



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# TRABAJO FINAL DE GRADO

## Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de medición de fuerza

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA

AUTOR: ACXEL ENRIQUE FERNÁNDEZ GALEANO  
TUTOR: RANKO ZOTOVIC STANISIC

Universidad Politécnica de Valencia  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño  
Valencia, Julio de 2018



## **Resumen**

Este trabajo fin de grado consiste en el estudio sobre los sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza, en concreto se enfocará más en las mediciones próximas a ser cuasi-estáticas. En la actualidad, existen varios tipos de sensores para la medición de fuerzas, los modelos piezoeléctricos son una alternativa más, que como todos los sensores poseen ventajas y desventajas en su funcionamiento.

El objetivo es exponer fundamentos teóricos sobre la piezoelectricidad y de los sensores piezoeléctricos para la medición de fuerzas, así como realizar un ensayo experimental con distintos sensores piezoeléctricos con el fin de observar las respuestas y analizar el fenómeno producido comparando los resultados obtenidos con los diferentes sensores, contrastando la relación entre la teoría y lo sucedido experimentalmente.

Palabras clave: piezoeléctrico, sensor, fuerza, medición



## **Abstract**

This Bachelor's Thesis consist on the study of piezoelectric sensors in force measures, it will be focus in the near quasi-static measures. Nowadays, exist many types of sensors to measure forces, the piezoelectric sensor are just one alternative, that like all the type of sensors have advantages and disadvantages.

The objective is expose the fundamental theory about the piezoelectricity and piezoelectric sensors destined to force measuring, also make an experimental test with different piezoelectric sensors with the aim to observe the results and analyze the produced phenomena and compare the results obtained with the different sensors, contrasting the relationship between the theory and the experimental test.

Keywords: piezoelectric, sensor, force, measure



## Índice de documentos

1. Memoria .....	Pág. Vlli
2. Presupuesto .....	Pág.52
3. Anexos .....	Pág.59



# Documento 1

## Memoria



## Índice general

Resumen

Abstract

## Índice de documentos

### 1. Introducción y teoría

- 1.1 Breve historia de la piezoelectricidad
- 1.2 Materiales piezoeléctricos
- 1.3 Principios físicos de la piezoelectricidad
- 1.4 Constantes características de los materiales piezoeléctricos
  - 1.4.1 Constantes  $d, g$  y  $k$
  - 1.4.2 Constante dieléctrica  $\epsilon$
  - 1.4.3 Constante  $N$  de frecuencia
  - 1.4.4 Constantes  $K_t$  y  $K_p$
  - 1.4.5 Punto de temperatura Curie
- 1.5 Aplicaciones de los materiales piezoeléctricos

### 2. Sensores piezoeléctricos para medición de fuerza

- 2.1 Introducción y propiedades
- 2.2 Criterios de elección
- 2.3 Tipos de sensores para la medición de fuerzas
- 2.4 Otro tipo de tecnologías de sensores piezoeléctricos

### 3. Procesado de la señal

- 3.1 Unidades de medida
- 3.2 Acondicionamiento de la señal con amplificador de carga
  - 3.2.1 Señal de entrada del amplificador de carga
  - 3.2.2 Señal de salida del amplificador de carga
  - 3.2.3 El amplificador de carga ideal
  - 3.2.4 Amplificador de carga real
- 3.3 Escala, sensibilidad y rangos de medida de los sensores
- 3.4 Frecuencia límite inferior de un amplificador de carga
- 3.5 Estabilidad y deriva en medidas cuasi-estáticas
- 3.6 Influencia de los cables, los componentes y la temperatura

### 4. Diseño del circuito

- 4.1 Objeto
- 4.2 Materiales utilizados
- 4.3 Montaje del circuito
- 4.4 Elección de los componentes
- 4.5 Procedimiento
- 4.6 Cálculos teóricos
  - 4.6.1 Tensión de salida
  - 4.6.2 Función de transferencia
  - 4.6.3 Ajuste de la sensibilidad
  - 4.6.4 Limitación del ancho de banda
  - 4.6.5 Constante de tiempo

- 5. Resultados experimentales
  - 5.1 Mediciones con el sensor piezofilm
    - 5.1.1 Con un condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$  Pág.4
      - 5.1.1.1 Voltaje en  $\tau$  ..... Pág.5
      - 5.1.1.2 Voltaje de salida
    - 5.1.2 Con un condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau = 220$ 
      - 5.1.2.1 Voltaje de salida
      - 5.1.2.2 Voltaje en  $\tau$
    - 5.1.3 Comportamiento cuando se ejerce y se deja de ejercer la fuerza
    - 5.1.4 Valoración de los resultados del piezofilm
  - 5.2 Mediciones con el sensor de diafragma
    - 5.2.1 1 Con un condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau = 47$ 
      - 5.2.1.1 Voltaje máximo a la salida
      - 5.2.1.2 Voltaje en  $\tau$
    - 5.2.2 Con un condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau = 220$ 
      - 5.2.2.1 Voltaje máximo a la salida
      - 5.2.2.2 Voltaje en  $\tau$
    - 5.2.3 Algunas medidas dinámicas
    - 5.2.4 Comportamiento cuando se ejerce y se deja de ejercer la fuerza
  - 5.3 El fenómeno de offset a la salida
  - 5.4 Acondicionamiento de la señal con amplificador de
  - 5.5 Unidades de medida
  - 5.6 Acondicionamiento de la señal con amplificador de
- 6. Breve ejemplo de aplicación industrial
  - 6.1 Introducción y objetivo
  - 6.2 Sensor
  - 6.3 Cable del sensor
  - 6.4 Amplificador de carga
  - 6.5 Adquisición de datos
  - 6.6 Esquema del sistema completo
- 7. Conclusiones y trabajos futuros
  - 7.1 Ventajas del sensor de diafragma respecto al piezofilm
  - 7.2 Limitaciones en los materiales utilizados
  - 7.3 Posibles mejoras
- 8. Referencias



## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Polarización del piezoeléctrico, directa e inversa, debida a la simetría de su estructura .....	Pág.2
Fig. 1.2 a) Simetría, no polariza. b) Polarización paralela al esfuerzo. c) Polarización perpendicular al esfuerzo..	Pág.2
Fig. 1.3 Ejes de los sentidos y direcciones de la polarización de un piezoeléctrico .....	Pág.3
Fig. 1.4 Hoja de características de un material piezoeléctrico. ....	Pág.4
Fig. 1.5 Esquema informativo de los distintos tipos de sensores piezoeléctricos. ....	Pág.6
Fig. 1.6 Simbología eléctrica de distintos tipos de sensores piezoeléctricos. ....	Pág.6
Fig. 2.1 Gráfica comparativa galgas extensiométricas vs piezoeléctricos respecto al tiempo de medida y fuerza aplicada. ....	Pág.8
Fig. 2.2 Sensores de medición de fuerza industriales de 1,2,3 y 4 componentes. Fotos propiedad de Kistler® ...	Pág.9
Fig. 2.3 Sensores piezoeléctricos. Arriba, piezo film y su esquema. Abajo, sensor cerámico de diafragma y su esquema. ....	Pág.11
Fig. 3.1 Esquema de un amplificador de carga con un sensor piezoeléctrico de PVDF. ....	Pág.12
Fig. 3.2 Izquierda, gráfica del voltaje de salida de PCB®. Derecha, Gráfica del voltaje de salida. ....	Pág.14
Fig. 3.3 Pérdida de la señal en el primer 1% de la señal de PCB®. ....	Pág.14
Fig. 3.4 Esquema de un sensor piezoeléctrico y amplificador de carga real. ....	Pág.17
Fig. 3.5 Gráfica con las diferentes constantes de tiempo en función de la frecuencia de trabajo deseada. ....	Pág.18
Fig. 4.1 Esquema del circuito empleado. ....	Pág.21
Fig. 4.2 Arriba, montaje del circuito en la protoboard. Abajo, sensores utilizados. ....	Pág.23
Fig.4.3 Pesas de precisión. ....	Pág.24
Fig.4.4 Pesa en piezofilm, abajo espuma. ....	Pág.24
Fig.4.5 Pesa en un apoyo sobre el piezoeléctrico de diafragma. ....	Pág.24
Fig.4.6 Pesa en piezofilm, debajo espuma y sobre apoyo. ....	Pág.24
Fig.4.7 Pesas en piezofilm, debajo espuma. ....	Pág.24
Fig. 4.8 Arriba, gráfica que representa la fuerza aplicada a la entrada en función del tiempo. Abajo, Gráfica que representa la señal en la salida en función del tiempo esperada. ....	Pág.27
Fig. 5.1 Señal de salida del sensor piezofilm con 100 gramos, condensador de realimentación de 100nF y $\tau=100$ .....	Pág.28
Fig. 5.2 Señal de salida del sensor piezofilm con 50 gramos, condensador de realimentación de 100nF y $\tau=100$ . ....	Pág.28
Fig. 5.3 Señal de salida del sensor piezofilm con 20 gramos, condensador de realimentación de 100nF y $\tau=100$ . ....	Pág.29
Fig. 5.4 Tensión de salida en $t=\tau$ respecto a la masa del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y $\tau=100$ . ....	Pág.30
Fig. 5.5 Tensión máxima de salida respecto a la masa del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y $\tau=100$ . ....	Pág.30
Fig. 5.6 Señal de salida del sensor piezofilm con 10 gramos, condensador de realimentación de 220nF y $\tau=220$ . ...	Pág.31
Fig. 5.7 Señal de salida del sensor piezofilm con 30 gramos, condensador de realimentación de 220nF y $\tau=220$ . ...	Pág.31
Fig. 5.8 Señal de salida del sensor piezofilm con 10 gramos, condensador de realimentación de 220nF y $\tau=220$ . ...	Pág.32
Fig. 5.9 Tensión máxima de salida respecto a la masa del sensor piezofilm con 10, 30 y 60 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y $\tau=220$ . ....	Pág.32
Fig. 5.10 Tensión de salida en $t=\tau$ respecto a la masa del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y $\tau=220$ . ....	Pág.33
Fig. 5.11 Señal de salida cuando se ejerce y se deja de ejercer una fuerza, con 60 gramos y 200 nF. ....	Pág.34
Fig. 5.12 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y $\tau=47$ . ....	Pág.35
Fig. 5.13 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 100 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y $\tau=47$ . ....	Pág.35
Fig. 5.14 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 200 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y $\tau=47$ . ....	Pág.36
Fig. 5.15 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y $\tau=47$ . ....	Pág.36
Fig. 5.16 Tensión máxima de salida respecto la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y $\tau=47$ . ....	Pág.37
Fig. 5.17 Tensión de salida en $t=\tau$ respecto a la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100, 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y $\tau=47$ . ....	Pág.38
Fig. 5.18 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 200 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y $\tau=220$ . ....	Pág.38
Fig. 5.19 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 500 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y $\tau=220$ . ....	Pág.39
Fig. 5.20 Tensión máxima de salida respecto la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y $\tau=220$ . ....	Pág.39
Fig. 5.21 Tensión de salida en $t=\tau$ respecto a la masa del sensor piezoeléctrico con 20, 100 y 200 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y $\tau=220$ . ....	Pág.40
Fig. 5.22 Salida con mediciones dinámicas de 50, 100, 200 y 500 gramos respectivamente de izquierda a derecha, condensador de realimentación de 100 nF y $\tau=100$ . ....	Pág.41
Fig. 5.24 Señal de salida cuando se aplica una fuerza y se deja de ejercerla. ....	Pág.41
Fig. 5.23 Tensión máxima de salida respecto a la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con mediciones	

dinámicas de 50, 100, 200 y 500 gramos respectivamente de izquierda a derecha, condensador de realimentación de 100 nF y $\tau=100$ .....	Pág.41
Fig. 5.25 Señal de offset en la salida, probablemente debido al voltaje de offset amplificado. ....	Pág.43
Fig. 6.1 Características del sensor 9091B de Kistler®. ....	Pág.44
Fig. 6.2 Características técnicas del cable de Kistler® modelo 1967A que conecta el sensor con el amplificador de carga. ....	Pág.45
Fig. 6.3 Características técnicas del amplificador de carga 5015 A. ....	Pág.46
Fig. 6.4 Unidad de adquisición de datos modelo 5697A de Kistler® .....	Pág.47
Fig. 6.5 Sistema de medida completo. ....	Pág.47



## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Criterios de elección Galgas extensiométricas vs Sensor piezoeléctrico.</i>	<i>Pág.7</i>
<i>Tabla 2 Datasheet de un sensor de fuerza industrial de la marca PCB®</i>	<i>Pág.10</i>
<i>Tabla 3 Tensión de salida en <math>t=\tau</math> del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y <math>\tau=100</math>.</i>	<i>Pág.29</i>
<i>Tabla 4 Tensión máxima de salida del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y <math>\tau=100</math>.</i>	<i>Pág.30</i>
<i>Tabla 5 Tensión máxima de salida del sensor piezofilm con 10, 30 y 60 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y <math>\tau=220</math>.</i>	<i>Pág.32</i>
<i>Tabla 6 Tensión de salida en <math>t=\tau</math> del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y <math>\tau=220</math>.</i>	<i>Pág.33</i>
<i>Tabla 7 Tensión máxima de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y <math>\tau=47</math>.</i>	<i>Pág.37</i>
<i>Tabla 8 Tensión de salida en <math>t=\tau</math> del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100, 200 y 500 gramos, condensador de realimentación 47 nF y <math>\tau=47</math>.</i>	<i>Pág.39</i>
<i>Tabla 9 Tensión máxima de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y <math>\tau=220</math>.</i>	<i>Pág.37</i>
<i>Tabla 10 Tensión de salida en <math>t=\tau</math> del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 gramos, condensador de realimentación 220 nF y <math>\tau=220</math>.</i>	<i>Pág.40</i>
<i>Tabla 11 Tensión máxima de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con mediciones dinámicas de 50, 100, 200 y 500 gramos respectivamente de izquierda a derecha, condensador de realimentación de 100 nF y <math>\tau=100</math> ...</i>	<i>Pág.41</i>



## 1. INTRODUCCIÓN Y TEORÍA

### 1.1 Breve historia de la piezoelectricidad

En este primer capítulo se realizará una introducción a los antecedentes históricos y a los fundamentos teóricos de la piezoelectricidad la cual ayudará a entender cuales son los principios físicos que interactúan en este fenómeno. El nombre de piezoelectricidad viene del griego “piezein” que significa apretar/estrujar, en 1881 Pierre y Jaques Curie descubrieron el efecto de la piezoelectricidad cuando estudiando la compresión del cuarzo observaron desplazamiento en la carga del cuarzo y polarización de las cargas generando chispas, respecto al nombre de la piezoelectricidad fue propuesto por Hankel ese mismo año y así fue aceptado en el campo de estudio. Durante años este fenómeno resulto ser simplemente una curiosidad y no fue hasta el Primera Guerra Mundial cuando el científico Langevin se le ocurrió que se podría utilizar para detectar submarinos ya que las vibraciones de las ondas acuáticas eran capaces de excitar láminas de cuarzo. Así que se podría decir que no fue hasta después de la Primera Guerra Mundial que se dieron cuenta que los materiales piezoeléctricos podían ser utilizados para detectar fuerza, presión o vibraciones. Después distintas importantes compañías del ámbito tecnológico empezaron a experimentar y comercializar los primeros sensores.

### 1.2 Materiales piezoeléctricos

Hasta día de hoy se conocen una buena cantidad de materiales que se pueden considerar piezoeléctricos, los más habituales suelen ser el cuarzo y la turmalina, además también se han diseñado polímeros como el PVDF (polímero fluoruro de Polivinilideno) muy utilizado en aplicaciones y con propiedades muy definidas. Algunos ejemplos de materiales piezoeléctricos utilizados son:

Cristales naturales como la sal de la Rochelle, cuarzo, topacio, azúcar de caña, etc.

Cristales artificiales como el ortofosfato de galio (GaPO<sub>4</sub>), langasite(La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>), etc.

Cerámicas artificiales como el titanato de bario (BaTiO<sub>3</sub>), titanato zircanato de plomo (o5PbTiZr) también conocido como PZT y muy extendido en aplicaciones, tungstato sódico (Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>), etc.

Polímeros como el polifluoruro de vinilideno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) más conocido como PVDF.

### 1.3 Principios físicos de la piezoelectricidad

Respecto a la teoría física del fenómeno piezoeléctrico, se produce por ejemplo en el cuarzo, formado por cristales de silicio y oxígeno, los cristales de silicio están cargados por una carga positiva y los átomos de oxígeno por una negativa. Cuando el cuarzo está en reposo los cristales de silicio y el oxígeno se encuentran dispersos uniformemente, pero cuando el cuarzo se somete a una compresión o un estiramiento estos cristales se desplazan hacia el lado en el que es ejercida la fuerza y genera una diferencia de potencial, así pues, también esta carga generada es proporcional a la fuerza ejercida sobre él. Por tanto, un esfuerzo mecánico generaría una diferencia de potencial en el material. Los materiales piezoeléctricos también son capaces de hacer el efecto inverso, al aplicar un campo eléctrico y generar vibraciones mecánicas, el ejemplo más sencillo de esto es por ejemplo algunos zumbadores. Otra característica es que los cristales para ser piezoeléctricos necesitan ser anisótropos, esto quiere decir que su estructura molecular no tiene un eje de simetría central para que sus moléculas se polaricen al aplicar un esfuerzo mecánico, los cristales que tienen una estructura moléculas con eje de simetría central no polarizan cuando se aplica un esfuerzo mecánico.



Como este efecto se produce ante una deformación del material también participa la Ley de Hooke para materiales elásticos:

Sin efecto piezoeléctrico sería

$$S = sT$$

Que en este caso con presencia de efecto piezoeléctrico se usaría con la siguiente notación:

$$S_{ij} = [s_{ij}] \cdot [T_j]$$

$$i = 1,2,3$$

$$j = 1, \dots, 6$$

$$D_i = [\varepsilon_{ij}] \cdot [E_j]$$

$$i, j = 1,2,3$$

1/s es el módulo de Young

T es el esfuerzo

Estas ecuaciones se pueden combinar de la siguiente forma:

$$[S_i] = [s_{ij}T_j] + [d_{ik}E_k]$$

$$[D_i] = [d_{in}T_n] + [\varepsilon_{tm}E_m]$$

$$j, n = 1, \dots, 6$$

$$i, k, l, m = 1,2,3$$

Además, para saber en qué dirección se produce el esfuerzo mecánico y el campo magnético hay por convenio una notación la cual se basa en 3 ejes axiales X Y Z, los cuales se llamarán 1 2 3 respectivamente, las torsiones sobre estos ejes serán 4 5 6 respectivamente.

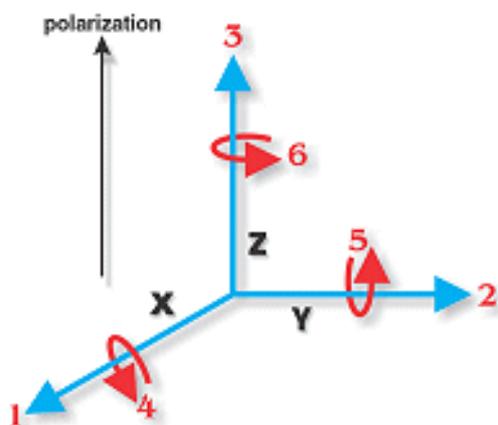


Fig. 1.3 Ejes de los sentidos y direcciones de la polarización de un piezoeléctrico

En esta notación observamos distintos parámetros que se deben tener en cuenta para entender qué denomina cada uno, a continuación, se muestra como ejemplo un datasheet de un material piezoeléctrico:

**Physical and Piezoelectric Properties of T&P Materials**

Material:	T&P-4	T&P-45
<b>Relative Dielectric Constant</b>		
$K^T$	1250	1350
<b>Dielectric Dissipation Factor (Dielectric Loss (%))*</b>		
Tan $\delta$	0.4	0.35
<b>Curie Point (*C)**</b>		
$T_c$	325	320
<b>Electromechanical Coupling Factor (%)</b>		
$K_p$	0.59	0.60
$K_{33}$	0.70	0.68
$K_{31}$	0.35	0.33
$K_{15}$	0.70	0.67
<b>Piezoelectric Charge Constant (<math>10^{12}</math> C/N or <math>10^{-12}</math> m/V)</b>		
$d_{33}$	300	300
$-d_{31}$	125	109
$d_{15}$	480	450
<b>Piezoelectric Voltage Constant (<math>10^{-3}</math> Vm/N or <math>10^{-3}</math> m<sup>2</sup>/C)</b>		
$g_{33}$	26.5	25.5
$-g_{31}$	11	10.5
$g_{15}$	38	35
<b>Young's Modulus (<math>10^{10}</math> N/m<sup>2</sup>)</b>		
$Y_{11}^E$	8	7.6
$Y_{33}^E$	6.8	6.3
<b>Frequency Constants (Hz.m or m/s)</b>		
$N_l$ (longitu)	1524	1700
$N_T$ (thickne)	2100	2005
$N_p$ (planar)	2130	2055
<b>Density (g/cm<sup>3</sup>)</b>		
$\rho$	7.6	7.6
<b>Mechanical Quality Factor</b>		
$Q_m$	600	1400

All values nominal; measurements made 24 hours after polarization.

Maximum voltage:

5-7 VAC /mil for T&P-5 VDC ~2X.

9-11 VAC /mil for T&P-4, T&P-8 VDC ~2X.

\*At 1 kHz, low field.

\*\*Maximum operating temperature = Curie point/2.

Fig. 1.4 Hoja de características de un material piezoeléctrico. Extraída de [www.tpartnerspraha.com](http://www.tpartnerspraha.com).

## 1.4 Constantes características de los materiales piezoeléctricos

### 1.4.1 Constantes d,g y k

Se pueden diferenciar entre las constantes piezoeléctricas d,g,k:

Las cuales presentan dos subíndices, el primer subíndice hace referencia a la dirección del campo eléctrico y el segundo a la dirección en la cual se aplica el esfuerzo. Se muestran algunos ejemplos de como se interpretaría:

$d_{15}$  : Es la relación entre el campo eléctrico generado en dirección 1 al aplicar un esfuerzo de torsión de  $1 \text{ N/m}^2$  en dirección 5, es decir, alrededor del eje 2 y se mide en  $\frac{C}{N}$

$g_{31}$ : Es la relación entre el campo eléctrico generado en dirección 3 al aplicar al aplicar un esfuerzo de tensión de  $1 \text{ N/m}^2$  en dirección 1 y se mide en  $\frac{Vm}{N}$

$k_{31}$ : Es el coeficiente de acoplamiento que hay entre la energía mecánica aplicada a la entrada  $E_k$  en la dirección 1 y la energía eléctrica convertida en la dirección 3.

### 1.4.2 Constante dieléctrica $\epsilon$ :

El primer subíndice hace referencia a la dirección del desplazamiento eléctrico y el segundo a la dirección del campo eléctrico. Por ejemplo:

$\epsilon_{11}^T$ : Es la constante eléctrica para la densidad flujo electrostático con campo eléctrico en dirección 1 en condiciones de tensión constante (con  $T=0$ ).

Constante elástica,  $s$ : El primer índice corresponde a la dirección de la deformación relativa y el segundo al esfuerzo de tensión.

### 1.4.3 Constante N de frecuencia:

Esta constante depende de la frecuencia de resonancia mecánica y de las dimensiones que controlan dicha frecuencia. El subíndice que le acompaña indica la dirección de la vibración resonante. Por ejemplo, para la vibración planar de un disco redondo y fino se índice como  $N_p$ , el cual es el resultado del producto del diámetro del disco y la frecuencia de resonancia. Otro parámetro útil es  $N_t$ , que indica la constante de frecuencia para la vibración en dirección al grosor de un disco piezoeléctrico de poco grosor.

