



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño de un sistema de control electrónico para un dispositivo háptico basado en polímeros electroactivos de nueva generación del tipo iónico.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Castellanos Gilabert, Álvaro

Tutor/a: Berjano Zanón, Enrique

Cotutor/a externo: GONZALEZ SUAREZ, ANA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO**  
**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Diseño de un sistema de control electrónico para un  
dispositivo háptico basado en polímeros  
electroactivos de nueva generación del tipo iónico**

**DOCUMENTO I**  
**MEMORIA**

**ALUMNO: Álvaro Castellanos Gilabert**  
**TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón**  
**COTUTORA EXTERNA: Dra. Ana González Suárez**

**Curso 2021/2022**

## Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado propone varias soluciones técnicas para el diseño del control electrónico de un dispositivo háptico formado por polímeros electroactivos de nueva generación del tipo iónico. En esencia se trata de generar una señal eléctrica capaz de provocar una respuesta electromecánica en el mencionado polímero.

Dado que gran parte de las características electromecánicas son dependientes del modo de fabricación de los polímeros, no va a ser posible el estudio y los resultados de dichas características ya que no disponemos de los recursos para llevar a cabo dicha fabricación. No obstante, en el trabajo de investigación "*Manufacturing process of palladium-electroded IPMC*" se puede encontrar información muy útil sobre la respuesta de algunos polímeros y sus características dinámicas. Dichas características se exponen en el apartado 2 Polímeros electroactivos y sirve de base a las especificaciones del sistema electrónico que debe ser diseñado.

En términos prácticos, el objetivo concreto del TFG es la generación de una señal de corriente alterna de 2 V de amplitud con una frecuencia variable de 0.1 a 1 Hz capaz de excitar el polímero electroactivo. La variación de la frecuencia permite modificar la deformación mecánica del polímero, en concreto su curvatura, lo que se aprovechará para generar una sensación de tacto una vez el polímero se sitúe en contacto con la piel en el interior del guante (dispositivo háptico).

El presente trabajo se divide en varias secciones en las que se puede encontrar información sobre tipos de polímeros electroactivos, propuestas para la generación de la señal eléctrica.

## Resum

Aquest treball de fi de grau proposa diverses solucions tècniques per al disseny del control electrònic d'un dispositiu hàptic format per polímers electroactius de nova generació del tipus iònic. En essència es tracta de generar un senyal elèctric capaç de provocar una resposta electromecànica a l'esmentat polímer.

Atès que gran part de les característiques electromecàniques són dependents del mode de fabricació dels polímers, no serà possible l'estudi i els resultats de les característiques esmentades ja que no disposem dels recursos per dur a terme aquesta fabricació. Tot i això, en el treball de recerca "*Manufacturing process of palladium-electroded IPMC*" es pot trobar informació molt útil sobre la resposta d'alguns polímers i les seves característiques dinàmiques. Aquestes característiques s'exposen a l'apartat 2 Polímeros electroactivos i serveix de base a les especificacions del sistema electrònic que ha de ser dissenyat.

En termes pràctics, l'objectiu concret del TFG és la generació d'un senyal de corrent altern de 2 V d'amplitud amb una freqüència variable de 0.1 a 1 Hz capaç d'excitar el polímer electroactiu. La variació de la freqüència permet modificar la deformació mecànica del polímer, en concret la seva curvatura, cosa que s'aprofitarà per generar una sensació de tacte un cop el polímer se situï en contacte amb la pell a l'interior del guant (dispositiu hàptic).

Aquest treball es divideix en diverses seccions on es pot trobar informació sobre tipus de polímers electroactius, propostes per a la generació del senyal elèctric.

## Abstract

This Final Degree Project proposes several technical solutions for the design of the electronic control of a haptic device built with new generation electroactive polymers of the ionic type. In essence, it is about generating an electrical signal capable of causing an electromechanical response in the aforementioned polymer.

Since a large part of the electromechanical characteristics are dependent on the method of manufacturing the polymers, the study and results of these characteristics will not be possible since we do not have the resources to carry out said manufacturing. However, very useful information on the response of some polymers and their dynamic characteristics can be found in the research work "Manufacturing process of palladium-electroded IPMC". These characteristics are exposed in section 2 Electroactive Polymers and serve as the basis for the specifications of the electronic system to be designed.

In practical terms, the specific objective of the TFG is the generation of an alternating current signal of 2 V amplitude with a variable frequency of 0.1 to 1 Hz capable of exciting the electroactive polymer. The variation in frequency allows the mechanical deformation of the polymer to be modified, specifically its curvature, which will be used to generate a sensation of touch once the polymer is in contact with the skin inside the glove (haptic device).

This work is divided into several sections in which you can find information on types of electroactive polymers, proposals for the generation of the electrical signal.

# Índice

Resumen.....	1
Resum.....	2
Abstract.....	3
Índice .....	4
Lista de figuras.....	6
Lista de tablas .....	8
DOCUMENTO I.....	9
1.    Estado del arte de los dispositivos hápticos .....	9
2.    Polímeros electroactivos .....	11
EAP's electrónicos.....	12
EAP's iónicos .....	14
3.    Características necesarias y elección del polímero .....	17
4.    Solución técnica .....	20
Etapa de control .....	20
Generación de la señal.....	23
Eliminación de la componente DC.....	27
Suavizado de la onda .....	29
Adecuación de la amplitud.....	33
5.    Conclusiones .....	35
6.    Referencias.....	36
ANEXO I: Código y cálculos .....	39
Etapa 1: Control de la señal original .....	39
Etapa 2: Filtro activo Paso Alto de 3er Orden .....	40
Etapa 3: Filtro activo Paso Bajo de 3er Orden .....	41
DOCUMENTO II.....	0
DOCUMENTO III.....	0
1.    Objeto .....	1
2.    Condiciones y normas de carácter general: .....	1

3.	Condiciones de los materiales.....	1
2.1.	Resistencias .....	1
3.2.	Condensadores .....	2
2.3.	Amplificadore operacional 741C .....	3
3.4.	Multivibrador N555 .....	3
3.5.	Multiplexor 4052 .....	4
3.5.	Potenciómetro digital AD520 .....	4
3.6.	ArduinoNANO.....	5
3.7.	Batería .....	5
4.	Condiciones de la ejecución.....	5
5.	Condiciones Facultativas .....	7
6.	Pruebas y ajustes finales .....	7
	DOCUMENTO IV .....	0
1.	Introducción .....	1
2.	Coste de la mano de obra .....	1
3.	Coste de los materiales.....	1
4.	Coste de amortización del software.....	2
5.	Presupuesto final .....	2

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> (A) Interfaz háptica propuesta (B) resorte electromecánico para generar presión.....	9
<b>Figura 2.</b> Prototipo del guante háptico de Meta .....	10
<b>Figura 3.</b> Ilustración del volumen de acción del dispositivo Emerge Wave-1 ..	10
<b>Figura 4.</b> Clasificación de los polímeros activos según interacción.....	12
<b>Figura 5.</b> Respuesta del EAP electrónico .....	12
<b>Figura 6.</b> Principio de funcionamiento de los EAPs iónicos.....	15
<b>Figura 7.</b> Relación entre desplazamiento de la muestra y la frecuencia de la señal aplicada.....	19
<b>Figura 8.</b> ArduinoNANO V3 .....	21
<b>Figura 9.</b> Conexión Arduino-AD520 .....	22
<b>Figura 10.</b> NE555 para generar onda cuadrada.....	23
<b>Figura 11.</b> Relación entre valores RC y frecuencia .....	24
<b>Figura 12.</b> Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 1 Hz y (B) onda de 0.9 Hz.....	25
<b>Figura 13.</b> Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.8 Hz y (B) onda de 0.7 Hz.....	26
<b>Figura 14.</b> Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.6 Hz y (B) onda de 0.5 Hz.....	26
<b>Figura 15.</b> Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.4 Hz y (B) onda de 0.3 Hz.....	26
<b>Figura 16.</b> Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.2 Hz y (B) onda de 0.1 Hz.....	27
<b>Figura 17.</b> Circuito del FPA de tercer orden.....	28
<b>Figura 18.</b> Ganancia y Fase del filtro .....	28
<b>Figura 19.</b> Señal de entrada (rojo) y señal de salida (verde) del FPA para: (A) 1 Hz (B) 0.5 Hz y (C) 0.1 Hz .....	29
<b>Figura 20.</b> Circuito del filtro activo paso-bajo de tercer orden $f_c$ 1 Hz .....	30
<b>Figura 21.</b> FPB con etiquetas de conexión a los 4052. ....	30
<b>Figura 22.</b> Batería de resistencias que sustituyen a las R6 R7 y R8 de la Fig.20. ....	31

<b>Figura 23.</b> (A) Diagrama de Bode del FPB con $f_c$ de 1 Hz (B) señal resultante. .....	31
<b>Figura 24.</b> (A) Diagrama de Bode del FPB con $f_c$ de 0.6 Hz (B) señal resultante .....	32
<b>Figura 25.</b> (A) Diagrama de Bode del FPB con $f_c$ de 0.3 Hz (B) señal resultante .....	32
<b>Figura 26.</b> (A) Diagrama de Bode del FPB con $f_c$ de 0.2 Hz (B) señal resultante .....	33
<b>Figura 27.</b> AO en configuración inversor reductor con ganancia de 0.8 V/V. ...	33
<b>Figura 28.</b> Señal final de $\pm 2$ V.....	34

## Lista de tablas

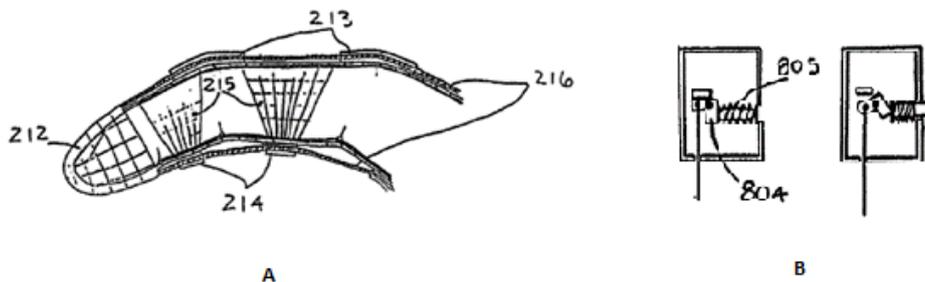
<b>Tabla 1.</b> Relacion entre valor decimal y resistencia del AD520 .....	22
<b>Tabla 2.</b> Desglose de la mano de obra.....	1
<b>Tabla 3.</b> Hardware utilizado .....	2
<b>Tabla 4.</b> Desglose amortización software.....	2
<b>Tabla 5.</b> Presupuesto final .....	3

# DOCUMENTO I

## 1. Estado del arte de los dispositivos hápticos

Aunque el concepto de poder simular y transmitir sensaciones lleva varias décadas entre la comunidad científica, es en los últimos veinte años cuando se han empezado a ver avances significativos en la dirección del sentido del tacto, uno de los más complejos de estudio. Actualmente se puede encontrar dispositivos hápticos, los cuales transmiten una sensación táctil al usuario. De forma genérica están enfocados hacia la realidad virtual, la cual se encuentra en un estado de desarrollo e investigación prematuro, pero intenso.

En 2001 se publicó una patente sobre una interfaz que mide las posiciones del cuerpo y proporciona información sobre la fuerza, la textura, la presión y la temperatura a un usuario (**Figura 1**) [1]. Aunque no concreta qué tipo de actuador utiliza, entre varias opciones propone un sistema electromecánico de pequeña escala para simular presión, y, a su vez, sensación táctil.



**Figura 1.** (A) Interfaz háptica propuesta (B) resorte electromecánico para generar presión

La compañía Meta (California, Estados Unidos) (anteriormente Facebook) tiene varias líneas de investigación abiertas, y aunque se encuentre en una primera fase, la que ahonda en la realidad virtual es una de las que más noticias se van conociendo conforme van publicándose. En este sentido cuentan con un proyecto en fase de investigación sobre unos guantes hápticos (**Figura 2**) basados principalmente en actuadores neumáticos. Ellos mismos dan un ejemplo de lo que podría llegar a ser la utilización de dicho dispositivo: “Imagine working on a virtual 3D puzzle... you pick up a virtual puzzle piece from the table, your fingers automatically stop moving as you feel it

within your grasp. You feel the sharpness of the cardboard's edges and the smoothness of its surface..." [2].



*Figura 2. Prototipo del guante háptico de Meta*

Por otro lado, tras seis años de investigación, la compañía Emerge (California, Estados Unidos) ha desarrollado una versión beta de *Emerge Wave-1* (**Figura 3**), un dispositivo con la forma de un tablero el cual emite ondas ultrasónicas para crear un campo de fuerzas tangible en el aire, y el cual puede ser programado y modificado según qué se desee sentir [3].



*Figura 3. Ilustración del volumen de acción del dispositivo Emerge Wave-1*

Los guantes de Meta son lo más próximo al dispositivo que se contempla en este Trabajo de Fin de Grado. La principal diferencia reside en el tipo de actuadores: mientras ellos proponen actuadores neumáticos, este TFG pretende abordar la actuación por medio de polímeros electroactivos, los cuales se exponen en la sección siguiente.

