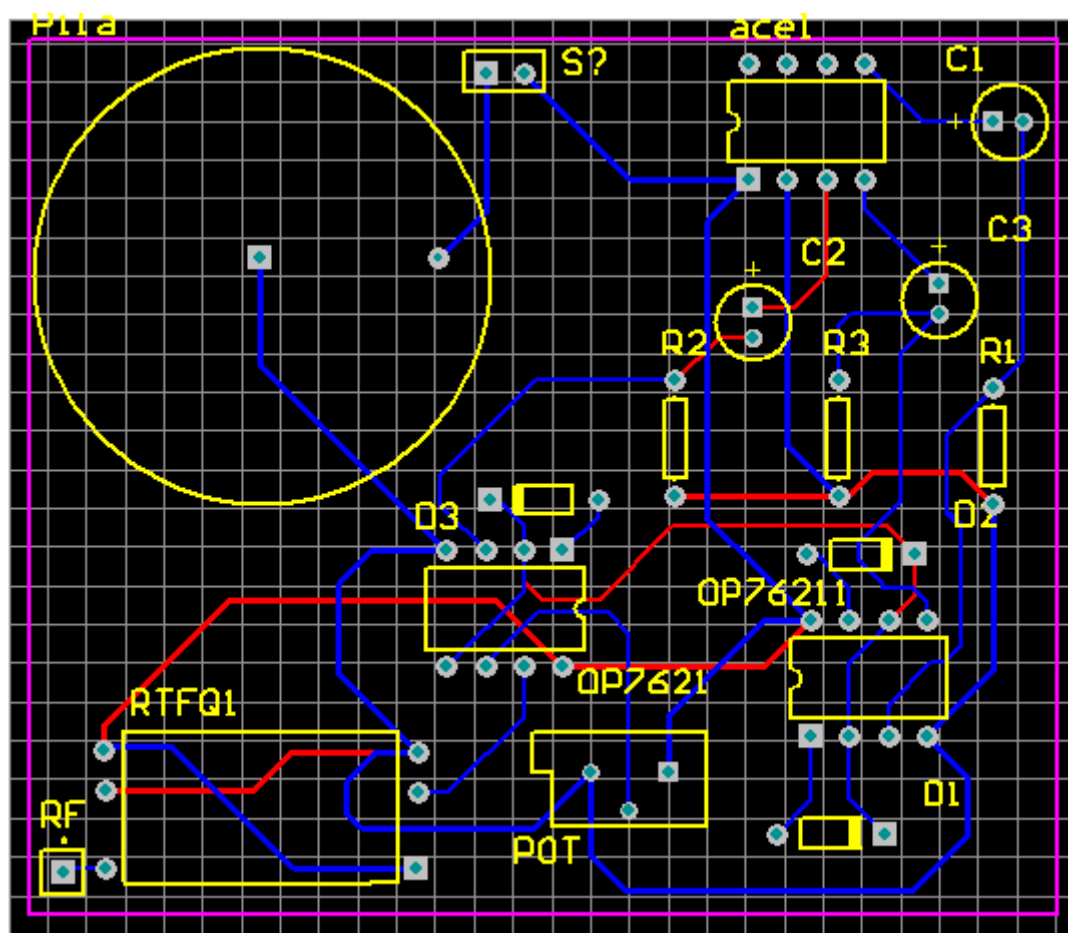


Figura 59: PCB del circuito emisor

He diseñado una pcb del circuito emisor, de 6x6 cm, que quepa en una pelota de esponja, del tamaño de un balón de fútbol.