### 1.4.4 Constantes $K_t$ y $K_p$ :

$K_p$  es el acoplamiento planar en un disco de poco grosor, es decir, el acoplamiento entre el campo eléctrico en la dirección 3 y las vibraciones mecánicas en dirección 1 y 2. Por otra parte  $K_t$  es el acoplamiento del campo eléctrico en la dirección 3 y la vibración mecánica en la misma dirección.

### 1.4.5 Punto de temperatura Curie

Es la temperatura en la cual el rendimiento del piezoeléctrico cae y pierde sus propiedades piezoeléctricas de forma permanente. Es recomendable trabajar a una temperatura significativamente por debajo de esta temperatura ya que aproximarse mucho también podría suponer pérdidas en el rendimiento. Se recomienda trabajar en un término medio de temperatura para que no haya ningún problema respecto a esto.

## 1.5 Aplicaciones de los materiales piezoeléctricos

Debido a las propiedades anteriormente descritas este tipo de materiales ha sido objeto de investigación para buscar aplicaciones en las que pueden ser de utilidad. Empresas de ámbito de la ciencia de materiales y de sensores han desarrollado y patentado gran cantidad de aplicaciones. A continuación, se muestra un esquema en el que se exponen la mayoría de las aplicaciones de los piezoeléctricos.

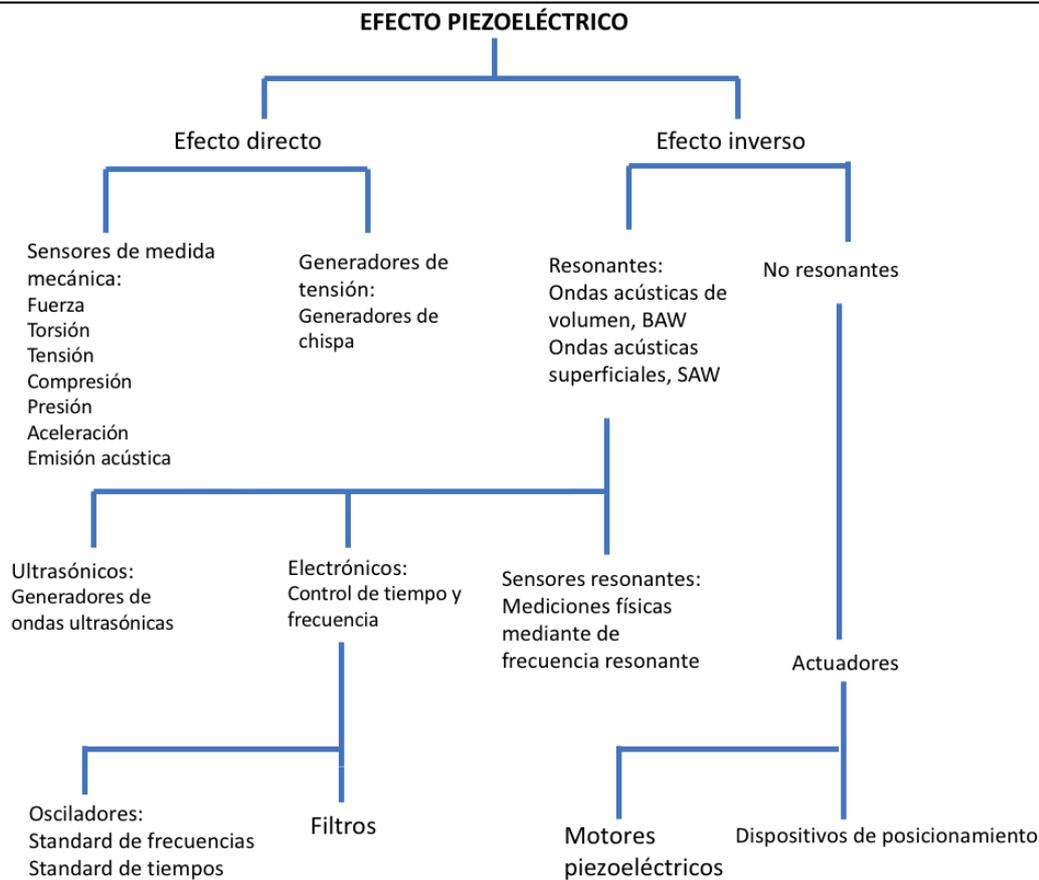


Fig. 1.5 Esquema informativo de los distintos tipos de sensores piezoeléctricos. Traducido y extraído de [1]

### 1.5 Simbología eléctrica/electrónica de los piezoeléctricos

Como el uso de piezoeléctricos está extendido en circuitos eléctricos y en esquemas donde hay que representarlos se ha normalizado simbología específica para los usos más comunes. En la figura se pueden ver los más utilizados:

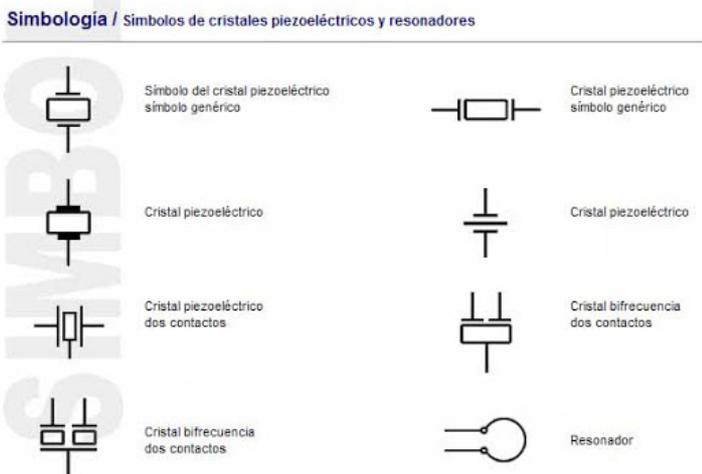


Fig. 1.6 Simbología eléctrica de distintos tipos de sensores piezoeléctricos. Extraído de [www.simbología-electrica.com](http://www.simbología-electrica.com).

## 2. Sensores piezoeléctricos para medición de fuerza

### 2.1 Introducción y propiedades

Este trabajo se centrará sobretodo en los sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza/presión, en el presente capítulo se explicarán algunos de los sensores utilizados para estos fines y sus ventajas e inconvenientes respecto a otros.

Los sensores piezoeléctricos son sensores generadores con los que se puede medir fuerza, tienen como casi todos los sensores sus ventajas y desventajas a la hora de medir la magnitud deseada. Por otra parte, una de las formas más habituales de medir fuerza son las galgas extensiométricas, debido a su buen funcionamiento para las aplicaciones más habituales, su sencillo montaje, acondicionamiento y su coste, entre otras ventajas, suele ser una opción viable.

### 2.2 Criterios de elección

A la hora de elegir uno de los dos métodos mencionados para medir fuerza hay que tener en cuenta qué condiciones se van a tener al realizar la medición y qué tipo de resultados se quieren obtener. A continuación, se muestra una tabla comparativa de los métodos con las ventajas y desventajas de cada uno de ellos:

Criterio	Galgas extensiométricas	Sensor piezoeléctrico
Medición de fuerzas dinámicas		Más adecuado
Rango de medida de fuerza		Más adecuado
Capacidad de sobrecarga		Más adecuado
Linealidad	Más adecuado	
Frecuencia de calibración		Más adecuado
Repetibilidad		Más adecuado
Adaptación a cambios de temperatura	Más adecuado	
Montaje (facilidad acondicionamiento, bajo ruido)	Más adecuado	
Tiempo de vida		Más adecuado
Pequeña dimensión para medir fuerzas con múltiples componentes.		Más adecuado
Medición de variación de pequeñas fuerzas estáticas precargadas		Más adecuado
Medidas de fuerzas estáticas permanentes	Más adecuado	

Tabla 1 Criterios de elección Galgas extensiométricas vs Sensor piezoeléctrico. Basada en tabla extraída de [3]

De los criterios de la tabla, uno de los que tiene mayor relevancia y en el que se va a incidir en el trabajo es el de la medición de fuerzas estáticas y dinámicas ya que va a ser el principal objeto del trabajo. Esto es así debido a que en las medidas estáticas los sensores piezoeléctricos de fuerza no mantienen al 100% la carga durante el tiempo, esto quiere decir que poco a poco pierden carga. En

general, sobretodo en los sensores industriales, a mayor fuerza más puede mantener durante el tiempo la carga generada y por tanto la exactitud de la medición inicial. Este fenómeno de descarga depende sobre todo del parámetro que se llama constante de tiempo de descarga, en inglés discharge time constant (DTC), aunque también depende de ciertas características de los sensores y del propio acondicionamiento de el sensor. Como normal general a mayor DTC más tiempo podrá permanecer la carga en un nivel próximo a su carga inicial. Esto se analizará en más profundidad en posteriores capítulos.

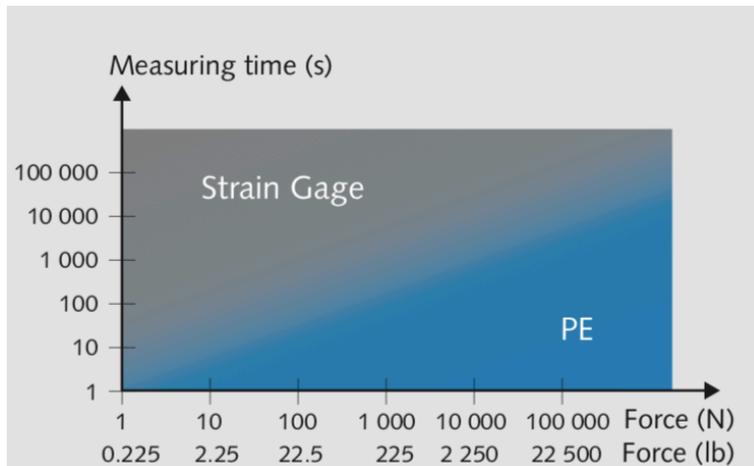


Fig. 2.1 Gráfica comparativa galgas extensiométricas vs piezoeléctricas respecto al tiempo de medida y fuerza aplicada. Extraída de [3]

### 2.3 Tipos de sensores para la medición de fuerzas

Hay variedad de sensores piezoeléctricos que pueden medir fuerza tanto para el ámbito industrial como para el ámbito de uso general. En la industria, por ejemplo, la empresa Kistler ® ofrece:

- Sensores que miden 1 componente de fuerza de los cuales hay dos tipos: los que miden compresión y esfuerzos de tensión (en el eje  $\pm Fz$ ) y fuerza de cizalladura (en el eje  $\pm Fy$ )
  - Sensores que miden 2 componentes de fuerza que miden las fuerzas de tensión en el eje  $\pm Fz$  y al mismo tiempo el esfuerzo de torsión en el eje  $\pm Mz$ .
  - Sensores que miden 3 componentes de fuerza que miden las fuerzas los tres ejes ortogonales  $\pm Fz$ ,  $\pm Fy$ ,  $\pm Fx$  y en los ejes del esfuerzo de cizalladura  $\pm Fx$  y  $\pm Fy$ .
  - Sensores de 3 componentes dinamométrico, básicamente es capaz de medir lo mismo que el que mide 3 componentes y basándose en la posición geométrica de los sensores es capaz de calcular los esfuerzos de tensión  $Mx$ ,  $My$  y  $Mz$ .
  - Sensores que miden la deformación en estructuras, la deformación al ser proporcional a la fuerza, la fuerza puede ser determinada por el sensor. Se puede decir que mide la fuerza de una manera indirecta.
- Kistler ® también ofrece sensores que no necesitan acondicionamiento de la señal externo, ya lo llevan integrado dentro del sensor, es una tecnología llamada ICP ®
- A continuación, se muestran algunas imágenes de cada unos de ellos de la marca Kistler ®

## Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza

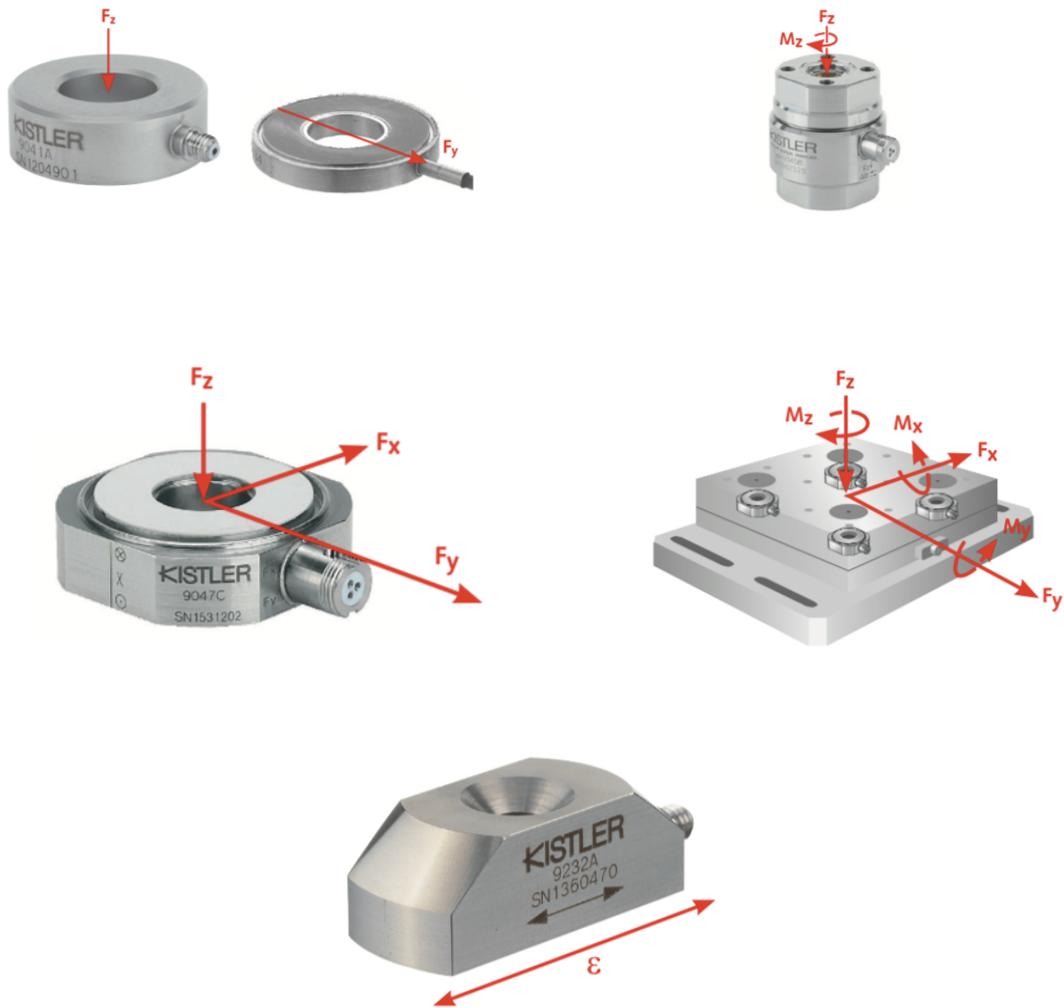


Fig. 2.2 Sensores de medición de fuerza industriales de 1,2,3 y 4 componentes. Fotos propiedad de Kistler®

Por la variedad de sensores y la gran cantidad de situaciones en las que se puede realizar la medición es importante saber elegir el tipo de sensor, parámetros como el rango de fuerza que se desea medir y la sensibilidad son importantes a la hora de elegirlos, para ello hay que consultar la hoja de especificaciones técnicas en la cual suelen venir los parámetros que deberemos saber, en la figura siguiente hay una a modo de ejemplo.

General Purpose Quartz Force Sensors								
		ICP® Sensor Models					Charge Output	
Side Connector Models	Unit	208C01	208C02	208C03	208C04	208C05	218C	
Axial Connector Models		208A11	208A12	208A13	208A14	208A15		218A11
<b>Performance Specifications</b>								
Compression Range <sup>[1]</sup>	lb (N)	10 (45)	100 (450)	500 (2200)	1000 (4500)	5000 (22k)	5000 (22k)	5000 (22k)
Tension Range	lb (N)	10 (45)	100 (450)	500 (2200)	500 (2200)	500 (2200)	500 (2200)	500 (2200)
Maximum Compression	lb (N)	60 (270)	600 (2700)	3000 (13.5k)	6k (27k)	8k (36k)	8k (36k)	8k (36k)
Maximum Tension	lb (N)	60 (270)	500 (2200)	500 (2200) <sup>[2]</sup>	500 (2200) <sup>[2]</sup>	500 (2200) <sup>[2]</sup>	500 (2200)	750 (3300)
Sensitivity (± 15%)	value	500 mV/lb	50 mV/lb	10 mV/lb	5 mV/lb	1 mV/lb	18 pC/lb	18 pC/lb
	value	110 mV/N	11 mV/N	2.2 mV/N	1.1 mV/N	0.22 mV/N	4 pC/N	4 pC/N
Resolution (broadband)	lb rms	0.0001	0.001	0.005	0.01	0.05	see note <sup>[3]</sup>	see note <sup>[3]</sup>
	N rms	0.00045	0.0045	0.022	0.045	0.22	see note <sup>[3]</sup>	see note <sup>[3]</sup>
Amplitude Linearity	% FS	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Upper Frequency Limit	Hz	36k	36k	36k	36k	36k	36k	36k
Low Freq. Response (-5%)	Hz	0.01	0.001	0.0003	0.0003	0.0003	see note <sup>[3]</sup>	see note <sup>[3]</sup>
Temperature Range	°F	-65 to +250	-65 to +250	-65 to +250	-65 to +250	-65 to +250	-300 to +400	-300 to +400
	°C	-54 to +121	-54 to +121	-54 to +121	-54 to +121	-54 to +121	-184 to +204	-184 to +204
Temperature Coefficient	%/°F	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.03	≤ 0.03
	%/°C	≤ 0.09	≤ 0.09	≤ 0.09	≤ 0.09	≤ 0.09	≤ 0.054	≤ 0.054
<b>Electrical Specifications</b>								
Discharge Time Constant <sup>[4]</sup>	second	≥ 50	≥ 500	≥ 2000	≥ 2000	≥ 2000	see note <sup>[4]</sup>	see note <sup>[4]</sup>
Output Impedance	ohm	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	≤ 100	N/A	N/A
Output Bias Voltage	+VDC	8 to 12	8 to 14	8 to 14	8 to 14	8 to 14	N/A	N/A
Voltage Excitation	+VDC	18 to 30	20 to 30	20 to 30	20 to 30	20 to 30	N/A	N/A
Constant Current Excitation	mA	2 to 20	2 to 20	2 to 20	2 to 20	2 to 20	N/A	N/A
Capacitance	pF	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	14	14
Insulation Resistance	ohm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	≥ 1x10 <sup>12</sup>	≥ 1x10 <sup>12</sup>
Polarity: Compression		positive	positive	positive	positive	positive	negative	negative
<b>Physical Specifications</b>								
Mounting Thread	size	see note <sup>[5]</sup>	see note <sup>[5]</sup>	see note <sup>[5]</sup>	see note <sup>[5]</sup>	see note <sup>[5]</sup>	see note <sup>[5]</sup>	see note <sup>[5]</sup>
Connector	type	10-32 coax	10-32 coax	10-32 coax	10-32 coax	10-32 coax	10-32 coax	10-32 coax
Stiffness	lb/μin (kN/μm)	6 (1.05)	6 (1.05)	6 (1.05)	6 (1.05)	6 (1.05)	6 (1.05)	6 (1.05)
Sealing	type	see note <sup>[6]</sup>	see note <sup>[6]</sup>	see note <sup>[6]</sup>	see note <sup>[6]</sup>	see note <sup>[6]</sup>	hermetic weld	epoxy
Material (stainless steel)	type	316L / 17-4	316L / 17-4	316L / 17-4	316L / 17-4	316L / 17-4	316L / 17-4	316L / 17-4
Impact Cap Material (stainless steel)	type	17-4 PH	17-4 PH	17-4 PH	17-4 PH	17-4 PH	17-4 PH	17-4 PH
Weight	oz (gm)	0.80 (22.7)	0.80 (22.7)	0.80 (22.7)	0.80 (22.7)	0.80 (22.7)	0.79 (22.4)	0.71 (20.0)
<b>Supplied Accessories<sup>[7]</sup></b>								
Mounting Stud (2 each supplied)	model	081B05/M081A62	081B05/M081A62	081B05/M081A62	081B05/M081A62	081B05/M081A62	081B05/M081A62	081B05/M081A62
Impact Cap	model	084A03	084A03	084A03	084A03	084A03	084A03	084A03
Thread Locker Adhesive	model	080A81	080A81	080A81	080A81	080A81	080A81	080A81
<b>Options<sup>[8]</sup></b>	<b>prefix</b>	<b>N,W</b>	<b>N,W</b>	<b>N,W</b>	<b>N,W</b>	<b>N,W</b>	<b>P,W</b>	<b>P,W</b>

**Notes:** [1] 1 lb = 4.448 N (values shown are approximate). [2] Maximum tension for axial connector models 208A13, 208A14, and 208A15 is 750 lb (3300 N). [3] Resolution, System Discharge Time Constant and Low Frequency range are dependent upon sensor cable and signal conditioning used. [4] The Discharge Time Constant (DTC) determines low frequency response according to the relationship  $f-5\% = 3/(2\pi(DTC))$ . Sensors accurately follow transient events lasting a few percent of the DTC. For square wave events, the DTC should be 100 times the event duration. For ramp shape events, the DTC should be 50 times the event duration and for a half sine pulse the DTC should be 25 times the pulse duration. To ensure measurement system compatibility, use DC coupled or Long Time Constant signal conditioners for long duration transient measurements. [5] Side connector models have 10-32 female mounting thread. Axial connector models have M7 x 0.75 male mounting thread. [6] Side connector models are hermetically sealed. Axial connector models are epoxy sealed. [7] See page 2.13 for complete accessory listings. [8] See page 1.17 for a description of options (specifications for optional versions may differ slightly. Consult factory before ordering). For complete listing of metric mounting studs and screws, see page 2.23.

Tabla 2 Datasheet de un sensor de fuerza industrial de la marca PCB ®

## 2.4 Otro tipo de tecnologías de sensores piezoeléctricos

Fuera de la industria como uso general también existen algunos que a pesar de ser de menos precisión pueden funcionar en cierto tipo de aplicaciones.

Pueden ser, por ejemplo:

- Sensores film de PVDF: Estos pueden ayudar a medir vibraciones y fuerzas no muy grandes ya que al ser láminas muy finas se someten a mucha deformación. Suelen tener buena sensibilidad, son relativamente económicos y de muy poco grosor.

- Sensores piezoeléctricos de diafragma cerámicos de uso general: normalmente de material piezoeléctrico cerámico, se componen de la cerámica piezoeléctrica entre dos láminas de latón y un electrodo con un diafragma que permite que cuando recibe algún tipo de fuerza la transmita al material piezoeléctrico. Suelen poder adquirirse a precio muy económico, los más solamente por unos céntimos de euro.