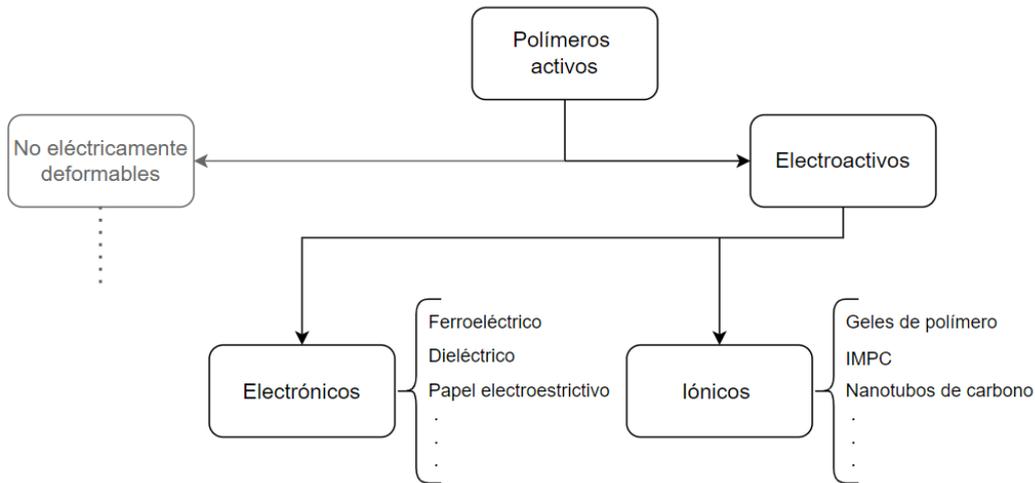
## 2. Polímeros electroactivos

Los materiales activos son aquellos capaces de convertir energía eléctrica en energía química o mecánica a través de sus propias características fisicoquímicas. Existen diversos tipos según sus propiedades y respuesta, pueden ser activos o pasivos, de respuesta permanente o reversible. Combinados entre ellos se puede obtener lo que se denomina una estructura “inteligente”.

Dependiendo del tipo de estímulo pueden dividirse en polímeros no-eléctricamente deformables y polímeros electroactivos (de sus siglas en inglés *ElectroActive Polymer* EAP) (**Figura 4**). A su vez, los EAPs pueden clasificarse en dos grandes grupos según el tipo de interacción con el estímulo eléctrico. Por un lado, los EAPs iónicos, los cuales cambian su forma física en acuerdo con la movilidad o difusión de los iones y sus conjugados, y por otro lado los EAPs electrónicos, los cuales son manejados con la intensidad del campo eléctrico aplicado (o las fuerzas de Coulomb). Estas dos agrupaciones se subdividen en diferentes tipos.

Otra forma de clasificación sería según su mecanismo de actuación. En este caso tendríamos elastómeros dieléctricos o polímeros piezoeléctricos (los cuales actúan según polarización), polímeros conductivos o polímeros de gel (dependientes de la cantidad de iones en movimiento), y elastómeros de cristal líquido o polímeros con memoria de forma (actúan según cambio de fase).

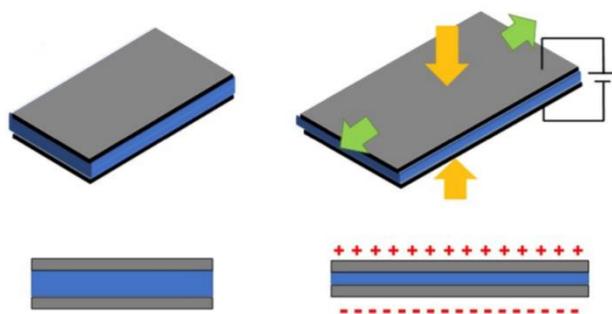
Debido a sus ventajas, información disponible y sistemas de control, la estimulación eléctrica es una de las que más recorrido acumula y más información se dispone. Los EAP, de forma genérica, muestran una deformación de dos a tres órdenes de magnitud, pero se ven limitados por ciertas características derivadas de su composición, como pueden ser la reducida fuerza de actuación, la baja densidad de energía mecánica y la poca robustez.



**Figura 4.** Clasificación de los polímeros activos según interacción

### EAP's electrónicos

Un EAP electrónico actúa como un condensador en el cual se intercala un elastómero pasivo compatible entre los electrodos. Cuando se aplica una diferencia de potencial eléctrico entre ellos, aparecen las fuerzas de Coulomb, lo que genera una presión electrostática (presión de Maxwell) que compacta la película de elastómero. Esta presión hace que el EAP se expanda (**Figura 5**), generando una respuesta electromecánica. Generalmente, estos actuadores presentan deformaciones de entre un 10 y un 40% aproximadamente [4].



**Figura 5.** Respuesta del EAP electrónico

Normalmente, para ser activados o mostrar una respuesta apreciable, requieren un gran campo eléctrico ( $>150 \text{ V}/\mu\text{m}$ ), el cual se encuentra cercano al límite de ruptura del material dieléctrico. Algunas de las características más destacables de este tipo de polímeros son la posibilidad de operar en medio aéreo, poseer una alta densidad de

energía y una rápida respuesta (del orden de milisegundos), y alta temperatura de cristalización (esta última los convierte en materiales inadecuados para aplicaciones que se desarrollen en ambientes con temperaturas muy bajas) [5].

#### Polímeros ferroeléctricos:

El “Polyvinylidene fluoride” (PVDF) es uno de los polímeros ferroeléctricos más estudiados. Debido a la alta electronegatividad, al aplicar un campo eléctrico ( $\sim 200$  V/ $\mu\text{m}$ ), se crean dipolos alineados con este, los cuales generan dominios polarizados, dando lugar al movimiento del actuador. Posee, entre otras, las siguientes características (a 23 °C) [6]: Módulo de Young de 0.03 - 17.1 GPa, fuerza dieléctrica de 1.4 – 110 kV/mm, resistividad superficial  $1 \cdot 10^{10}$  –  $1 \cdot 10^{14}$   $\Omega$ . conductividad térmica de 0.13 – 0.19 W/(m·K), y temperatura de cristalización de -43.3 a -38.3 °C. Se los puede encontrar en aplicaciones tales como semiconductores de alta pureza, procesamiento de residuos nucleares, sensores de baterías etc.

#### Elastómeros dieléctricos:

Los elastómeros dieléctricos están hechos de un medio incompresible y altamente deformable. Cuando se aplica cierta diferencia de potencial (típicamente  $\sim 10$  kV) los electrodos se acercan entre sí, causando una deformación en el actuador. Si se aplica presión en un lateral del actuador, se evita que el polímero se expanda en esa dirección y lo haga en la que quede libre, lo que permite direccionar el movimiento resultante del EAP.

Uno de los mayores retos a la hora de utilizar este tipo de polímeros electroactivos es que el límite eléctrico de ruptura del material es cercano al campo eléctrico a aplicar, lo cual, si se sobrepasa, resulta en la ruptura de éste. Por otro lado, una ventaja es que requieren una corriente del orden de miliamperios, lo cual se puede traducir en un consumo de energía eléctrica considerablemente bajo [7]. 3M VHB 4910 acrylic de 3M (Minnesota, Estados Unidos) y Nusil CF 19-2186 Silicone de Nusil Technology LLC (California, Estados Unidos) son dos de los elastómeros dieléctricos más utilizados y disponibles en el mercado.

#### Papel electrostrictivo:

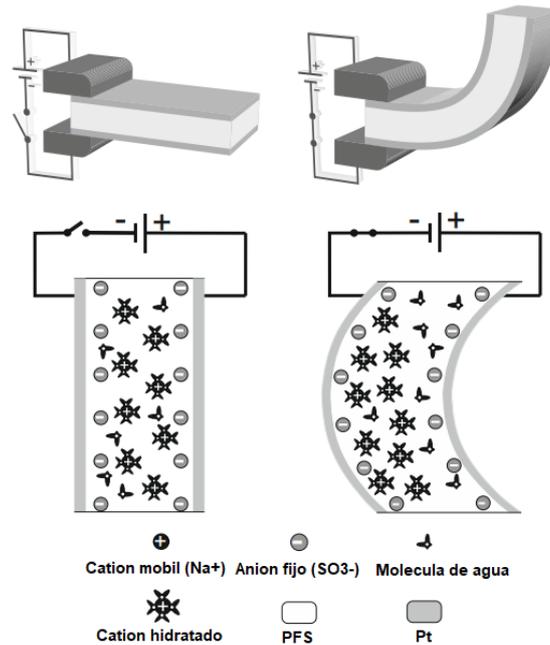
Los electrodos del papel electrostrictivo están formados de pequeñas obleas de plata laminada entre las cuales se encuentra el material fibroso. Se han hecho diferentes estudios con diversos materiales fibrosos entre los cuales cambia el tipo de celulosa aplicada, resultando en diferentes niveles de respuesta electromecánica. Es un tipo de EAP ligero y fácil de fabricar, pero no proporciona una gran respuesta electromecánica, es necesario un campo eléctrico muy elevado, es sensible a la humedad y se degrada considerablemente con el tiempo [7]. Además, a diferencia de otros materiales piezoeléctricos que son capaces de expandirse y contraerse, son únicamente capaces de llevar a cabo la contracción [5]. Entre otras, se utilizan para aplicaciones como amortiguadores de sonido, altavoces activos flexibles o dispositivos inteligentes de control de forma [5].

#### Elastómeros de cristal líquido:

Se trata de un compuesto con un orden molecular intermedio entre sólido cristalino ordenado y líquido desordenado [8]. Este tipo de elastómero, aunque también responde frente a estímulos eléctricos, presenta una mayor actuación frente a las variaciones de temperatura o variaciones de iluminación. Para ser activados eléctricamente es necesario un campo eléctrico bastante inferior en comparación a otros EAP electrónicos, aproximadamente 1.5 a 25 V/ $\mu\text{m}$  en vez de los 100 V/ $\mu\text{m}$ . Algunas aplicaciones en las que se utilizan son diferentes componentes electrónicos y eléctricos, aplicaciones de iluminación, estructuras barrera para combustibles y gas, o utensilios de cocina refractarios [9].

### **EAP's iónicos**

Los polímeros electroactivos del tipo iónico (a veces mencionados como *i-EAP*) basan su actuación en la difusión de iones y sus sustancias conjugadas en un medio hidratado, el cual se encuentra entre dos electrodos. En vez de reaccionar frente a corriente continua como lo hacen los polímeros electrónicos, estos presentan una respuesta electromecánica frente a un campo eléctrico de corriente alterna, además, la diferencia de potencias es ampliamente menor, entorno a los 5 VAC. Su tiempo de respuesta es menor en comparación con los electrónicos, y generan una respuesta con una fuerza inferior [7].



**Figura 6.** Principio de funcionamiento de los EAPs iónicos

### Polímeros de gel iónico:

El gel iónico es un material compuesto por un líquido iónico y una matriz de nanotubos de carbono, esta mezcla de materiales resulta en uno con unas propiedades eléctricas, como la alta conductividad y estabilidad [10], muy interesantes. La capa interna del actuador, la del gel iónico, esta reforzada externamente por el material de los electrodos, que por sus características suele ser plata o platino, también podría usarse oro, pero no sale tan rentable económicamente hablando.

A pesar de que presente una respuesta mecánica bastante pobre en comparación con otros polímeros iónicos, están considerados polímeros “secos”, lo que significa que no precisan de un medio acuoso para su funcionamiento. Por otra parte, en ventaja con los IPMC (explicados más adelante), el modo de fabricación es más sencillo [11]. Además, al doblar manualmente el EAP se induce una pequeña corriente en este, lo que permite usarlos como sensores [12].

### Compuestos poli-metálicos ionoméricos:

Del inglés *Ionic Poli-Metal Composite* (IPMC), consiste en una red fija de iones con carga negativa equilibrada con iones móviles con carga positiva. Está compuesto por en pequeñas “bolsas” de solventes en la capa interna, mientras que la externa (los

electrodos) son placas finas de un material metálico, usualmente platino por sus características mecánicas y eléctricas y su precio en el mercado.

Este tipo de actuadores presentan una gran deformación en presencia de un campo eléctrico de pocos voltios (1-5 V) oponiendo una pequeña resistencia eléctrica, además son considerablemente ligeros. Uno de los mayores inconvenientes es que si actúan en un medio seco, al superarse los 1.23 V aplicados, se da un proceso de electrolisis de las moléculas de agua que hay en su interior, causando graves daños, o incluso la ruptura del material. Para solventar ese problema se ha diseñado encapsulamientos en los cuales se mantiene un medio húmedo o acuoso, pudiendo así usarse en seco [13].

#### Nanotubos de carbono:

Un nanotubo de carbono es una estructura molecular de átomos de carbono de forma cilíndrica cuyo diámetro es del orden nanométrico [14]. Estos nanotubos presentan respuesta frente a un estímulo eléctrico, dependiendo de la disposición de los átomos de carbono la respuesta puede ser a modo de semiconductor, superconductor, respuesta mecánica etc. Las fuerzas de Coulomb que aparecen al aplicar una diferencia de potencial eléctrico dan una relación parabólica entre la tensión y el potencial aplicado [7].