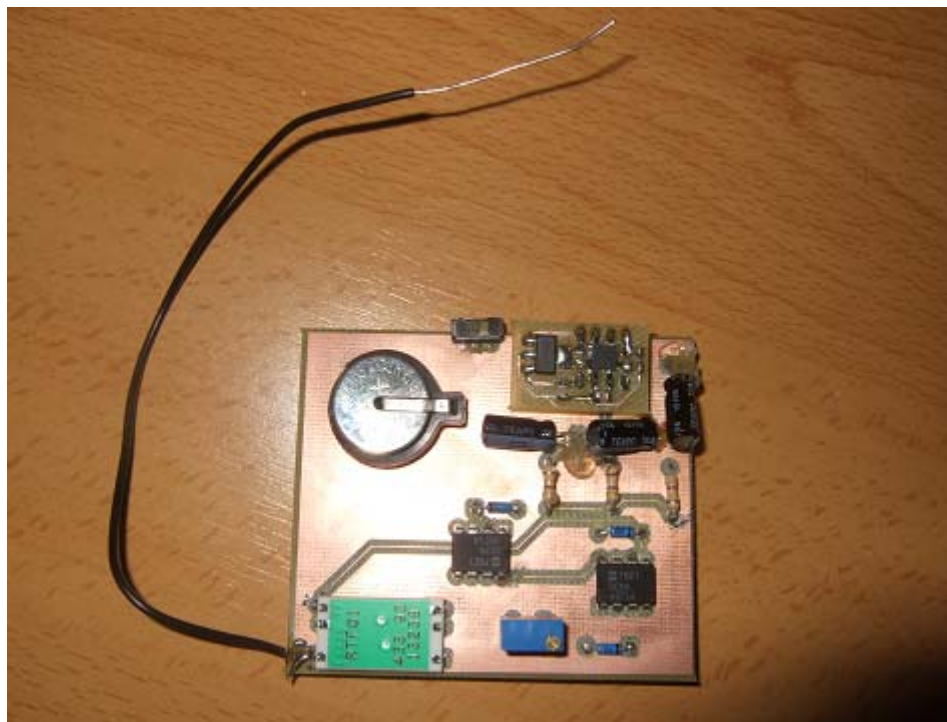


Figura 60: PCB terminada



Figura 61: Pelota de esponja utilizada



El convertor D/A usado es el AD7524 de Analog Devices, operando en modo continuo (sin latch). Los reguladores usados para obtener las tensiones de alimentación son:

- LM7805: Regulador de voltaje positivo de +5 voltios, de National Semiconductor. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y dispone de protección interna ante sobrecargas térmicas y cortocircuitos.
- LD1117AV33: Regulador de voltaje positivo de +3.3 voltios, de ST Electronics. Puede suministrar más de 1 amperio de corriente de salida y tiene una tensión de dropout baja, típica de 1.15 voltios (con corriente de salida de 1 A y temperatura de 25°C). Esto permite alimentarlo desde la salida del regulador de 5 voltios, consumiendo menos potencia que si lo alimentamos desde 10 V.
- MAX660: Regulador de capacidades conmutadas, de Maxim. En este caso opera en modo inversor, alimentado a 5 voltios, para dar en su salida -5V. El integrado utiliza un oscilador interno para el control de los interruptores

Los valores de condensadores de los reguladores son los mismos que recomiendan los fabricantes en las datasheet.



El amplificador de audio utilizado es el LM386, de National Semiconductor. Opera con un mínimo de componentes externos, la ganancia está fijada internamente a 20. Los valores de R3 y C10 son los recomendados en la datasheet para una mejor operación.