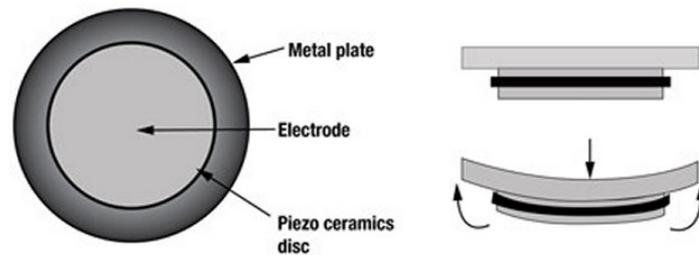
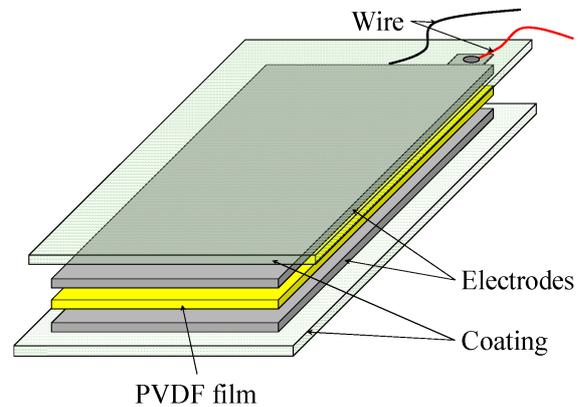
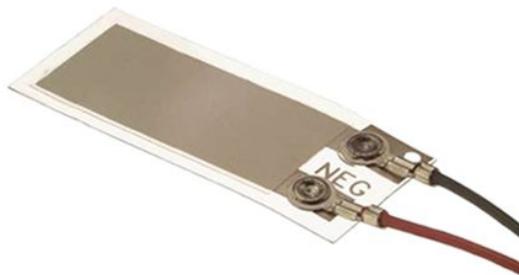


Fig. 2.3 Sensores piezoeléctricos. Arriba, piezo film y su esquema (Fotos propiedad de Measurement Specialities®). Abajo, sensor cerámico de diafragma y su esquema. (Foto propiedad de Murata®)

### 3. PROCESADO DE LA SEÑAL

#### 3.1 Unidades de medida

Los sensores piezoeléctricos entregan en su salida una señal de carga eléctrica. La carga eléctrica es una magnitud que, a veces, no se tiene clara ya que no es tan conocida como lo puede ser la tensión o la intensidad, en unidades del S.I se mide Culombios (C) aunque en este tipo de aplicaciones la medida más empleada y adecuada serán los pC, un Culombio se puede describir aproximadamente como la cantidad de electricidad que transporta 1 Amperio de intensidad en 1 segundo.

#### 3.2 Acondicionamiento de la señal con amplificador de carga

Para poder trabajar con la señal de salida del sensor se debe amplificar la señal y convertirla en variaciones proporcionales de tensión, para ello será necesario emplear un dispositivo electrónico llamado amplificador de carga, aunque la función real de éste se ajustaría más a lo que se podría llamar un convertidor carga-tensión. Los principios básicos del funcionamiento del amplificador de carga fueron descritos por primera vez por W.P. Kistler en 1950 y desde entonces se comercializó con el nombre amplificador de carga por la empresa de componentes piezoeléctricos Kistler®, aunque como se ha comentado anteriormente en este mismo capítulo el nombre que más se adapta a la función que realmente hace sería convertidor carga-tensión porque realmente no amplifica la carga de la salida, lo que hace es convertir la carga en variaciones de voltaje proporcionales las cuales dan la apariencia de ser señales de mayor magnitud, más fáciles de medir y manipular. [Gustav Gautschi, 2002]

Las características básicas que debe tener un amplificador de carga son:

- Impedancia de entrada máxima
- Corriente de salida mínima

Según las características de la medición que se quiera realizar se deberá configurar este amplificador de una forma adecuada para que entregue a la salida una señal que sea fácil de tratar e interpretar. Factores como las características del sensor, las interferencias, el rango de frecuencias en el que se quiera trabajar, la amplificación deseada, etc. son clave a la hora de abordar el diseño.

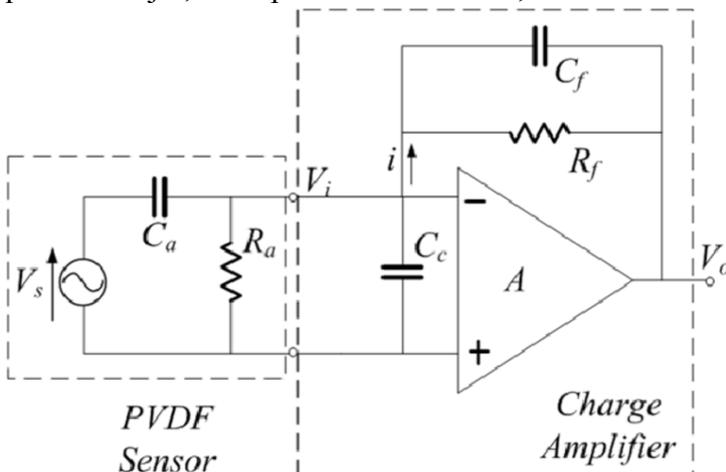


Fig. 3.1 Esquema de un amplificador de carga con un sensor piezoeléctrico de PVDF.

### 3.2.1 Señal de entrada del amplificador de carga

La señal de entrada al amplificador será la que le entregará el sensor piezoeléctrico, eléctricamente hablando un sensor piezoeléctrico es un condensador con un elemento piezoeléctrico actuando como dieléctrico, por tanto, *se podría decir que un sensor piezoeléctrico es un condensador activo que se carga a sí mismo cuando se activa mecánicamente.* [Gustav Gautschi, 2002]

### 3.2.2 Señal de salida del amplificador de carga

En la señal de salida la salida obtenida es la de un condensador que se carga y se descarga. Así pues, su tensión guardará la relación  $U = \frac{Q}{C}$ . Analizándose en detalle se puede concluir que se comporta como un condensador real en descarga, eso quiere decir que la resistencia de aislamiento es finita y que el voltaje asociado a la carga del condensador decrecerá exponencialmente, el motivo es porque al existir una corriente de descarga  $I = \frac{U}{R}$  la cual fluye por la resistencia finita el voltaje decrece a la vez que también lo hará la corriente de carga. La ecuación que describe la descarga es

$$U(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

La corriente inicial  $I_0 = \frac{U_0}{R}$  fluye y se produce el proceso de descarga. Durante este se puede encontrar un instante relevante llamado constante de tiempo de descarga definida como

$$t = \tau = R \cdot C.$$

Este tiempo  $\tau$  es lo que se denomina constante de tiempo del condensador, el cual para este el voltaje tendrá un valor de:

$$U\tau = U_0 e^{-1} \approx 0,37U_0$$

Esto significa que para este punto la señal mantendrá el 37% de su valor inicial. El voltaje continuará decreciendo hasta que la curva asintótica decrezca hasta el valor de cero, esto será aproximadamente cuando el tiempo alcance un valor aproximado de 5 veces la constante de tiempo de descarga. La constante de tiempo de descarga también es conocida como DTC, del inglés discharge time constant. La DTC puede variar entre un rango de unos pocos segundos hasta más 2000 segundos en algunos casos.

Respecto a la carga, esta decaerá siguiendo la siguiente función exponencial

$$q = Q e^{-\frac{t}{RC}}$$

Donde:

q = carga instantánea

Q = carga inicial

R = Valor de la resistencia de polarización

C = Capacidad total: sensor amplificador

e = número e, base del logaritmo natural

Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza

En estas gráficas se puede apreciar lo explicado anteriormente:

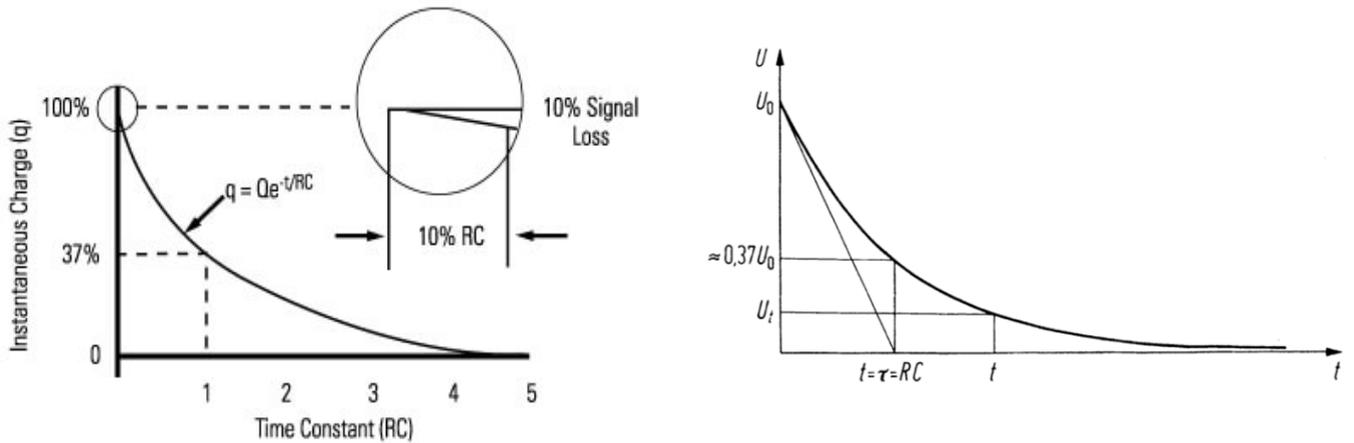


Fig. 3.2 Izquierda, gráfica del voltaje de salida de PCB®. Derecha, Gráfica del voltaje de salida, extraída de [1]

En la señal de salida del amplificador de carga se calcula que hasta el 10% de la DTC se pierde un 10% del valor inicial de forma proporcional. Es decir, si se quiere obtener una medida con un margen de error del 3% mediremos como mínimo en el primer 3% de la DTC. En la imagen se ilustra la precisión en la medida de la DTC.

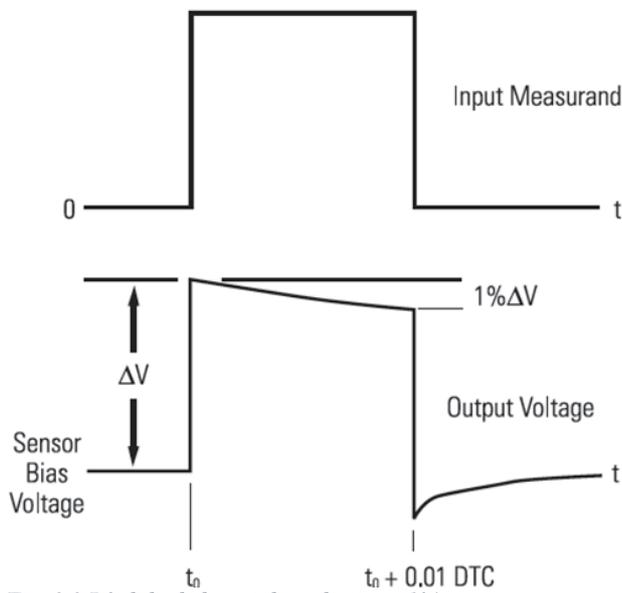


Fig. 3.3 Pérdida de la señal en el primer 1%

### 3.2.3 El amplificador de carga ideal

Una forma básica de describir un amplificador de carga es realmente un amplificador inversor con una impedancia de entrada tan grande como sea posible. El amplificador tiene un condensador de alta resistencia de aislamiento situado en la realimentación el cual lleva al voltaje de la entrada a cero mientras se mantiene esta resistencia de aislamiento.

La relación entre el voltaje de entrada y de salida se expresa de la siguiente forma

$$V_o = -G_i V_i$$

Dónde

$V_o$  = Voltaje de salida

$V_i$  = Voltaje de entrada

$G_i$  = Ganancia del amplificador operacional

Por tanto, la tensión generada en el condensador de realimentación sería

$$V_c = V_c - V_i = -\frac{U_o}{-G} = V_o \left(1 + \frac{1}{G}\right)$$

Al asumir un amplificador ideal a la entrada del amplificador no habría ninguna corriente de fuga, esto haría que se cumpla la Ley de Kirchoff a la perfección

$$I_c + I_i + I = 0$$

Donde

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I_c = C_r \frac{dV_c}{dt} = \left(1 + \frac{1}{G_i}\right) C_r \frac{dV_o}{dt}$$

La suma total de las capacidades, la del sensor, el cable y la de la entrada del operacional será la capacidad total a la entrada del circuito,  $C_T$ .

$$\frac{dQ}{dt} = -\left(1 + \frac{1}{G_i}\right) C_r \frac{dV_o}{dt} - \frac{1}{G_i} C_i \frac{dV_o}{dt}$$

Integrando e ignorando la constante de integración queda resulta

$$V_0 = -\frac{Q}{\left(1 + \frac{1}{G_i}\right) C_r + \frac{1}{G_i} C_i}$$

Suponiendo ahora una ganancia infinita

$$V_0 = -\frac{Q}{C_r}$$

Entonces se puede afirmar que el voltaje de salida es directamente proporcional a la carga entregada por el generador, ya que la capacidad del condensador será constante. En condiciones ideales con una ganancia infinita no habría ni siquiera tensión en el sensor y el cable, y las capacidades de los cables y la resistencia de aislamiento, por tanto, la única corriente que existiría sería la generada por el sensor y la que iría cargando el condensador de realimentación. La Ley de Kirchhoff dice que en el punto donde se encuentran estas dos corrientes serían iguales, pero con distinto signo, esto quiere decir que la corriente del sensor y la del condensador de realimentación serán iguales, pero con signo opuesto, siendo el voltaje a la salida la misma que la entregada por el condensador. [Gustav Gautschi, 2002]

$$V_O = V_C$$

Además, el comportamiento cuasi-estático estaría determinado por la constante de tiempo

$$\tau = R_R C_R$$

Además, como se ha dicho antes si en un caso ideal habría una resistencia de realimentación infinita y haría posible realizar medidas estáticas reales.