#### Fluidos electroreológicos:

Se componen por una fase continua (generalmente un líquido aislante) y un medio disperso, si el medio es líquido son denominados emulsiones electroreológicas [15]. Son considerados materiales inteligentes a los cuales se les puede variar sus características por medio de un estímulo eléctrico, características tales como viscosidad o módulo de corte. Pueden pasar de estado líquido a semi-sólido en cuestión de milisegundos [16]. Se les puede ver en aplicaciones como suspensiones de vehículos, válvulas hidráulicas o prótesis, entre otras.

### 3. Características necesarias y elección del polímero

Aunque no se han expuesto todos los polímeros electroactivos que se han estudiado a lo largo de las últimas décadas, puede hacerse una idea que existe una amplia variedad de estos. Normalmente se seleccionan unos u otros en función de la aplicación en los cuales se van a utilizar.

Hoy en día la comunidad robótica parece haber adoptado con mayor agrado dos importantes grupos dentro de los Polímeros Electroactivos; los *Elastómeros dieléctricos* y los *Compuestos poli-metálicos ionoméricos*.

En el caso del presente TFG, la aplicación es un dispositivo háptico, idealmente un guante, para transmitir la sensación táctil al usuario de objetos o superficies de realidad virtual o realidad aumentada. Entorno a este concepto surgen ciertas necesidades.

Ya que el dispositivo va a estar en contacto directo con la piel del individuo, el material electroactivo también lo estará, si no es de una forma directa, de una indirecta, o como mínimo muy cercana. Ello obliga a que se cumplan ciertos requisitos de inocuidad polímero-piel. Ciertamente podría estudiarse algún tipo de película protectora que haga de barrera física entre el polímero y la piel a modo de aislante, la mayor problemática de esta idea es que a más características aislantes, normalmente, se densifica dicha película, o aumenta de grosor, lo que provoca una pérdida de transmisión de presión del actuador al usuario y, consecuentemente, menor eficacia en términos de transmisión de sensación del tacto.

Este razonamiento da pie a requerir que la temperatura de actuación del polímero no sea excesiva, de hecho, lo ideal sería que el futuro dispositivo fuese capaz no solo de transmitir una presión deseada, sino también una temperatura elegida correspondiente a la superficie o ambiente virtual.

Por otra parte, simplemente teniendo en cuenta la diferencia de potencial del campo eléctrico a aplicar para la activación del polímero electroactivo, los EAP del tipo iónico presentan la gran ventaja de necesitar unos pocos voltios para generar la respuesta electromecánica deseada; los EAP electrónicos precisan un voltaje de varias centenas, o incluso miles de unidades, esto, primeramente, representa un gran peligro

para el ser humano frente a una deriva de corriente, lo cual causaría, casi seguro, la muerte el usuario, y el segundo lugar, en términos de transformación de energía eléctrica sería necesario un transformador de gran tamaño, lo cual es incoherente ya que uno de los objetivos principales (aunque no mencionado hasta ahora) es la reducción de tamaño en el dispositivo y sus componentes.

Esto último enlaza con la siguiente cuestión: el material ha de ser ligero para que no haya que ejercer esfuerzo físico por parte del sujeto, o que no haga falta ningún tipo de prótesis o exoesqueleto extra para ayudar a cargar con el exceso de peso. Por descontado la respuesta electromecánica ha de generar una fuerza dentro de un margen adecuado para que exista una sensación de tacto al usuario. Además, la respuesta frente al estímulo eléctrico ha de ser suficientemente rápida como para que haya una relación coherente entre el evento virtual y la persona que lo recibe.

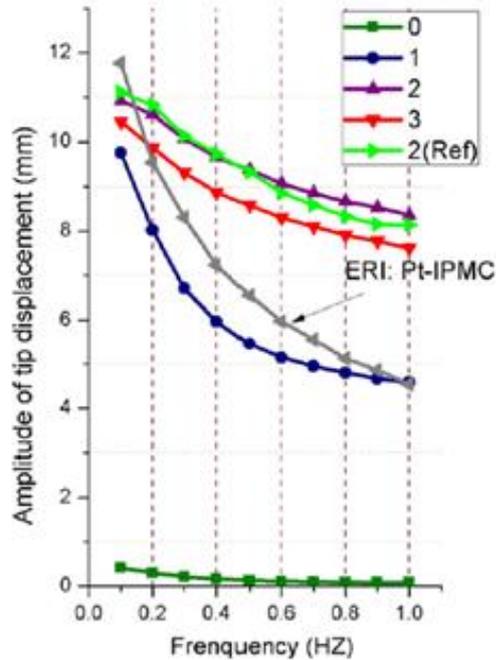
Por último, el polímero a seleccionar ha de ser accesible, lo que se traduce en una disponibilidad en el mercado o una fabricación relativamente sencilla en la cual los materiales involucrados se puedan obtener con relativa facilidad.

En base a todos estos criterios, de entre los polímeros electroactivos expuestos, que puede considerarse una selección en la que se encuentran los grupos más representativos de los que más información se puede obtener hoy en día, se escoge, por sus características, sobre todo de velocidad de respuesta, tamaño, peso y diferencia de potencial eléctrico necesario para su activación, los **Compuestos Poli-Metalicos Ionoméricos (IPMC)**.

Tras profundizar en el documento "*Manufacturing process of palladium-electroded IPMC*" [17], se concreta que el IPMC sobre el cual desarrollar el estudio será el que sus electrodos son de Paladio, ya que este material presenta unas características químicas y eléctricas similares al Platino (el que sería idóneo), pero por un precio de alrededor un tercio. Sus características, consideradas las más relevantes para el presente TFG son las siguientes:

- Dimensiones: 2x6 cm.
- Resistencia: 2000~2700  $\Omega$ .
- Módulo de Young:  $200 < x < 1600$  MPa.
- Señal de activación: 2 V AC senoidal con frecuencia variable entre 0.1 y 1 Hz.

En la **Figura 7** se observa la respuesta electromecánica del IPMC en función a la frecuencia de la señal aplicada.



*Figura 7. Relación entre desplazamiento de la muestra y la frecuencia de la señal aplicada*

Así pues, queda demostrado que este polímero muestra una deformación considerable frente a la señal adecuada. De aquí en adelante se pasa a exponer la olucion adoptada que genera una señal eléctrica que cumplen con los criterios descritos por Longfei Chang, Hualing Chen, Zicai Zhu y Bo Li.

## 4. Solución técnica

Primero de todo hay que destacar que en el documento a partir del cual se extrae la información de la forma de activar el EAP, no se especifica el tipo de señal de corriente alterna, únicamente, como se ha visto anteriormente, se expone que se han hecho pruebas variando la frecuencia de esta entre 0,1 y 1 Hz en una señal de 2 V. De forma genérica, se entiende que es una señal senoidal de 2 V de pico, sin componente de continua y con frecuencia variable. La solución técnica planteada para la generación de esa señal se compone de cuatro etapas, más una de control transversal a todas las demás.

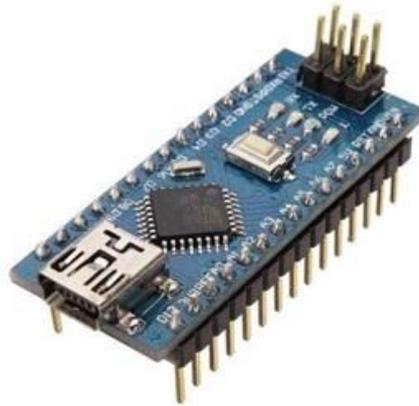
Aclarar además que ni en las etapas que se explican a continuación, ni en los planos del Documento II: Esquemáticos aparece alimentación alguna en los amplificadores operacionales, no obstante, dicha alimentación, aunque se ha decidido ocultarla para simplificar visualmente de una forma razonable todos los esquemas, es simétrica de  $\pm 9$  V.

Para la simulación del proyecto, haciendo referencia al grado, se utiliza el *software* Proteus, es cual es un programa de diseño de automatización electrónica. La mayor ventaja en utilizar este software en este proyecto es que hay una extensa variedad de librerías de dominio público las cuales facilitan enormemente la simulación de casi cualquier sistema electrónico a nivel de grado de ingeniería. Entre todas ellas, la librería “*Simulino*” permite simular el ArduinoNANO en el proyecto, esto será el eje central en torno al cual van a desarrollarse por un lado el código C (que se implementara en el software propio de Arduino) y por otro el sistema electrónico.

### Etapa de control

Se basa en el control digital, de los componentes que, según se modifiquen su valor, cambian las propiedades de las etapas correspondientes. Haciendo uso de los conocimientos adquiridos en el grado, la etapa de control hace uso del microprocesador “*ATmega328p*”, el cual se presenta como circuito integrado en la placa de desarrollo “*Arduino*” de Arduino (Ivrea, Italia), de entre las cuales se va a utilizar “*ArduinoNANO*” (**Figura 8**) ya que es una con las que se ha trabajado en este.

Esta placa ofrece un voltaje de operación entre 1.8 y 5.5 V. Por sus características, la placa de desarrollo ArduinoNANO no es capaz de generar tensiones que no sea de 5 V DC.



*Figura 8. ArduinoNANO V3*

El *hardware* seleccionado es que tiene un lenguaje de programación de nivel relativamente alto, no llega a ser visual, si no que está basado en C, sin embargo, es, en esencia, escribir líneas de código. En relación con el código, también se puede hacer uso de los registros del microcontrolador, lo cual, aunque su uso aumenta considerablemente en complejidad, las ordenes llegan a ser más eficientes.

Esta etapa gestiona la resistencia dada por unos potenciómetros del tipo digital, concretamente el modelo AD5206B100 de Analog Devices (Massachusetts, Estados Unidos), que dispone seis salidas de potenciómetros de un máximo de 100 k $\Omega$  (**Figura 9**). Este circuito integrado se comunica con el Arduino con el estándar de comunicación

SPI, el cual se encuentra hace uso de él por el microprocesador a través de la librería "SPI.h".

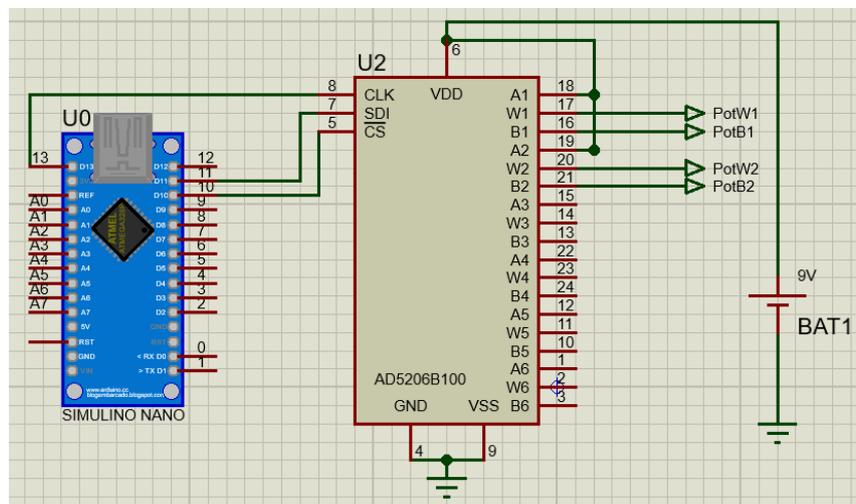


Figura 9. Conexión Arduino-AD520

La resistencia del potenciómetro obedece proporcionalmente a una palabra de 8 bits (valores 0 a 255 en decimal), lo que resulta en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Relacion entre valor decimal y resistencia del AD520

D (Dec)	R <sub>WB</sub> (Ω)	Output State
255	10006	Full scale
128	5045	Midscale ( $\overline{PR} = 0$ condition)
1	84	1 LSB
0	45	Zero scale (wiper contact resistance)

El código para modificar la resistencia ofrecida por uno de los potenciómetros es el siguiente:

```
#include <SPI.h>
const int chipSelectPin = 10;

void setup() {
    pinMode(chipSelectPin, OUTPUT);
    SPI.begin();
}

void loop() {
    valorPot(direccion, valor);
}
```

```

}

void valorPot(int direccion, int valor) {
    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);

    SPI.transfer(direccion);
    SPI.transfer(valor);

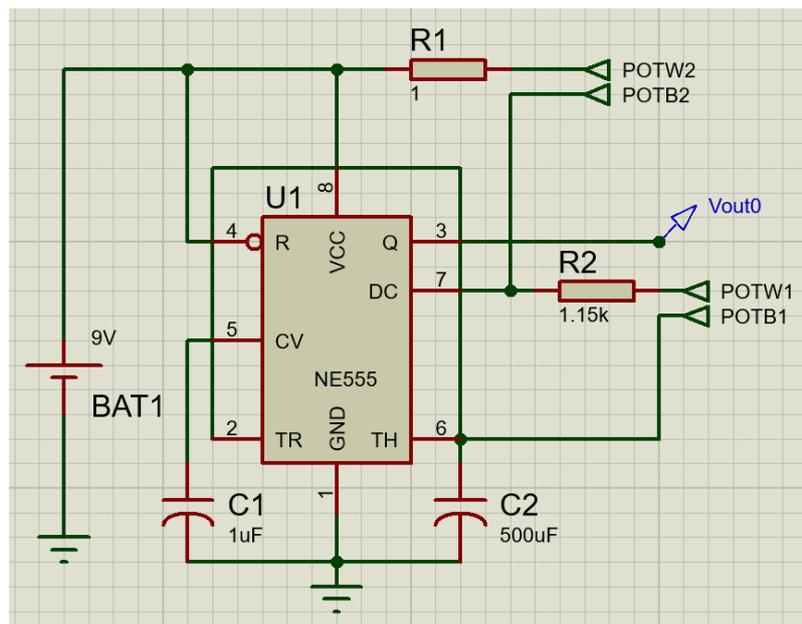
    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}

```

Donde la variable “***direccion***” toma valores del 0 al 5 (los que corresponden a los potenciómetros 1 a 6), y la variable “***valor***” toma valores de 0 a 255.