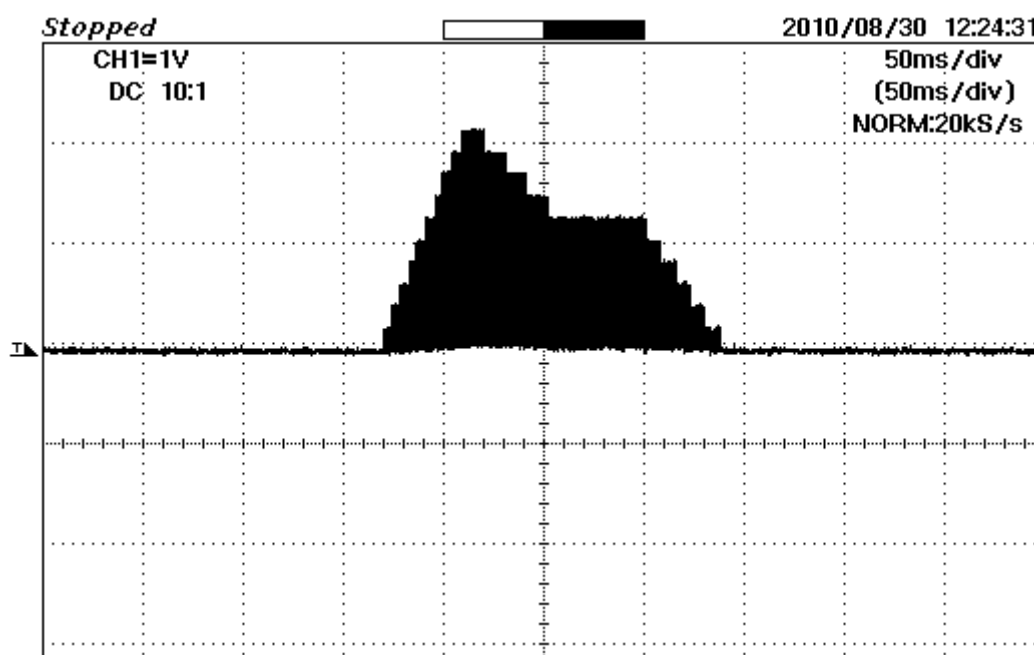


Figura 63: Ejemplo de forma de onda a la salida del amplificador

El circuito formado por el pulsador, R1 y C1 se usa para resetear el microcontrolador, los valores los he tomado de su datasheet.

El filtro RC formado por R2 y C9 tiene como finalidad eliminar las frecuencias altas y el posible ruido. He elegido una frecuencia de corte de unos 30 KHz. Para una onda periódica la frecuencia de corte es:

$$F_{\text{corte}} = \frac{1}{2 * \pi * R * C}$$

Con  $F_c = 30\text{KHz}$ , y tomando valores comerciales de R y C queda  $R = 100\ \Omega$  y  $C = 47\text{nF}$ .

R5 y R6 tienen como finalidad adaptar los niveles de tensión, de 5 a unos 3 voltios, para la entrada del micro.

R4 y C11 forman un filtro paso bajo para eliminar el ruido entrante del receptor cuando el emisor está apagado.

$$F_{\text{corte}} = \frac{1}{2 * \pi * R * C}$$

La frecuencia del ruido entrante es de unos 8 khz, selecciono una frecuencia de corte de 1khz. Operando y cogiendo valores de R y C comerciales tomo:

$$R4 = 100K$$
$$C11 = 2,2 \text{ nF}$$

El amplificador operacional LM741, de National Semiconductor, forma parte del conversor D/A, en su salida se toma la tensión analógica. Es un operacional de uso general.

## **5. CONCLUSIONES**

### Conclusiones sobre el trabajo.

Este trabajo ha sido un estudio de cómo los sensores pueden jugar un papel relevante en el mundo musical, y como tal, he tenido que estudiar los orígenes de los instrumentos musicales electrónicos, su historia. Desde los primeros aparatos, grandes y pesados, hasta los instrumentos actuales, pequeños y eficientes, la evolución tecnológica ha sido muy grande. También he visto como han ido surgiendo nuevas formas de tocar instrumentos, y de generar música. Desde los primeros tonos musicales del resonador de Helmholtz hasta los sintetizadores actuales, la generación de sonido ha evolucionado mucho, pudiéndose conseguir hoy en día casi cualquier sonido de forma artificial.