### 3.2.4 Amplificador de carga real

En la realidad los componentes del amplificador de carga no son ideales ni poseen ninguna propiedad infinita. La impedancia de entrada de un operacional suele estar en el orden de los  $M\Omega$ , en la entrada del operacional hay corrientes como la de polarización y de offset del orden de  $nA$  o  $fA$ , la resistencia de realimentación no llega a ser infinita pero sí de valores de docenas de  $T\Omega$ . Esto hace que en la realidad no tenga un comportamiento exacto al ideal, aunque en la práctica se puede llegar a resultados bastante aproximados, como se verá en capítulos posteriores.

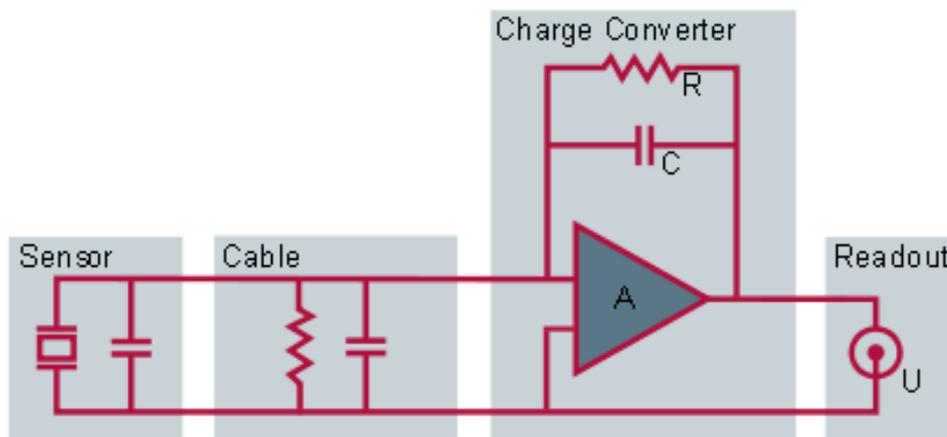


Fig. 3.4 Esquema de un sensor piezoeléctrico y amplificador de carga real. Extraída de [www.hbm.com](http://www.hbm.com).

### 3.3 Escala, sensibilidad y rangos de medida de los sensores

Los sensores piezoeléctricos que proveen los fabricantes suelen expresar su sensibilidad en  $\frac{pC}{U.M}$  como por ejemplo  $pC/N$ ,  $pC/bar$ ,  $pC/g$  y algunas más, según el uso del sensor y el tipo de fuerzas/presiones que deba medir. Es muy importante que el fabricante facilite este dato junto con la capacidad del sensor para así poder hallar parámetros como la sensibilidad de tensión. Como se ha explicado anteriormente como los amplificadores operacionales entregan una tensión de sentido opuesto a la entregada por el sensor, entonces en la práctica los fabricantes de sensores ofrecen sensibilidades negativas y así poder facilitar una positiva en la salida. Esto es fácil de comprobar en los sensores de presión y fuerza. La mayoría de amplificadores de carga tienen ajustada su sensibilidad en la magnitud de  $V/pC$  que permite trabajar de una forma sencilla. [Gustav Gautschi, 2003]

Se calcular la sensibilidad total del sistema la ecuación mediante la siguiente ecuación  $S_T = S_s * S_A$  siendo  $S_s$  la sensibilidad el sensor y  $S_A$  la del amplificador.

### 3.4 Frecuencia límite inferior de un amplificador de carga

Los amplificadores de carga para aplicaciones de presión/fuerza en general pueden ser de dos tipos:

- Unos pueden tener un límite de frecuencia inferior más o menos bajo, del orden de docenas de Hz, los cuales pueden servir para medidas dinámicas.

- Otros que tienen un límite de frecuencia inferior lo más bajo posible, del orden de muy pocos Hz, los cuales permiten realizar medidas cuasi-estáticas.

Este límite inferior en la frecuencia lo determina principalmente de la constante de tiempo del amplificador de carga,  $\tau = R_R C_R$ . En esta la que al final predominará en el diseño de la constante de tiempo será la resistencia de realimentación en paralelo con el condensador, debido a que esta puede ser de hasta valores de unos  $100 T\Omega$  y que en la práctica puede conseguir unas constantes de tiempo muy altas. Pero se ha de prestar atención a que estas constantes de tiempo tan altas tardan mucho en llegar a un valor de 0, lo cual a la hora de medir se podrían tener errores en las medidas sucesivas debido a las corrientes en el amplificador y a la deriva producida.

Para hallar la frecuencia límite se emplearía la fórmula

$$f_L = \frac{1}{2\pi \tau} = \frac{1}{2\pi R_R C_R}$$

También hay que tener en cuenta que las constantes de tiempo muy altas pueden conllevar más corrientes internas, saturación y la deriva de la señal de salida.

En los amplificadores de carga comerciales muchas veces vienen con parámetros configurables, entre ellos la constante de tiempo, por ejemplo vienen con un selector donde se puede elegir una constante corta, media o larga. Corta y media para mediciones dinámicas (CA) y larga para mediciones cuasi-estáticas (CC), principalmente lo que sucede en el circuito interno es una selección de la resistencia adecuada en función de lo que se elija.

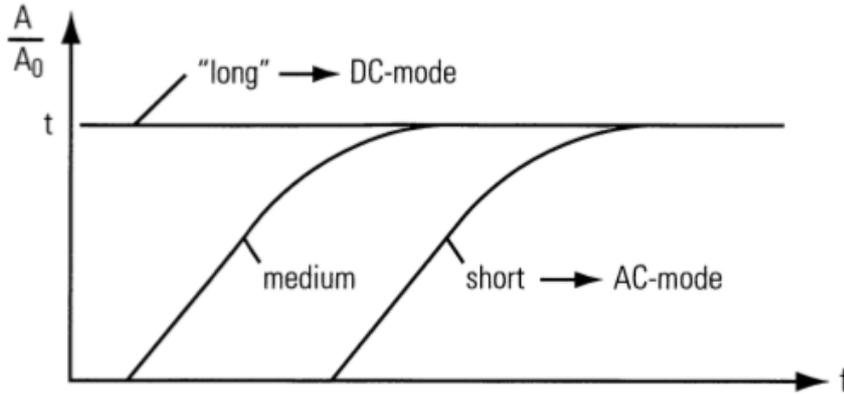


Fig. 3.5 Gráfica con las diferentes constantes de tiempo en función de la frecuencia de trabajo deseada. Extraído de [1]

En las mediciones en AC a veces debido a las complicaciones que pueden surgir comentadas anteriormente, es habitual en los amplificadores de carga comerciales digitalizar la señal de salida, sobretodo en análisis de vibraciones o ruido, el post procesado de la señal a formato digital ayuda a filtrarlo de una manera más adecuada en función del tipo de medición. Posteriormente esta señal procesada se vuelve a convertir a señal analógica en su salida o se deja como digital, a conveniencia del fabricante.

### 3.5 Estabilidad y deriva en medidas cuasi-estáticas

Cuando se hacen medidas cuasi-estáticas a parte de la constante de carga y parámetros anteriormente mencionados, debido a que se en la práctica se usa un amplificador de carga real pueden surgir fenómenos como la deriva. En ningún caso la deriva es deseable y puede ser debida a uno o una combinación de varios motivos. Esta deriva hace que la señal en estado de aparente reposo se “desvie” negativamente o positivamente provocando incertidumbre en las medidas. Algunos motivos por los que el amplificador de carga real puede “crear” este fenómenos pueden ser:

- Constante de tiempo del amplificador de carga
- Insuficiente estabilidad en cero
- Corrientes indeseadas en la entrada del circuito creadas por el voltaje de offset
- Defectos en el MOS-FET a la entrada
- Errores debidos a la resistencia de realimentación muy baja y una constante de tiempo también insuficiente
- Absorciones del dieléctrico del condensador
- Corrientes indeseadas a la entrada del amplificador por el MOS-FET, J-FET...

### 3.6 Influencia de los cables, los componentes y la temperatura

Aunque en la mayoría de casos los cables no tengan influencia si son aplicaciones que requieren de una buena precisión como puede ocurrir con sensores piezoeléctricos, se debe tener en cuenta que los cables tienen una resistencia (aunque esta para cables muy finos y cortos es casi inexistente) y una capacidad por la cual pasa la corriente, por tanto existe una pérdida, esto en la realidad lo tendríamos en cuenta para longitudes de cable significativamente largas, se podría suponer más de 100 metros. El factor de pérdidas en un cable en función de su capacidad vendría determinado por la siguiente ecuación:

$$K = \frac{1}{1 + \frac{1}{G_i} + \left(1 + \frac{Ck}{Cl}\right)}$$

Siendo

K= factor de reducción

Ck= capacidad por metro

Cl= longitud del cable

Gi = ganancia del amplificador

Por la expresión se puede deducir que una baja ganancia implicaría que las pérdidas fuesen mayores. Por ejemplo, para un cable de 100 metros con una capacidad de 70 pF/m tendría unas pérdidas totales de 7 nF y por tanto según la fórmula un factor de reducción considerable.

## 4. DISEÑO DEL CIRCUITO

### 4.1 Objeto

Se ha montado un circuito experimental de un sensor y un amplificador de carga, con el fin de visualizar de forma práctica los fundamentos teóricos y los problemas que se pueden encontrar que se han explicado anteriormente. Cabe destacar que se ha realizado de modo “low cost” debido a que los sensores industriales y los amplificadores de carga profesionales tienen un precio elevado (podría costar del orden de miles de euros un sistema industrial, se comentará con más detalle en el capítulo 6) así que se han usado componentes dentro de lo que cabe accesibles para casi cualquiera, el uso de componentes no profesionales se tendrá en cuenta en los resultados. Por último, también hay que destacar que poner motivos técnicos y de tiempo se ha montado en placa board y no en un circuito impreso.

En el diseño del amplificador de carga se ha pretendido realizarlo con una constante de tiempo relativamente grande, teniendo en cuenta las limitaciones técnicas, con el fin de poder hacer medidas lo más cercanas a las cuasi-estáticas que se pueden realizar en los sistemas industriales, así como hacerlo lo más sencillo posible para evitar acumular incertidumbre y posibles ruidos en el circuito.