### Generación de la señal

La señal se genera a partir del circuito integrado NE555 de Texas Instruments (Texas, Estados Unidos). Este es un circuito que, basándose en la oscilación de un bucle enclavado de fase (PLL, consiste en un sistema de lazo cerrado capaz de enclavar/sincronizar la fase de un oscilador controlado por voltaje (VCO), con la fase de una señal de entrada) es capaz de generar una señal de pulsos ya sea a modo de reloj para el control de subsiguientes circuitos, o como en este caso, generación de una señal cuadrada con un ciclo de trabajo de 0.5. Las conexiones son las siguientes (**Figura 10**):



**Figura 10.** NE555 para generar onda cuadrada

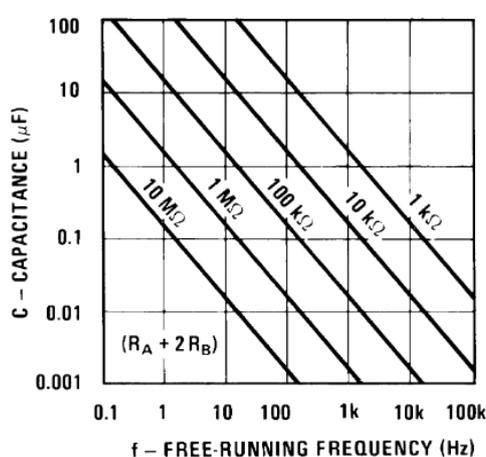
El periodo de la señal generada obedece a la ecuación:

$$T = 0.693 \times (R_A + 2R_B) \times C$$

Y el ciclo de trabajo sigue la ecuación:

$$D = \frac{R_B}{R_A + 2R_B}$$

Para que sea del 50%,  $R_A$  ha de valer  $0 \Omega$ . El fabricante proporciona una gráfica (**Figura 11**) que relaciona la capacidad del condensador y las resistencias  $R_A$  y  $R_B$  con la frecuencia de la señal de salida.



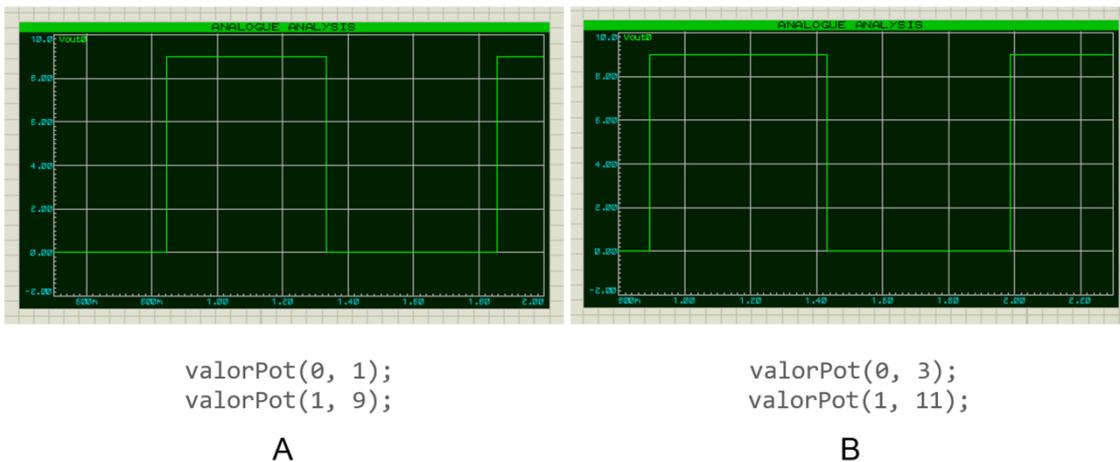
**Figura 11.** Relación entre valores RC y frecuencia

Las frecuencias deseadas son de 0.1 a 1 Hz en saltos de 0.1 Hz, lo que supone un estudio de 10 frecuencias diferentes. En la teoría, como se ha explicado unos párrafos más arriba, la resistencia superior del divisor de tensión situado a la derecha del multivibrador ha de valer  $0 \Omega$ , pero en la práctica ello no resulta ni en la señal ni en la frecuencia deseada, de modo que, de forma experimental, se ha decidido conectar una resistencia en serie. A demás, tras varias pruebas se ha comprobado que esa misma resistencia  $R_1$  ha de variar para ajustar el periodo total y el semiperiodo negativo de la onda cuadrada, de modo que se conecta una de las salidas del potenciómetro digital para poder controlar de forma digital la resistencia en cuestión, quedando el total de esta rama como la suma en serie de  $R_1$  y la resistencia generada por la salida 2 del potenciómetro digital. Como dicha salida es del orden de  $k\Omega$ , se puede despreciar la resistencia  $R_1$  y tomar únicamente el valor del potenciómetro.

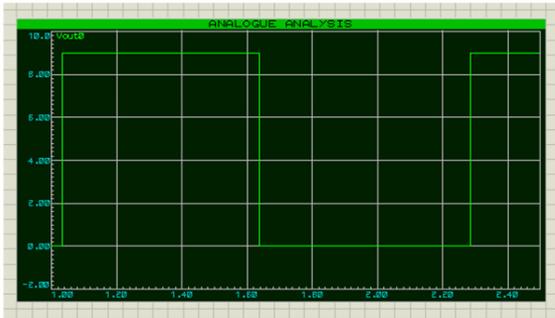
Por otra parte, el periodo se regula mayormente por la resistencia inferior  $R_2$  del divisor de tensión situado a la derecha del N555. Durante las diferentes simulaciones se ha comprobado que el potenciómetro no da  $0 \Omega$  cuando, por código, se le da orden de cero. Además, se ha comprobado que se necesita una resistencia previa al potenciómetro para que, cuando se le envíe la orden de dar la mínima resistencia posible, la salida del multivibrador de una onda de 1 Hz, de esta forma se consigue dar uso al 100% del recorrido de este.

Así pues, como en el caso anterior, experimentalmente se ha decidido poner una resistencia en serie, en este caso de valor  $1.15 \text{ k}\Omega$ , lo cual, permite al multivibrador generar la señal cuadrada de 1 Hz.

Modificando los valores de las salidas 1 y 2 del potenciómetro digital, se consigue variar el periodo y la frecuencia de la onda cuadrada generada, la cual es de 0 a 9 V. Los resultados se muestran a continuación (**Figura 12 a Figura 16**)

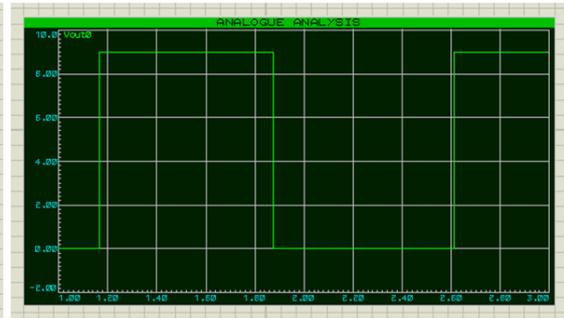


**Figura 12.** Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 1 Hz y (B) onda de 0.9 Hz.



```
valorPot(0, 8);
valorPot(1, 11);
```

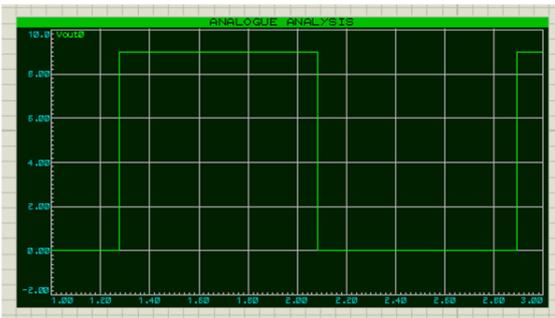
A



```
valorPot(0, 13);
valorPot(1, 15);
```

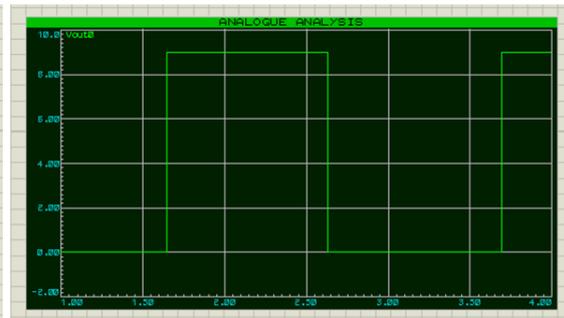
B

**Figura 13.** Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.8 Hz y (B) onda de 0.7 Hz



```
valorPot(0, 17);
valorPot(1, 20);
```

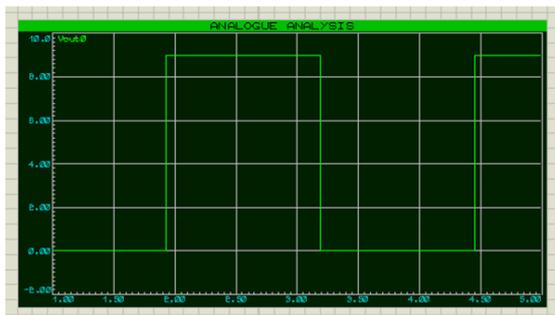
A



```
valorPot(0, 30);
valorPot(1, 21);
```

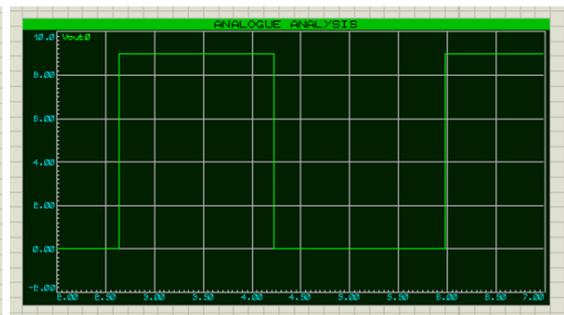
B

**Figura 14.** Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.6 Hz y (B) onda de 0.5 Hz



```
valorPot(0, 40);
valorPot(1, 39);
```

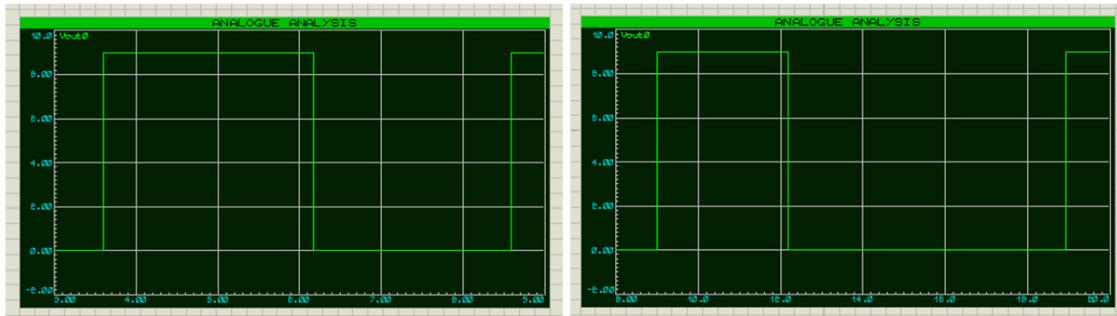
A



```
valorPot(0, 63);
valorPot(1, 44);
```

B

**Figura 15.** Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.4 Hz y (B) onda de 0.3 Hz



```
valorPot(0, 91);
valorPot(1, 215);
```

A

```
valorPot(0, 171);
valorPot(1, 255);
```

B

**Figura 16.** Frecuencias y valores analógicos asignados a los potenciómetros digitales de: (A) onda de 0.2 Hz y (B) onda de 0.1 Hz

En la **Figura 16**, la gráfica B muestra la señal cuadrada con un periodo de 0.1 Hz, pero con un ciclo de trabajo de 32%. Al no poder aumentar la resistencia del potenciómetro 2, que es con el que se puede modificar el ciclo de trabajo de dicha señal, como se ha llegado al máximo de su valor, esto plantea una limitación en el presente TFG.

### Eliminación de la componente DC

Mediante un filtro activo paso alto del tipo *Sallen Key* de orden 3, se consigue eliminar la componente de continua bloqueando las bajas frecuencias. Dichas bajas frecuencias dependerán de la opción elegida por el usuario (objeto o ítem de realidad virtual/aumentada en contacto ficticio). El objetivo de esta etapa es la eliminar la componente DC de 4.5 V.