Con este trabajo hemos visto como el campo de la tecnología se puede aplicar al mundo de la música, para idear nuevas formas de tocar instrumentos, nuevos juegos musicales o simplemente ideas que se pueden convertir en productos en un futuro.

Se ha hecho un análisis de los principales tipos de sensores que, en mi opinión, son los más adecuados para el propósito deseado, por sus características y posibilidades de actuación y desarrollo, siempre buscando la innovación y la creatividad como elementos esenciales. También se ha buscado algo diferente a lo ya existente, ideas divertidas para crear sonidos (a veces de forma rara) a partir de magnitudes físicas. Además, las aplicaciones construidas con el acelerómetro pueden servir como punto de partida para futuros trabajos o proyectos.

En mi opinión, creo que he cumplido notablemente con los objetivos propuestos, el tiempo de desarrollo del proyecto ha sido de 6 meses, un periodo razonable. En este tiempo he realizado el estudio teórico de los sensores, una serie de prácticas con el acelerómetro, con sus correspondientes circuitos montados y probados, y el diseño y construcción de un prototipo de juguete musical.

### Conclusiones personales.

Desde mi punto de vista, la realización de este proyecto ha supuesto un reto para mí, ya que desde el principio me he encontrado dificultades de todo tipo.





---

Como estudiante de electrónica, he tenido que meterme en un tema que no es el mío, la música, y estudiarlo para ver que puede aportar el uso de sensores electrónicos en este mundo. La creatividad y la imaginación han sido otra dificultad, el tener que idear formas de interactuar con sensores, de tocar instrumentos o juguetes musicales me ha servido para ver que significaba la palabra “ingeniero”.

He aprendido a utilizar programas de diseño electrónico, y a construir realmente una PCB, soldando los componentes y comprobando errores de funcionamiento, encontrándome dificultades como problemas de ruido o de comunicación inalámbrica.

Otra dificultad ha sido el desarrollo de programas en lenguaje C, ya que cuando empecé a realizar el proyecto no sabía programar en C. He aprendido a desarrollar programas aprovechando las funcionalidades del microcontrolador y ajustándome a sus limitaciones.

Este trabajo también me ha aportado conocimientos sobre la historia de la música, el funcionamiento de instrumentos, la generación de sonido artificial y las nuevas tendencias en cuanto a juegos musicales.

Me ha servido para plantearme la música como una unión con la tecnología, y ver que ésta cada vez está más implicada en el mundo artístico y musical.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- “Sensores y acondicionadores de señal” de Ramón Pallas Areny, editorial Marcombo. Información sobre tipos de sensores.
- Apuntes de electrónica analógica, 2º curso de Electrónica Industrial.
- Apuntes de electrónica de potencia, 3º curso de Electrónica Industrial.
- [www.aprendeaprogramar.com](http://www.aprendeaprogramar.com) Web para aprender a programar en distintos lenguajes informáticos
- [www.freescale.com](http://www.freescale.com) Para buscar microcontroladores, características técnicas y documentos de aplicación.
- [www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_04\\_05/io3/public\\_html/historia.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io3/public_html/historia.html) Información sobre la historia de los instrumentos musicales electrónicos.
- <http://www.neoteo.com/historia-de-los-juegos-de-musica.neo> Información sobre la historia de los juegos de música.
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org) Información sobre sensores y magnitudes físicas.
- [www.protel.com](http://www.protel.com) Información y tutoriales sobre Protel.
- [www.amazings.com/articulos/articulo0006.html](http://www.amazings.com/articulos/articulo0006.html) Información sobre la revolución de la electrónica dentro de la música.
- <http://es.rs-online.com> Búsqueda de componentes.
- [www.diotronic.com](http://www.diotronic.com) Búsqueda de componentes.
- [www.farnell.com](http://www.farnell.com) Búsqueda de componentes.
- <http://www.csi.map.es/csi/silice/Mmedia7.html> Información sobre sonido y tratamiento de audio.