### 4.2 Materiales utilizados

Los material e instrumentos de medida utilizados han sido:

- Sensores piezoeléctricos
  - SDT1-028K (1-1000288-0) de Measurement Specialities®
  - Piezoeléctrico de diafragma 7BB-20-6L0 de MuRata®
- Condensadores
  - 47 nF
  - 100 nF
  - 220 nF
- Resistencias
  - Vishay RNX0501G00FNEL 1 G $\Omega$   $\pm$  1%, 1,2W
  - Resistencia de 5,6 M $\Omega$   $\pm$ 5%
- Amplificador operacional TL 071 C
- Proto board
- Cables
- Fuente de alimentación
- Osciloscopio
- Sondas de osciloscopio
- Pesas de precisión
- Esponja
- Cinta adhesiva

### 4.3 Montaje del circuito

El montaje del circuito se ha basado en el siguiente esquema:

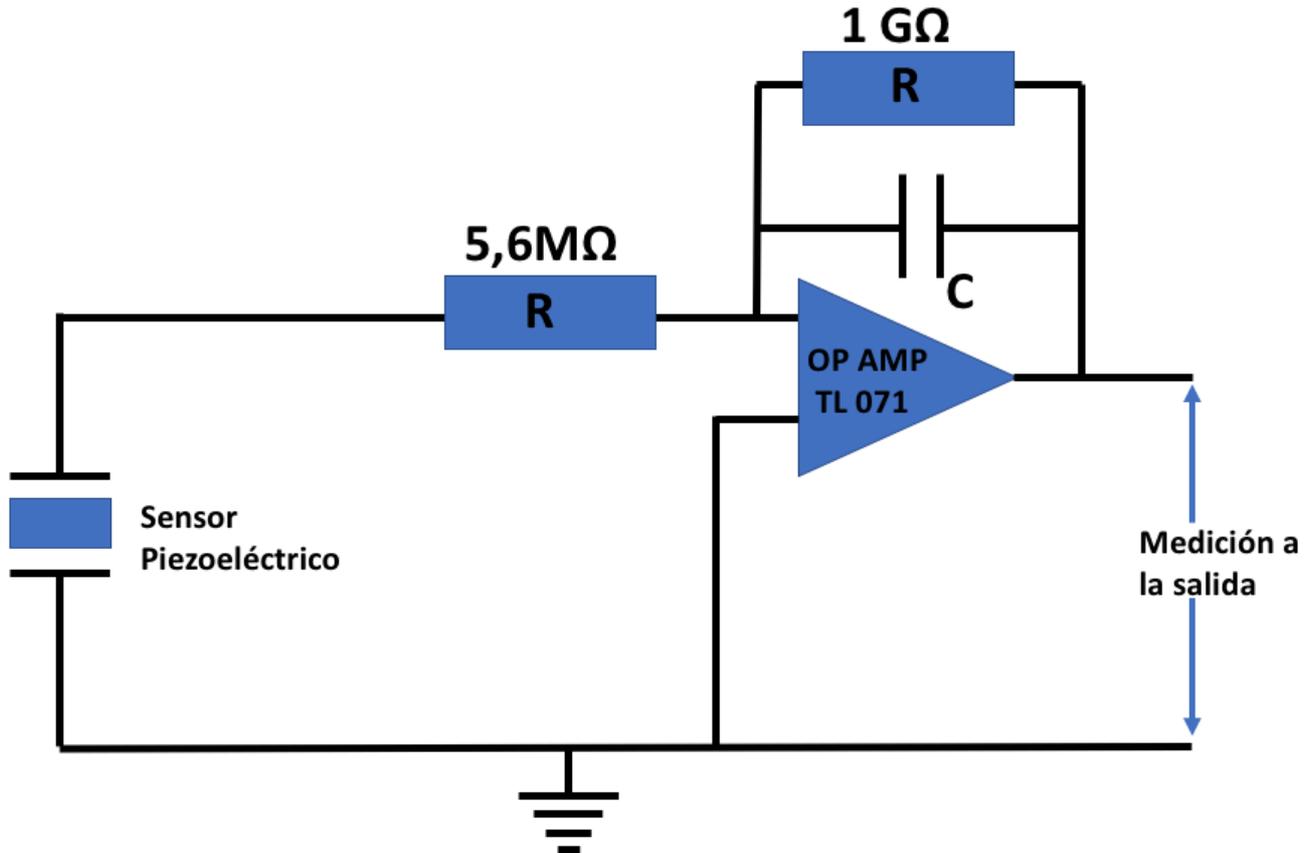


Fig.4.1 Esquema del circuito empleado

### 4.4 Elección de los componentes

A pesar de la aparente simplicidad que un amplificador de carga puede tener, como se ha visto anteriormente hay una notoria cantidad de puntos críticos que hay que tener en cuenta, por ello a la hora de elegir los componentes del circuito hay que elegirlos con criterio.

El amplificador operacional principalmente debe tener corrientes de polarización y de offset lo más bajas posible, muy bajo ruido, bajo voltaje de offset, preferiblemente rail to rail, una elevada ganancia, etc. es decir, que principalmente entregue a su salida una señal de salida lo más “limpia” posible y con una buena amplificación. En este caso se ha elegido el TL 071 C por su precio tan reducido, su fácil acceso en el laboratorio de electrónica y su aceptable respuesta en las pruebas previas que se han realizado.

La resistencia de realimentación tiene gran relevancia en la constante de tiempo ya que  $\tau = R \cdot C$  y lo que se desea es que esta sea lo suficientemente grande. En este caso se ha elegido la Vishay RNX0501G00FNEL 1 GΩ ± 1%, 1,2W la cual tiene una resistencia muy elevada de un 1 GΩ con una tolerancia pequeña, de tan solo el 1%, esto es importante porque si se emplease una tolerancia como se ve en resistencias del orden de los KΩ de un 10% por ejemplo, conllevaría errores

## Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza

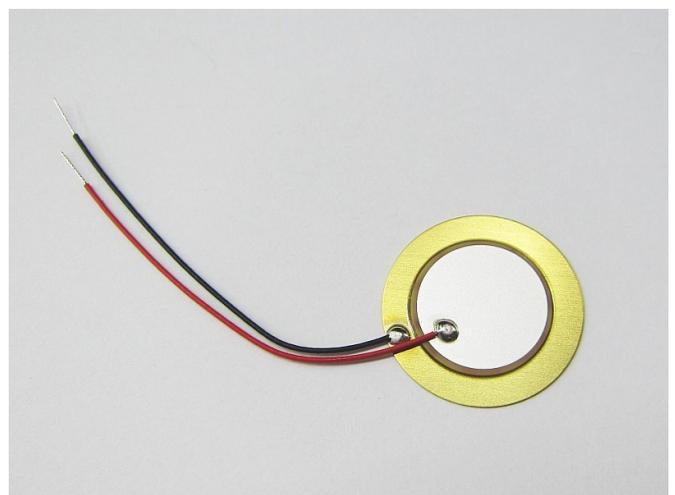
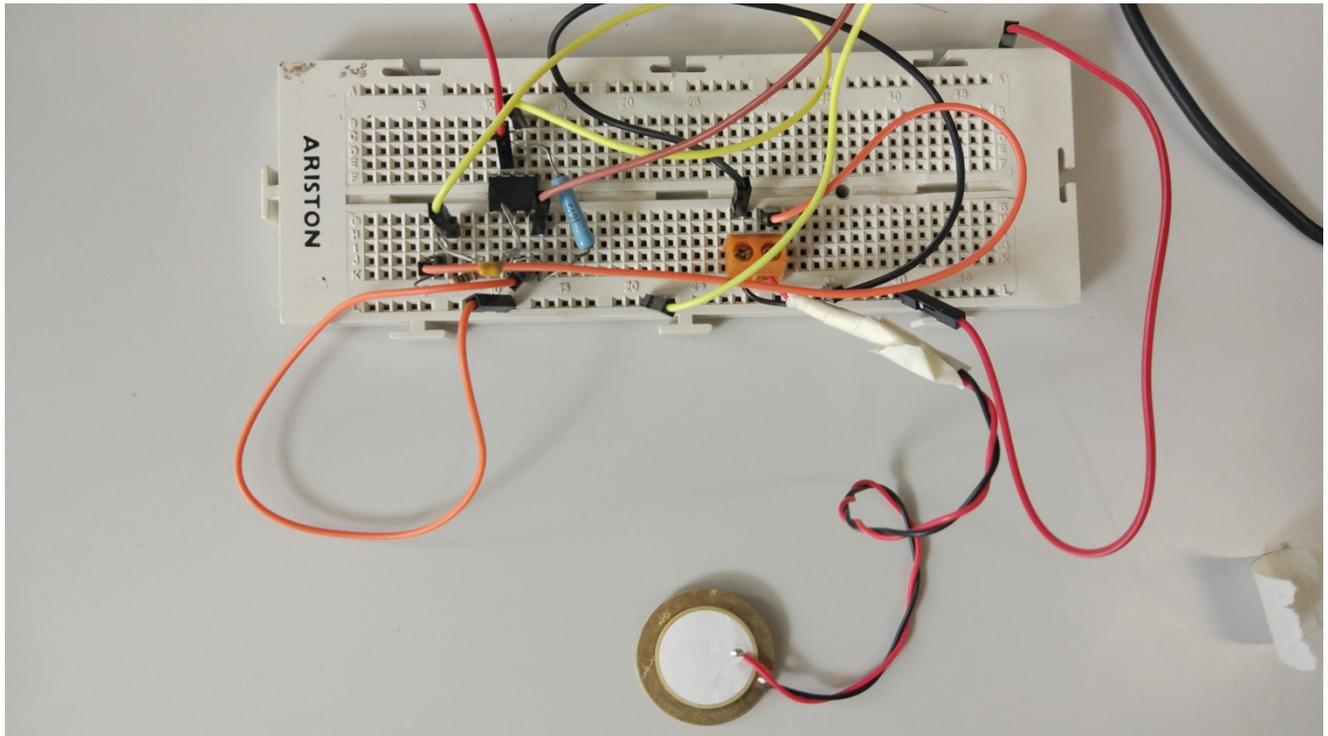
muy elevados, en este caso si fuese del 10% sería de unos 100  $M\Omega$  lo cual sería demasiado para un circuito con las características demandadas.

Se han montado condensadores cerámicos de distintas capacidades para poder comprobar que los aspectos teóricos se cumplen, respecto a estos no hay consideraciones muy especiales solamente que se ajusten más o menos con el diseño.

Se han elegido dos piezoeléctricos diferentes de uso general, por una parte, uno de los llamados piezo film de PVDF concretamente el modelo SDT1-028K (1-1000288-0) de Measurement Specialities®, además está apantallado, esto evita posibles ruidos que puedan interferir en el sensor y el cable. El otro sensor utilizado es un sensor de diafragma cerámico, el modelo es 7BB-20-6L0 de Murata® y se trata de un sensor que su uso principal es para aplicaciones de sonido, aunque en este caso se intentará comprobar que debido a su naturaleza piezoeléctrica aún cumple ciertos aspectos teóricos para otros usos como la medición de fuerzas.

Los demás componentes son los de uso habitual en el laboratorio de electrónica. Cables modelo DuPont que suelen funcionar bien y además de tamaño de unos 10-15 centímetros de longitud por tanto las pérdidas en cables se omitirán por completo. Una protoboard de marca Ariston® la cual debería tener una calidad aceptable. Por otra parte, los instrumentos de medida utilizados son también los habituales en el laboratorio de electrónica, un osciloscopio, sondas y fuente de alimentación simétrica.

Para la medición de las fuerzas se han usado pesas de precisión con medidas desde 1 gramo hasta 500 gramos que colocándolas de la manera más cuidadosa posible en principio deberían de entregar una fuerza aproximada a la de su masa.



*Fig. 4.2 Arriba, montaje del circuito en la protoboard. Abajo, sensores utilizados.*

## 4.5 Procedimiento

Una vez montado el circuito, se configura el canal de salida en modo DC para mediciones estáticas y en modo AC para dinámicas, esto es muy importante porque de otro modo no se podrían hacer las mediciones correctamente. Después se ha conectado la sonda del osciloscopio en la salida del amplificador de carga. Por último, se ha procedido a depositar cuidadosamente las pesas de precisión sobre el sensor, para ello se ha intentado aplicar de una manera más o menos homogénea, ni por aproximación de una forma precisa, pero en principio suficiente para ver resultados. Se ha ideado un pequeño diseño para poder hacerlo, como se muestra a continuación en las fotos.



Fig.4.3 Pesas de precisión.