Se diseña el filtro con una frecuencia de corte de 0.01 Hz, una década por debajo de la frecuencia mínima de estudio. Los resultados se muestran en las **Figura 17**, **Figura 18** y **Figura 19**.

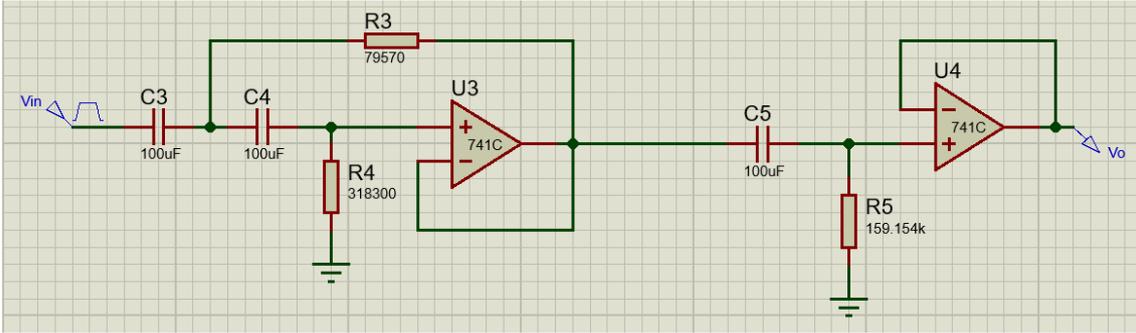
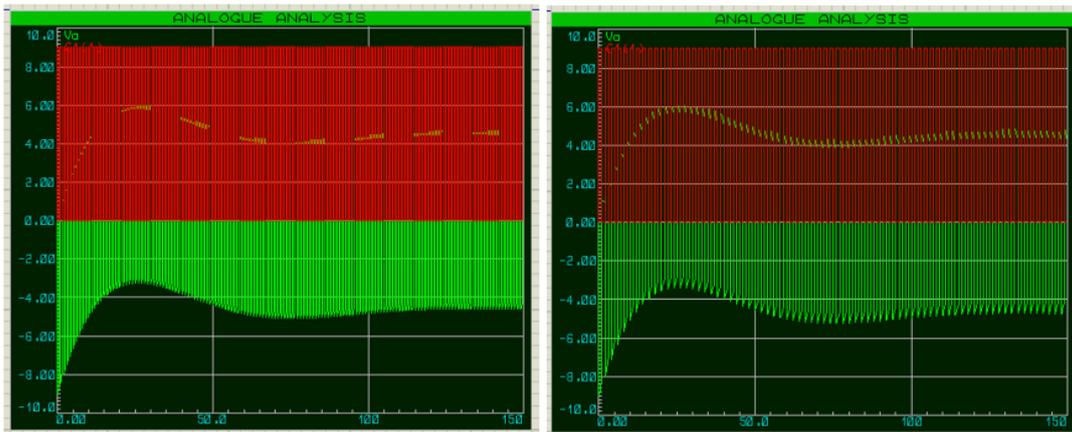


Figura 17. Circuito del FPA de tercer orden.

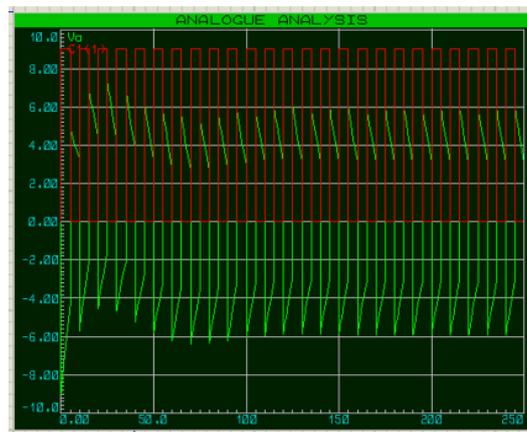


Figura 18. Ganancia y Fase del filtro



A

B



C

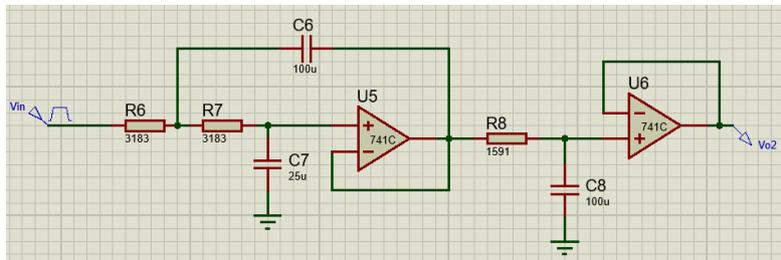
**Figura 19.** Señal de entrada (rojo) y señal de salida (verde) del FPA para: (A) 1 Hz (B) 0.5 Hz y (C) 0.1 Hz

Se puede observar que hay un periodo transitorio en el cual el sistema subamortiguado tarda en estabilizarse. Esto se considera como un tiempo de carga de los componentes antes de utilizar el dispositivo completo de generación de señal. Dicho periodo transitorio, como se puede observar en las figuras, es el mismo para todas las frecuencias de estudio, siendo aproximadamente 120 segundos.

### Suavizado de la onda

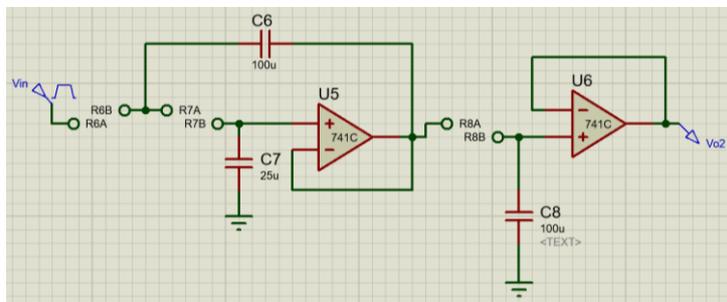
Mediante un filtro activo paso bajo del tipo *Sallen Key* de tercer orden, se pretende eliminar los armónicos que, según la serie de Fourier, convierten a la señal en cuadrada, quedándose, idealmente, la componente fundamental. De este modo se suaviza la señal quedando lo más próxima posible a una senoidal pura.

En esta etapa, conforme va disminuyendo la frecuencia de estudio, va siendo necesario modificar la frecuencia de corte del filtro. Se diseña el filtro (**Figura 20**) para tres frecuencias de corte: 1 Hz, 0.6 Hz y 0.3 Hz.

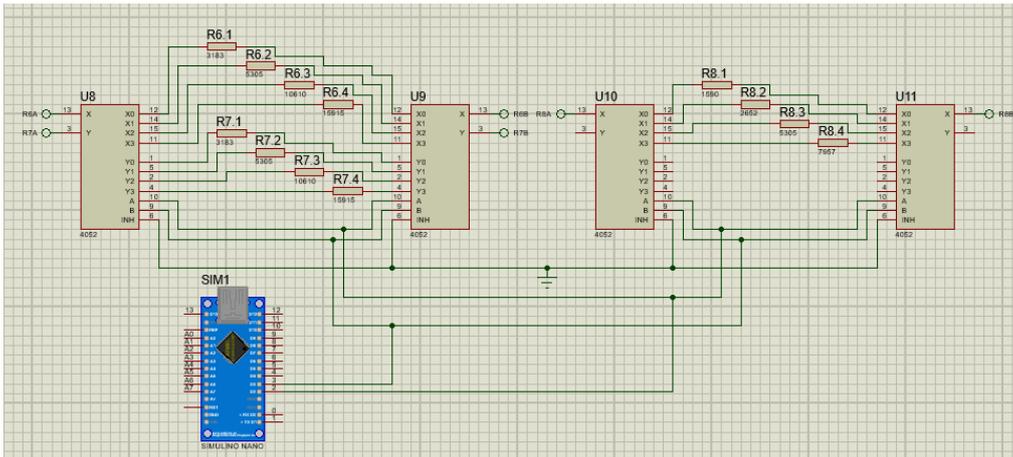


**Figura 20.** Circuito del filtro activo paso-bajo de tercer orden  $f_c$  1 Hz

Para poder cambiar la frecuencia de corte del filtro se implementa una batería de resistencias conectadas a través de dos circuitos integrados 4052 de Unisonic Technologies Company Limited (Taipéi, Taiwán) a modo de multiplexor y demultiplexor controlados por el Arduino (**Figura 21** y **Figura 22**).



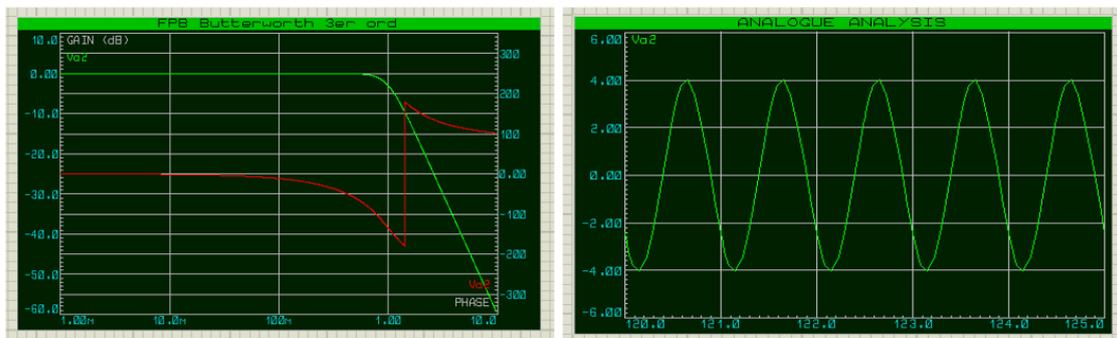
**Figura 21.** FPB con etiquetas de conexión a los 4052.



**Figura 22.** Batería de resistencias que sustituyen a las R6 R7 y R8 de la Fig.20.

El control de la batería resistencias es muy sencillo y viene dado por la activación o desactivación de los terminales de selección de los multiplexores. Se han elegido los pines 3 y 2 como salida digital del Arduino para la mencionada función. Dicha selección obedece a la traducción correspondiente de binario a decimal entre 00 y 11, lo que es el camino 1, 2, 3 o 4 de los multiplexores.

A continuación, se muestran los diagramas de Bode del filtro con sus diferentes frecuencias de corte, junto con la señal de salida de este (**Figura 23 a Figura 25**).

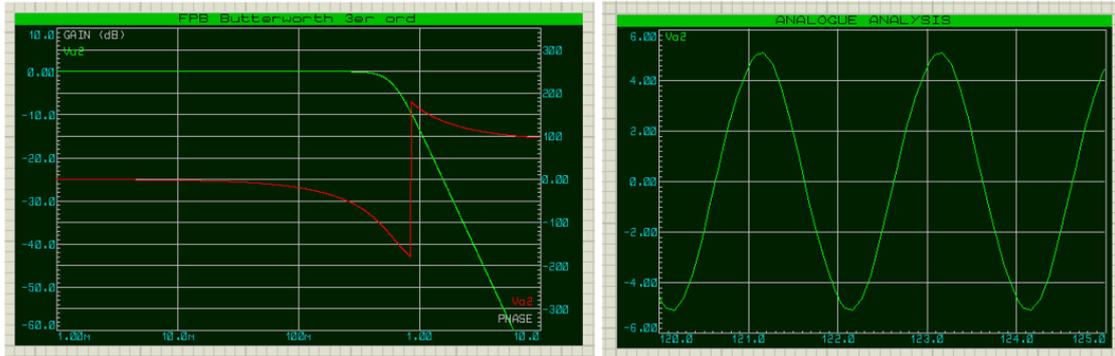


A

B

**Figura 23.** (A) Diagrama de Bode del FPB con  $f_c$  de 1 Hz (B) señal resultante.

Válido para frecuencias de 1 a 0.6 Hz.

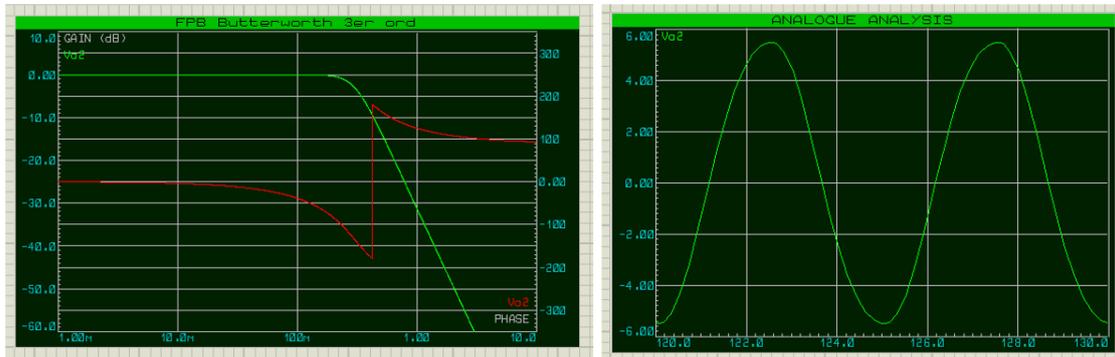


A

B

**Figura 24.** (A) Diagrama de Bode del FPB con  $f_c$  de 0.6 Hz (B) señal resultante

Válido para frecuencias de 0.5 a 0.3 Hz.



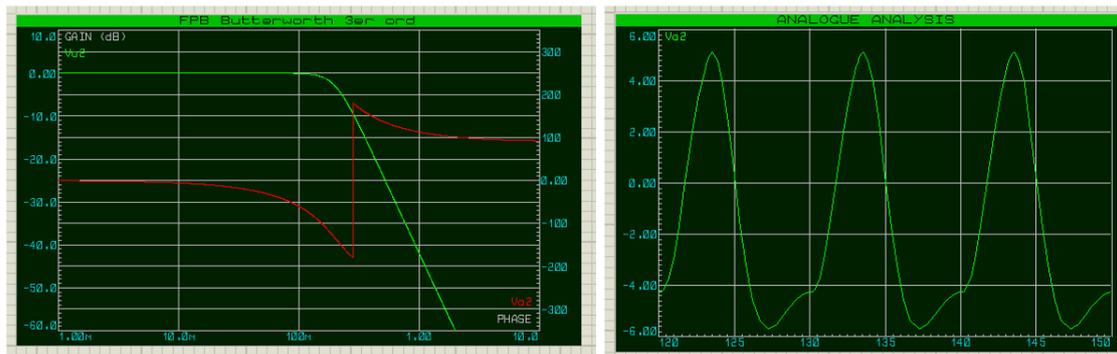
A

B

**Figura 25.** (A) Diagrama de Bode del FPB con  $f_c$  de 0.3 Hz (B) señal resultante

Válido para frecuencias de 0.3 y 0.2 Hz.

Al modificar los valores del filtro para obtener una frecuencia de corte muy inferior a 0.2 Hz para suavizar la onda en su frecuencia más baja, 0.1 Hz, el sistema pasa a ser sobreamortiguado, tendiendo a 0 hacia el infinito, por lo que con esos valores que se muestran a continuación, la señal, con 0.1 Hz de frecuencia, queda de la siguiente manera (**Figura 26**).



A

B

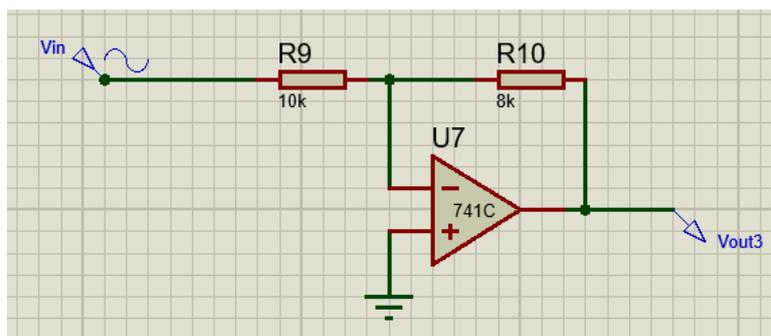
**Figura 26.** (A) Diagrama de Bode del FPB con  $f_c$  de 0.2 Hz (B) señal resultante

Limitación en 0.1 Hz

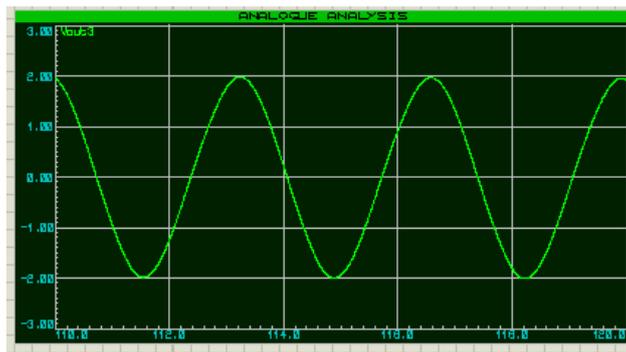
Recordemos que existe una limitación previa, el ciclo de trabajo para esta frecuencia es de 32%, en vez de 50%.

### Adecuación de la amplitud

En esta última etapa se regula la amplitud de la señal por medio de un amplificador operacional en configuración seguidor de tensión reductor inversor (**Figura 27**). Con ello se consigue que la amplitud quede con un valor de 2 V (**Figura 28**).



**Figura 27.** AO en configuración inversor reductor con ganancia de 0.8 V/V.



*Figura 28. Señal final de  $\pm 2$  V*

En el presente documento (Memoria) no están normalizados los valores de resistencias ni condensadores, estos se pueden encontrar en Documento II: PLANOS, valores de la serie E48 con una tolerancia del 2%.

## 5. Conclusiones

El presente TFG presenta una solución técnica para la generación de la señal de control de un polímero electroactivo susceptible de ser empleado en un dispositivo háptico como por ejemplo un guante electrónico. Dicha solución se ha basado en circuitos analógicos discretos y un control digital a través de un Arduino. En concreto el sistema permite la generación de una señal senoidal de 2 V de pico y frecuencia variable entre 0.1 y 1 Hz. Dicha señal es adecuada para la excitación de un polímero electroactivo de pequeñas dimensiones que muestra resistencias de carga de 2000 - 2700 ohmios, lo que implica una demanda de corriente adecuada para los amplificadores operacionales usados en el diseño. La solución técnica ha sido verificada por simulación.

## 6. Referencias

- [1] J. F. Kramer, «Force feedback and texture simulating interface device», US20010043847A1, 22 de noviembre de 2001 Accedido: 29 de junio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US20010043847A1/en>
- [2] «Inside Reality Labs Research: Meet the team that's working to bring touch to the digital world», *Tech at Meta*, 16 de noviembre de 2021. <https://tech.fb.com/ar-vr/2021/11/inside-reality-labs-meet-the-team-thats-bringing-touch-to-the-digital-world/> (accedido 29 de junio de 2022).
- [3] «Emerge® - Product», *Emerge®*. <https://emerge.io/product> (accedido 29 de junio de 2022).
- [4] hmong.wiki, «Elastómeros dieléctricos Principios de trabajoyMateriales». [https://hmong.es/wiki/Dielectric\\_elastomers](https://hmong.es/wiki/Dielectric_elastomers) (accedido 2 de julio de 2022).
- [5] «Sistema de procesamiento de residuos orgánicos». <https://1library.co/document/qm02lg7y-sistema-de-procesado-de-residuos-organicos.html> (accedido 5 de julio de 2022).
- [6] «Polyvinylidene Fluoride (PVDF): Properties & Applications - Matmatch». <https://matmatch.com/learn/material/polyvinylidene-fluoride-pvdf> (accedido 4 de julio de 2022).
- [7] K. J. Kim y S. Tadokoro, Eds., *Electroactive polymers for robotic applications: artificial muscles and sensors*. London: Springer, 2007.
- [8] E. Bartual, «¿Qué son los cristales líquidos?», *AIMPLAS*, 26 de noviembre de 2018. <https://www.aimplas.es/blog/que-son-los-cristales-liquididos/> (accedido 5 de julio de 2022).
- [9] «LCP | Tipos de polímeros - Resinex». <https://www.resinex.es/tipos-de-polimeros/lcp.html> (accedido 5 de julio de 2022).
- [10] A. Kadkhoda Ghamsari, «Bucky gel actuator for morphing applications», Doctor of Philosophy, Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2012. doi: 10.31390/gradschool\_dissertations.910.
- [11] J.-W. Lee y Y.-T. Yoo, «Preparation and performance of IPMC actuators with electrospun Nafion (R)-MWNT composite electrodes», *Sens. Actuators B-Chem. - Sens. ACTUATOR B-CHEM*, vol. 159, pp. 103-111, nov. 2011, doi: 10.1016/j.snb.2011.06.057.
- [12] N. Kamamichi, M. Yamakita, K. Asaka, Z.-W. Luo, y T. Mukai, «Sensor Property of a Novel EAP Device with Ionic-liquid-based Bucky Gel», en *2007 IEEE SENSORS*, oct. 2007, pp. 221-224. doi: 10.1109/ICSENS.2007.4388376.

- [13]B. Bhandari, G.-Y. Lee, y S.-H. Ahn, «A review on IPMC material as actuators and sensors: Fabrications, characteristics and applications», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, n.º 1, pp. 141-163, ene. 2012, doi: 10.1007/s12541-012-0020-8.
- [14]«Alex - NANOTUBOS DE CARBONO.pdf». Accedido: 5 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://www.revistasbolivianas.ciencia.bo/pdf/rits/n5/n5a03.pdf>
- [15]D. E. R. Vargas, «OPCION: INGENIERIA EN PROCESOS DE POLIMERIZACION», p. 45.
- [16]A. Khanicheh, D. Mintzopoulos, B. Weinberg, A. A. Tzika, y C. Mavroidis, «Evaluation of Electrorheological Fluid Dampers for Applications at 3-T MRI Environment», *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 13, n.º 3, pp. 286-294, jun. 2008, doi: 10.1109/TMECH.2008.924043.
- [17]L. Chang, H. Chen, Z. Zhu, y B. Li, «Manufacturing process and electrode properties of palladium-electroded ionic polymer–metal composite», *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, n.º 6, p. 065018, jun. 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/6/065018.



# ANEXO I: Código y cálculos

## Etapa 1: Control de la señal original

```
#include <SPI.h>
const int chipSelectPin = 10;

void setup() {
  pinMode(chipSelectPin, OUTPUT);
  SPI.begin();
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
}
```

```
void loop() {
  int var;
  var=XX;

  switch (var) {
    case 1:
      valorPot(0, 1);
      valorPot(1, 9);
      digitalWrite(2,LOW);
      digitalWrite(3,LOW);
      break;
    case 2:
      valorPot(0, 3);
      valorPot(1, 11);
      digitalWrite(2,LOW);
      digitalWrite(3,LOW);
      break;
    case 3:
      valorPot(0, 8);
      valorPot(1, 11);
      digitalWrite(2,LOW);
      digitalWrite(3,LOW);
      break;
    case 4:
      valorPot(0, 13);
      valorPot(1, 15);
      digitalWrite(2,LOW);
      digitalWrite(3,LOW);
      break;
    case 5:
      valorPot(0, 17);
      valorPot(1, 20);
      digitalWrite(2,LOW);
      digitalWrite(3,LOW);
      break;
    case 6:
      valorPot(0, 30);
      valorPot(1, 21);
      digitalWrite(2,HIGH);
      digitalWrite(3,LOW);
      break;
    case 7:
```

XX toma valores de 1 a 10, siendo estos correspondientes a las frecuencias de 1 a 0.1 Hz

```

        valorPot(0, 40);
        valorPot(1, 39);
        digitalWrite(2,HIGH);
        digitalWrite(3,LOW);
        break;
    case 8:
        valorPot(0, 63);
        valorPot(1, 44);
        digitalWrite(2,LOW);
        digitalWrite(3,HIGH);
        break;
    case 9:
        valorPot(0, 91);
        valorPot(1, 215);
        digitalWrite(2,LOW);
        digitalWrite(3,HIGH);
        break;
    case 10:
        valorPot(0, 171);
        valorPot(1, 255);
        digitalWrite(2,HIGH);
        digitalWrite(3,HIGH);
        break;
    default:
        // if nothing else matches, do the default
        // default is optional
        break;
    }
}

void valorPot(int direccion, int valor) {

    digitalWrite(chipSelectPin, LOW);

    SPI.transfer(direccion);
    SPI.transfer(valor);

    digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
}

```

## Etapa 2: Filtro activo Paso Alto de 3er Orden

De forma deliberada se escoge 100  $\mu\text{F}$  para el valor de  $C_3$ ,  $C_4$  y  $C_5$

El factor QHP, según la tabla de aproximación de Butterworth, es 1

$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 * Q_{HP}^2 * (A - 1)}}{4 * Q_{HP}} \quad (1)$$

$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 * 1^2 * (1 - 1)}}{4 * 1} = 0.5 \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{m}{2\pi * K_{HP} * f_c * C} \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{0.5}{2\pi * 1 * 0.01 * 100\mu} \quad (4)$$

$$R_4 = \frac{R_1}{m^2} \quad (5)$$

$$R_4 = \frac{79577}{0.5^2} = 318309 \Omega \rightarrow \text{A valor normalizado es } 316 \text{ k}\Omega \quad (6)$$

$$R_5 = \frac{1}{2\pi * K_{HP} * f_c * C} \quad (7)$$

$$R_5 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.01 * 100\mu} = 159154 \Omega \rightarrow \text{A valor normalizad es } 154 \text{ k}\Omega \quad (8)$$

### Etapa 3: Filtro activo Paso Bajo de 3er Orden

De forma deliberada se escoge 100  $\mu\text{F}$  para el valor de  $C_6$  y  $C_7$

El factor  $Q_{LP}$ , según la tabla de aproximación de Butterworth, es 1

$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 * Q_{LP}^2 * (A - 1)}}{4 * Q_{LP}} \quad (9)$$

$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 * 1^2 * (1 - 1)}}{4 * 1} = 0.5 \quad (10)$$

$$R_6 = \frac{1}{2\pi * K_{LP} * f_c * m * C_6} \quad (11)$$

$$R_6 = \frac{1}{2\pi * 1 * 1 * 0.5 * 100\mu} = 3183 \Omega \quad (12)$$

$\rightarrow$  A valor normalizado es 3.16 k $\Omega$

$$R_6 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.06 * 0.5 * 100\mu} = 5305 \Omega \quad (13)$$

$\rightarrow$  A valor normalizado es 5.36 k $\Omega$

$$R_6 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.03 * 0.5 * 100\mu} = 10610 \Omega \quad (14)$$

$\rightarrow$  A valor normalizado es 10.5 k $\Omega$

$$R_6 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.2 * 0.5 * 100\mu} = 15915 \Omega \quad (15)$$

→ *A valor normalizado es 15.4 kΩ*

$$R_7 = R_6 \quad (16)$$

$$C_8 = m^2 * C_6 \quad (12)$$

$$C_8 = 0.5^2 * 100\mu = 25 \mu F \rightarrow \text{A valor normalizad es 27 kF} \quad (17)$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi * K_{LP} * f_c * C_6} \quad (18)$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi * 1 * 1 * 100\mu} = 1591 \Omega \rightarrow \text{A valor normalizado es 1.54 kΩ} \quad (19)$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.6 * 100\mu} = 5305 \Omega \rightarrow \text{A valor normalizado es 5.36 kΩ} \quad (20)$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.3 * 100\mu} = 3183 \Omega \rightarrow \text{A valor normalizado es 3.16 kΩ} \quad (21)$$

$$R_8 = \frac{1}{2\pi * 1 * 0.2 * 100\mu} = 7957 \Omega \rightarrow \text{A valor normalizado es 7.87 kΩ} \quad (22)$$



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO**  
**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Diseño de un sistema de control electrónico para un  
dispositivo háptico basado en polímeros  
electroactivos de nueva generación del tipo iónico**

**DOCUMENTO II**

**PLANOS**

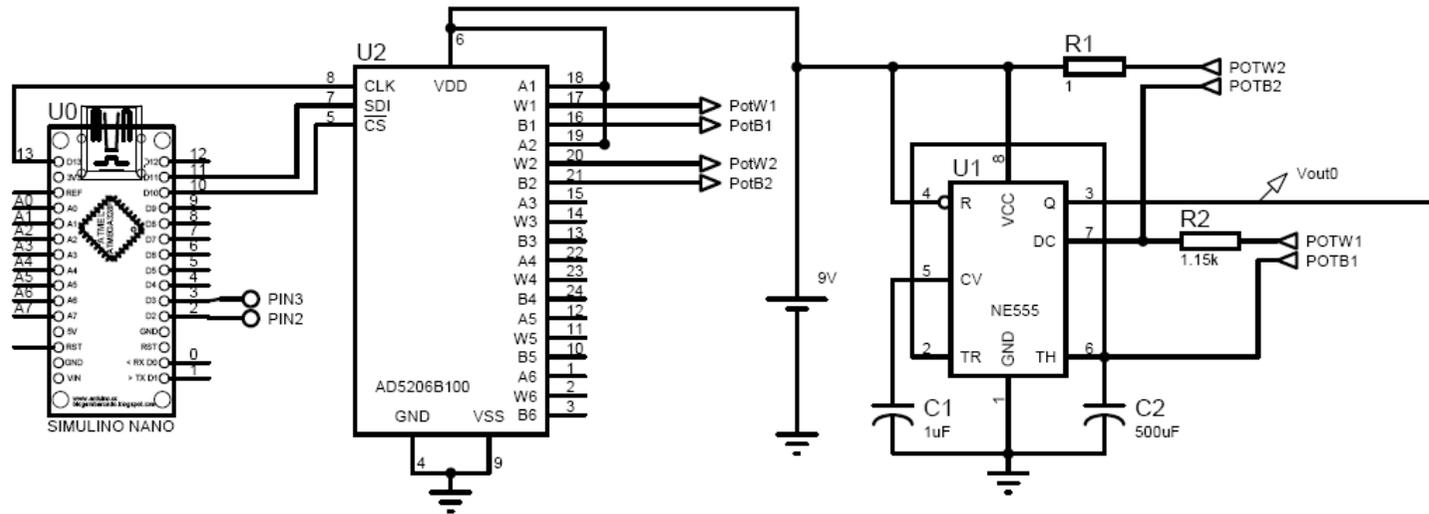
**ALUMNO: Álvaro Castellanos Gilabert**

**TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón**

**COTUTORA EXTERNA: Dra. Ana González Suárez**

**Curso 2021/2022**

# Etapa 1: Control de la señal original



Alvaro Castellanos Gilabert

Título: Etapa de generación de la señal

Tamaño:  
A4

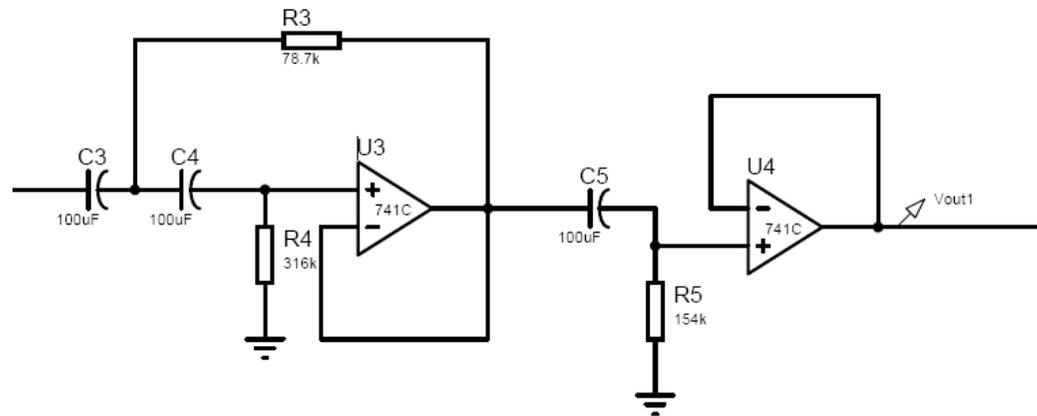
Documento N°:  
1

Revisión:  
30/08/2022

Fecha: 23/08/2022

Página 1 de 5

## Etapa 2: Filtro activo Paso Alto de 3er Order



Alvaro Castellanos Gilabert

Título: Etapa de eliminación de componente DC

Tamaño: Documento N°:

A4

1

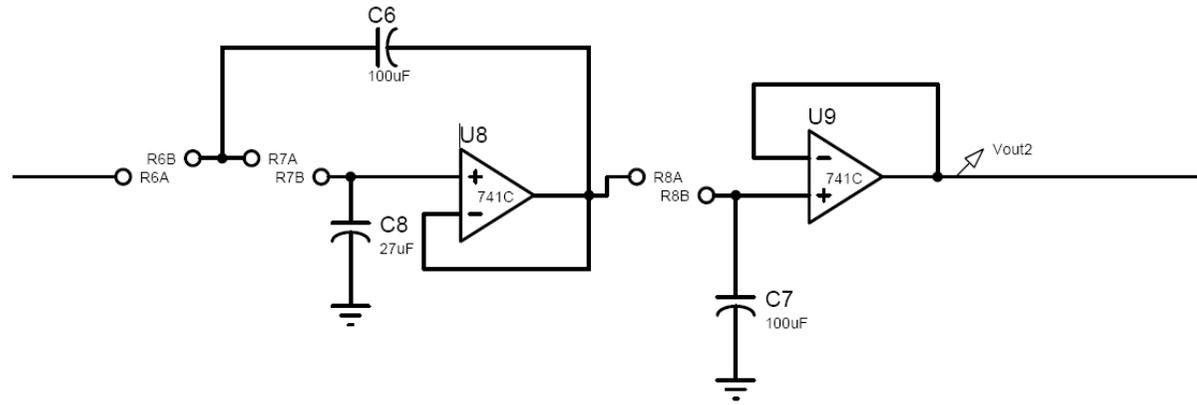
Revisión:

30/08/2022

Fecha: 23/08/2022

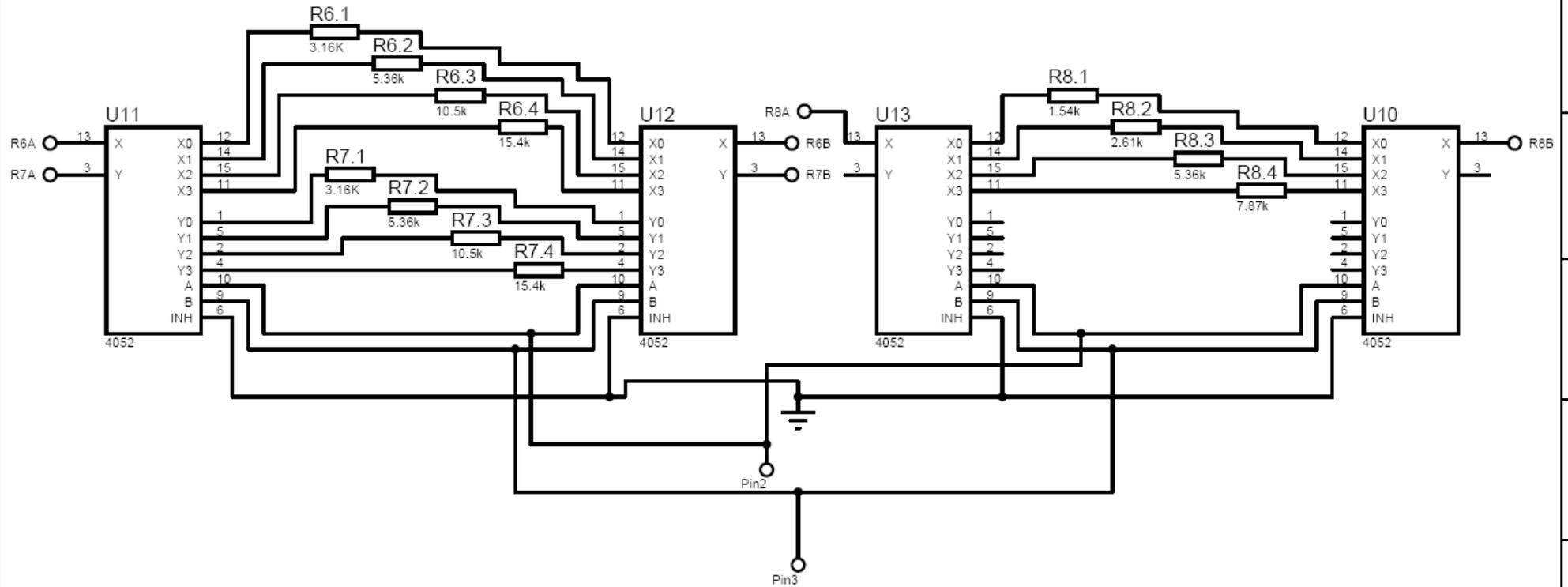
Página 2 de 5

### Etapa 3: Filtro activo Paso Bajo de 3er Order



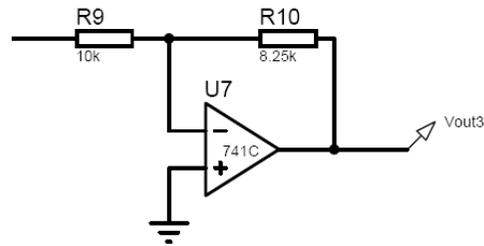
Alvaro Castellanos Gilabert		
Título: Etapa de suavizado		
Tamaño: A4	Documento N°: 1	Revisión: 30/08/2022
Fecha: 23/08/2022	Página 3 de 5	

### Etapa 3.2: Batería de resistencias



Alvaro Castellanos Gilabert		
Título: Subetapa de resistencias multiplexadas		
Tamaño: A4	Documento N°: 1	Revisión: 30/08/2022
Fecha: 23/08/2022	Página 4 de 5	

## Etapa 4: Amplificador operacional inversor



Alvaro Castellanos Gilabert

Título: Etapa de ajuste de amplitud

Tamaño: Documento N°:

A4

1

Revisión:

30/08/2022

Fecha: 23/08/2022

Página 5 de 5



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO**  
**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Diseño de un sistema de control electrónico para un  
dispositivo háptico basado en polímeros  
electroactivos de nueva generación del tipo iónico**

**DOCUMENTO III**  
**PLIEGO DE CONDICIONES**

**ALUMNO: Álvaro Castellanos Gilabert**  
**TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón**  
**COTUTORA EXTERNA: Dra. Ana González Suárez**

**Curso 2021/2022**

# 1. Objeto

En el Documento I: Memoria se han explicado algunas condiciones sobre el proyecto, dichas explicaciones están fundamentadas sobre la simulación. De aquí en adelante se desarrollan una serie de condiciones para implementar el circuito, al igual que las condiciones de los materiales y componentes que lo conforman. Téngase en cuenta que siempre existe un margen de error entre simulación y montaje real, sobre todo con el uso de materiales y componentes genéricos no especializados como podrían ser las series militares de los mismos.

A su vez se detallan especificaciones mínimas las cuales han de cumplirse para que el sistema en su conjunto realice las funciones para las que se ha diseñado de forma correcta. Se valora cualquier modificación de este siempre que esté debidamente justificada y nunca reduciendo las mencionadas especificaciones.

## 2. Condiciones y normas de carácter general:

Durante la ejecución del proyecto se deberá observar la siguiente normativa:

- UNE 21302-300:2004 Vocabulario electrotécnico. Medidas e instrumentos de medida eléctricos y electrónicos.
- UNE-EN IEC 62368-1:2020 Equipos de audio y vídeo, de tecnología de la información y la comunicación. Parte1: Requisitos de seguridad.
- UNE-EN 61439-1:2012. Conjuntos de aparata de baja tensión.
- Real Decreto 187/2016, de 6 de mayo, por el que se regulan las exigencias de seguridad del material eléctrico destinado a ser utilizado en determinados límites de tensión.
- Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, Reglamento electrotécnico para baja tensión.

## 3. Condiciones de los materiales

### 3.1. Resistencias

### Descripción

En el Documento II: Esquemáticos se presentan por partes el proyecto con los valores de las resistencias normalizados, y comercialmente disponibles, según la serie E48. Todas las resistencias han de cumplir con las normativas UNE-EN 60062:2016/A1:2019: “Códigos para el marcado de resistencias y de condensadores.” y UNE-EN 140203:1996: “Resistencias fijas (nivel de aseguramiento de la calidad H)”.

### Control de calidad

Se han de llevar a cabo dos revisiones para cada resistencia.

La primera visual, inspeccionando que el componente se encuentre dañado ni presente ningún desperfecto que pueda afectar a su correcto funcionamiento y seguridad. Además, ha de verse correctamente la banda de colores que indica sus valores, para una rápida identificación de los mismo.

La segunda, más técnica, se trata de una comprobación de su valor mediante un óhmetro de forma que se asegure que efectivamente presenta el valor de resistencia indicado en la banda de colores y deseado para el proyecto.

## **3.2. Condensadores**

### Descripción

Al igual que en con las resistencias, en el Documento II: Esquemáticos se presentan por partes el proyecto con los valores de las normalizados, y comercialmente disponibles. Todo condensador que sea de aplicación al proyecto ha de cumplir debidamente con la normativa UNE-EN 60384-8:2015: “Condensadores fijos para uso en equipos electrónicos. Parte 8: Especificación intermedia: Condensadores fijos de dieléctrico cerámico, Clase 1”

Es aconsejable, si no necesario, que la tolerancia de los condensadores non sea superior al 10%, y que su valor sea rápidamente identificable de forma visual.

Nótese que los valores de casi todos los condensadores son del orden de 100  $\mu\text{F}$ , algo considerablemente elevado en un proyecto de electrónica de baja potencia. Esos valores hacen necesario el hecho de que sean del tipo electrolítico, y consecuentemente estén polarizados, de forma que, en caso de montaje físico, hay que prestar especial atención a ;a correcta conexión de estos.

#### Control de calidad

Se compondrá de dos partes.

La primera, la inspección visual del elemento. Prestar especial atención a que no esté abombado o hinchado, ya que es signo de que los materiales internos empiezan a sobrepasar los límites físicos para los cuales están diseñados y puede terminar explotando.

La segunda, con un capacímetro, para comprobar que el valor sea realmente el indicado por la impresión en el lateral.

### **3.3. Amplificadore operacional 741C**

#### Descripción

Debe estar indicado en el componente en modelo de este, además de tener las correspondientes patillas.

#### Control de calidad

En este caso se lleva a cabo una inspección visual para verificar que no esté dañado el componente y que no le falte ninguna patilla.

### **3.4. Multivibrador N555**

#### Descripción

Debe estar indicado en el componente en modelo de este, además de tener las correspondientes patillas.

#### Control de calidad

En este caso se lleva a cabo una inspección visual para verificar que no esté dañado el componente y que no le falte ninguna patilla.

### **3.5. Multiplexor 4052**

#### Descripción

Debe estar indicado en el componente en modelo de este, además de tener las correspondientes patillas.

#### Control de calidad

En este caso se lleva a cabo una inspección visual para verificar que no esté dañado el componente y que no le falte ninguna patilla.

### **3.5. Potenciómetro digital AD520**

#### Descripción

Debe estar indicado en el componente en modelo de este, además de tener las correspondientes patillas.

#### Control de calidad

En este caso se lleva a cabo una inspección visual para verificar que no esté dañado el componente y que no le falte ninguna patilla. Además, se recomienda probar que los valores máximos y mínimos sean los especificados en las horas de características, y que la relación código-resistencia sea lineal.

### **3.6. ArduinoNANO**

Se empleará el microcontrolador ARDUINO NANO para el montaje del prototipo, se podrá variar entre distintos modelos de la marca ARDUINO ya que el programa está realizado con compatibilidad a los modelos de dicha marca. Para la comprobación del correcto funcionamiento se probará el programa “Blink” que proporciona IDE ARDUINO analizando los resultados.

### **3.7. Batería**

#### Descripción

La batería a utilizar como alimentación del circuito debe ser de iones de litio, presentar un voltaje de 6 — 9 V y debe cumplir con la normativa UNE-EN 61960-3:2017: “Acumuladores con electrolitos alcalinos u otros electrolitos no ácidos. Acumuladores de litio para aplicaciones portátiles. Parte 3: Elementos de litio prismáticos y cilíndricos y acumuladores hechos con ellos”.

#### Control de calidad

La prueba que se debe realizar sobre este componente para comprobar su correcto funcionamiento se trata de una medida de su valor de potencial para comprobar que consiste en el valor que se especifica en la hoja de características de esta.

## **4. Condiciones de la ejecución**

#### Descripción

Un punto importante a tener en cuenta es que para la simulación es necesario un hardware relativamente especializado. En el presente caso se ha realizado con un ordenador portátil que posee un procesador Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60 GHz a 1.80 GHz con 8 GB de RAM, ello no ha permitido las simulaciones en tiempo real con el bloque Simulino ya que la frecuencia del reloj interno es de 16 MHz, lo cual se ha solucionado realizando simulaciones sectoriales y bajando la frecuencia

del Simulino a 0.1 Hz (de hecho se ha evitado cualquier comando del tipo *delay* ya que obedecen a la frecuencia de dicho reloj). Una computadora que posea un microprocesador más potente (por ejemplo, Intel Corei7 de octava generación) debería ser suficiente para poder simular sin tener que cambiar la frecuencia interna del Simulino.

Se aconseja realizar las etapas en archivos separados para poder comprobar su correcto funcionamiento fácilmente, ya que todas juntas presentan una exigencia considerable tanto en complejidad como en recursos a utilizar. Una vez comprobada la correcta implementación de cada etapa, se puede conectar entre si y realizar las comprobaciones finales.

Para poder incluir el código en el bloque Simulino hay que editar sus propiedades adjuntando el archivo temporal *.hex* que se genera al compilar un programa en el IDE de Arduino, dicho archivo temporal se encuentra en la siguiente ruta:

```
C:\Users\xxxx\AppData\Local\Temp\arduino_build_yyyy
```

Importante no cerrar el programa IDE de Arduino mientras se quieran llevar a cabo simulaciones en Proteus ya que, al cerrar el programa, el archivo *.hex* se elimina.

Al usarse condensadores de gran capacidad se genera un sistema sobreamortiguado que tarda un tiempo en estabilizarse, especialmente en la Etapa 2: Eliminación de la componente DC, aproximadamente 150 s, ello, en caso de montaje físico, se considera un tiempo de carga y preparación del sistema completo.

### Control de calidad

Para comprobar el funcionamiento de cada etapa se recomienda utilizar todas las gráficas que sean necesarias, en concreto las *ANALOG ANALYSIS* y *FREQUENZY RESPONSE*, de tal forma se puede comprobar fácilmente las frecuencias de corte de los filtros y la evolución de las señales.

## **5. Condiciones Facultativas**

Las condiciones facultativas descritas a continuación están dirigidas a la parte contratista y a la dirección facultativa.

Condiciones a la parte de la dirección facultativa:

- Supervisión de los aspectos del proyecto que puedan afectar a la fiabilidad y seguridad durante la ejecución.
- Asunción de ser la máxima autoridad técnica en materia de interpretación de las indicaciones del proyecto.
- Cumplimentación de los certificados de dirección exigidos por la normativa vigente o por el pliego de condiciones técnicas.

Condiciones a la parte contratista:

- Conocimiento de la normativa aplicable.
- Obligación de un documento donde se reflejen las modificaciones del proyecto.
- Obligación del seguimiento completo de las indicaciones del proyecto.
- Obligación de utilización los materiales descritos en las condiciones técnicas de materiales.

## **6. Pruebas y ajustes finales**

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de cada etapa de forma individual, se puede llevar a cabo la unión de estas, así se ha hecho en las últimas etapas de desarrollo del proyecto y ha funcionado con normalidad. En este momento es cuando se pueden realizar ajustes en el filtro de suavizado si se consideran necesarios, especialmente en la Etapa 4: Ajuste de amplitud.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO**  
**Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Diseño de un sistema de control electrónico para un  
dispositivo háptico basado en polímeros  
electroactivos de nueva generación del tipo iónico**

**DOCUMENTO IV**  
**PRESUPUESTO**

**ALUMNO: Álvaro Castellanos Gilabert**  
**TUTOR: Dr. Enrique Berjano Zanón**  
**COTUTORA EXTERNA: Dra. Ana González Suárez**

**Curso 2021/2022**

## 1. Introducción

En el presente documento se exponen los costes derivados del desarrollo de la fuente de alimentación de corriente alterna con frecuencia variable. Dichos costes se dividen en diferentes apartados según la naturaleza de estos. Entre ellos se tiene en cuenta también el trabajo del ingeniero a la hora de desarrollar diferentes actividades y el tiempo dedicado a estas, los costes de los materiales involucrados para el desarrollo del proyecto, costes de amortización de software. Se considera, también, un porcentaje del 17% como gastos generales. Además, para el coste total, se contempla el IVA (21%) y el Beneficio Industrial (6%).

## 2. Coste de la mano de obra

Se entiende pues que el personal encargado del desarrollo del proyecto es un Ingeniero Técnico Industrial el cual cobra, en este caso, 32.5 €/h. En la siguiente tabla (**Tabla 2**) se muestra de forma desglosada el tiempo invertido para según qué parte de proyecto.

*Tabla 2. Desglose de la mano de obra*

ACTIVIDAD	Nº HORAS (h)	PRECIO/HORA (€/h)	COSTE TOTAL (€)
Estudio previo de alternativas	20	32,5	650
Estudio de viabilidad de la alternativa seleccionada	20	32,5	650
Diseño del circuito	65	32,5	2112,5
Implementación de la simulación del circuito	30	32,5	975
Pruebas de funcionamiento	10	32,5	325
Modificaciones del replanteo inicial	45	32,5	1462,5
Redacción y presentación	110	32,5	3575
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>	<b>-</b>	<b>9750</b>

## 3. Coste de los materiales

Aunque inicialmente se pretendía la implementación física del proyecto, finalmente no se ha llevado a cabo, así pues, este apartado únicamente contempla el ordenador portátil utilizado para el desarrollo del circuito y la simulación (**Tabla 3**).

**Tabla 3. Hardware utilizado**

HARDWARE	UNIDADES (ud)	PRECIO/UNIDAD (€/ud)	COSTE TOTAL (€)
HP Pavilion 15-BC416NS	1	625	625
<b>TOTAL</b>	-	-	<b>625</b>

#### 4. Coste de amortización del software

Se han utilizado varios programas informáticos para el desarrollo del proyecto, los cuales aportan otro coste. Para este caso se procede a calcular los meses invertidos, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{meses} = 300 \text{ h} * \frac{1 \text{ dia}}{6 \text{ h}} * \frac{1 \text{ mes}}{21 \text{ dia}}$$

Según esto se han invertido 2.38 meses. A continuación, se presenta la tabla (**Tabla 4**) explicativa de los costes asociados a la amortización de cada programa:

**Tabla 4. Desglose amortización software**

Software	Coste de licencia (€)	Duración de licencia (meses)	Periodo de uso (meses)	Coste imputable (€)
<b>Windows 10 pro</b>	214,05	indefinida (48 de uso)	2,38	10,61
<b>Microsoft Office 365</b>	123,14	indefinida (48 de uso)	2,38	6,11
<b>OneDrive</b>	19,99	12	2,38	3,96
<b>Proteus 8.14</b>	2000	indefinida (48 de uso)	2,38	99,17
<b>TOTAL</b>	-	-		<b>119,85</b>

#### 5. Presupuesto final

Para realizar el cálculo del coste final del proyecto se unen los costes desglosados en los apartados anteriores, teniendo en cuenta además el Beneficio Industrial y el IVA (**Tabla 5**).

**Tabla 5. Presupuesto final**

CONCEPTO	IMPORTE (€)
Coste mano de obra	9750
Coste materiales	625
Coste software	119,85
Coste gastos generales	1784,12
Importe antes de Beneficio Industrial	12278,97
Beneficio Industrial (6%)	736,73
Importe antes de IVA	13015,71
IVA (21%)	2733,29
<b>TOTAL PRESUPUESTO</b>	<b>15749,01</b>

Asciende el presupuesto general a la expresada cantidad de **QUINCE MIL SETECIENTOS CUARENTA Y NUEVE EUROS CON UN CÉNTIMO.**