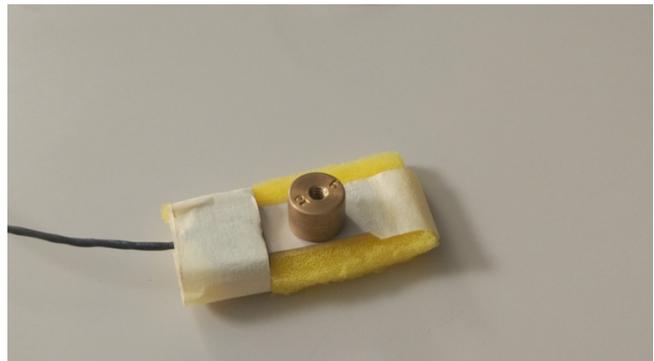


Fig.4.4 Pesa en piezofilm, debajo espuma.

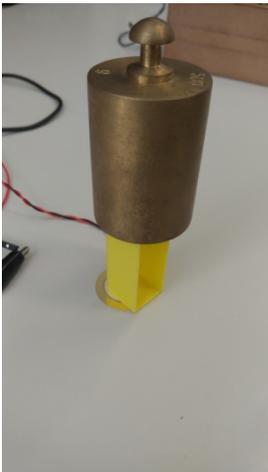


Fig.4.5 Pesa en un apoyo sobre el piezoeléctrico de diafragma.

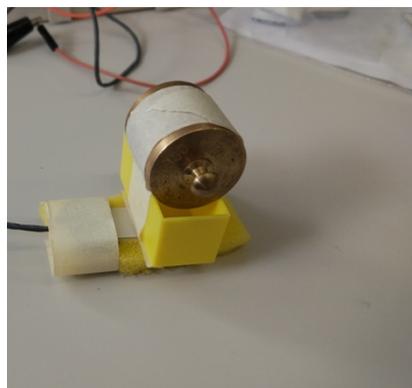


Fig.4.6 Pesa en piezofilm, debajo espuma y sobre apoyo.



Fig.4.7 Pesas en piezofilm, debajo espuma.

Se ha dejado la resistencia de realimentación del amplificador de carga fijada y se ha ido variando el peso aplicado utilizando las pesas de precisión (fig.4.3) y añadiendo condensadores de distinta capacidad con el fin de observar los cambios producidos. En la figura 4.4 y 4.7 se ve como se ve la espuma utilizada para intentar lograr una deformación controlada. En la figura 4.5 se puede observar que para ejercer la fuerza en el sensor se ha colocado un trozo de plástico que cubre el diafragma y lo presiona de forma homogénea, esto evita que el tamaño de la pesa afecte a la medición. En las figuras 4.4 y 4.7 para poner las pesas sobre el piezofilm se ha dejado abajo la misma pesa de 10 gramos para que en las diferentes mediciones el punto de aplicación de la fuerza tenga el mismo tamaño y las mediciones se realicen de la misma forma.

## 4.6 Cálculos teóricos

Para la elección de los valores de los componentes en el diseño del amplificador de carga se han realizado cálculos en base a las especificaciones deseadas.

### 4.6.1 Tensión de salida

La tensión a la salida sería

$$V_o = \frac{q_s}{C_1 + \frac{C + C_1}{Gd}}$$

Siendo  $Gd$  la ganancia del amplificador operacional para valores muy altos como en éste caso la ecuación, despreciando la capacidad del cable  $C$  y teniendo en cuenta la ganancia adicional que se ha añadido queda de la siguiente manera:

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \frac{q_s}{C_1}$$

### 4.6.2 Función de transferencia

La función de transferencia del amplificador de carga sería

$$\frac{V_o}{Q_s} = \frac{-1}{C_0} \frac{sR_f C_1}{1 + sR_f C_1} \left(\frac{R_f}{R_1}\right)$$

Esta sería válida para el resto de las frecuencias, aunque en este caso no se usará.

### 4.6.3 Ajuste de la sensibilidad

La sensibilidad será diferente en cada uno de los sensores, esto dependerá de la capacidad de generar carga de cada uno y del valor del condensador del amplificador de carga. Además, se le ha añadido una ganancia en el amplificador de 178,57.

Para el piezo film SDT-028K (1-1000288-0) :

Tiene 2,78 nF de capacidad interna y su parámetro  $d_{33}$ (deformación en dirección al grosor) es  $-33 \text{ pC}$  , para un condensador de realimentación de 100 nF sería

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \frac{q_s}{C_R} = \frac{-33 \frac{\text{pC}}{\text{N}}}{100 \text{ nF}} = -\frac{0,33 \text{ mV}}{\text{N}} \cdot 178,57 = \frac{58,92 \text{ mV}}{\text{N}}$$

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \frac{q_s}{C_R} = \frac{-33 \frac{\text{pC}}{\text{N}}}{220 \text{ nF}} = -0,15 \frac{\text{mV}}{\text{N}} \cdot 178,57 = \frac{26,78 \text{ mV}}{\text{N}}$$

En el caso del piezoeléctrico cerámico de diafragma el fabricante no facilita cuanta carga puede generar en su parámetro  $d_{33}$  pero se sabe que sensores similares tienen en torno 150 pC y 250 pC , suponiendo el caso de 250 pC

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \frac{q_s}{C_R} = \frac{-250 \frac{pC}{N}}{47 nF} \cdot 178,57 = 5,32 \frac{mV}{N} \cdot 178,57 = 950 \frac{mV}{N}$$

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \frac{q_s}{C_R} = \frac{-250 \frac{pC}{N}}{100 nF} \cdot 178,57 = 2,5 \frac{mV}{N} \cdot 178,57 = 446,43 \frac{mV}{N}$$

$$V_o = \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \frac{q_s}{C_R} = \frac{-250 \frac{pC}{N}}{220 nF} \cdot 178,57 = 1,136 \frac{mV}{N} \cdot 178,57 = 202,85 \frac{mV}{N}$$

#### 4.6.4 Limitación del ancho de banda

Se pretende conseguir un amplificador de carga que actúe cercano a una medida cuasi-estática, se ha fijado un rango de frecuencias en las que vamos a trabajar, como el propio sensor equivale a un condensador si se añade una resistencia entre el sensor y la entrada del amplificador formará un filtro paso bajo, además del filtro paso bajo que el amplificador de carga contiene. Así que se aprovechará lo que equivale a 2 filtros paso bajo seguidos.

En el primer paso bajo obtenido por el piezoeléctrico y la resistencia se fijará para una frecuencia de corte 10 Hz. Como se sabe la capacidad equivalente del sensor y la resistencia se obtiene:

Para el sensor piezo film:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi C_s F_{c_{PB}}} = \frac{1}{2\pi \cdot 2,78 nF \cdot 10^{-9} \cdot 10 Hz} = 5724998 = 5,8 M\Omega$$

Por tanto, se elegirá una resistencia de valor normalizado de 5,6 MΩ.

Para el sensor piezoeléctrico de diafragma, será algo diferente ya que tiene distinta capacidad equivalente, en este caso de 10 nF, entonces si se deja la misma resistencia que con el otro sensor se obtendría una frecuencia de

$$F_{c_{PB}} = \frac{1}{2\pi C_s R_0} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 nF \cdot 10^{-9} \cdot 5,6 M\Omega} = 2,84 Hz$$

Como es una frecuencia un poco mayor que la frecuencia de corte del siguiente filtro paso bajo se dejará la resistencia  $R_0$  fija ya que podría servir.

Ahora se vuelve filtrar y se desea ahora fijar una frecuencia de 0,5 Hz o menor ya que se quieren hacer medidas lo más estáticas posibles, como el propio amplificador de carga forma un filtro paso bajo se calcula cual sería el condensador de menos capacidad que teniendo la resistencia fijada a 1 GΩ pueda proporcionar un corte a 0,5 Hz o menor.

$$C_R = \frac{1}{2\pi R_R F C_{PB}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^9 \cdot 0,5} = 3,183010^{-10} pF = 318,3 pF$$

Por tanto 318,3 pF es el condensador que como mínimo habrá que poner para trabajar en la frecuencia deseada, también es el que proporcionará más sensibilidad. Todo condensador de mayor capacidad que se ponga en la realimentación hará que la frecuencia de corte del filtro paso bajo sea más baja por tanto serviría.

#### 4.6.5 Constante de tiempo

Se desea una constante de tiempo lo más grande posible para poder medir lo más cercano a una medida cuasi-estática, se tiene fijada la R a 1 GΩ y como  $\tau = R \cdot C$  se buscará un condensador que esté en el rango de frecuencia deseada, que proporcione una sensibilidad adecuada y que sea de capacidad suficiente para obtener una constante de tiempo elevada. Se usarán condensadores cerámicos de 47 nF, 100 nF y 220 nF con los cuales se intentará variar la sensibilidad y la constante de tiempo.

Para de 47 nF  $\rightarrow \tau = 47$

Para de 100 nF  $\rightarrow \tau = 100$

Para de 220 nF  $\rightarrow \tau = 220$

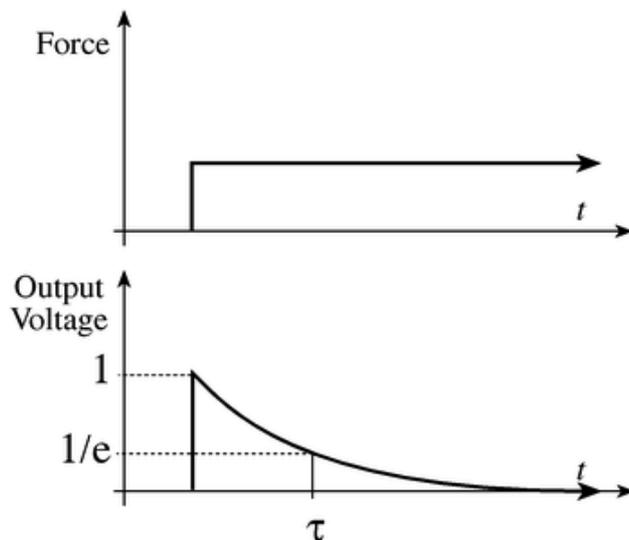


Fig. 4.8 Arriba, gráfica que representa la fuerza aplicada a la entrada en función del tiempo. Abajo, Gráfica que representa la señal en la salida en función del tiempo esperada. Extraídas de [www.soundlab.cs.princeton.edu](http://www.soundlab.cs.princeton.edu).

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1 Mediciones con el sensor piezofilm

#### 5.1.1 Con un condensador de realimentación de 100 nF y $\tau = 100$

Aplicando 100 gramos:

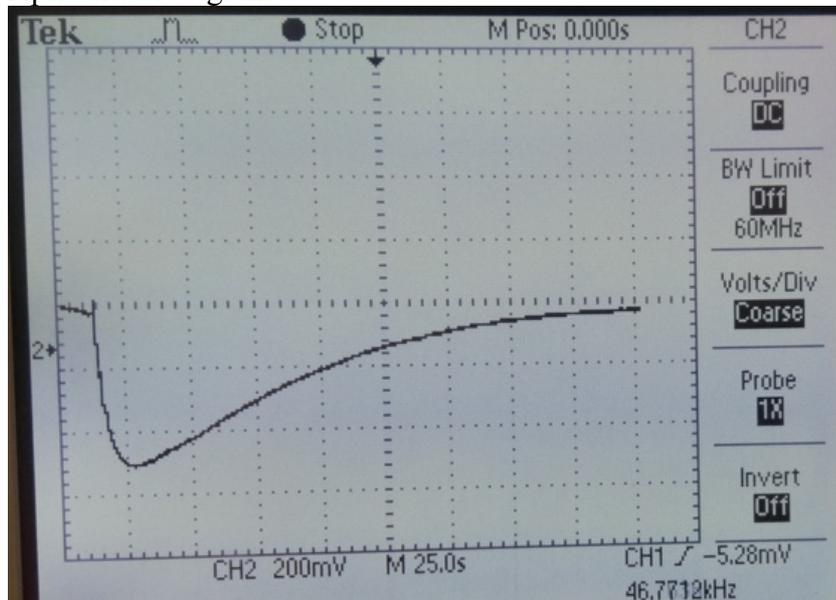


Fig. 5.1 Señal de salida del sensor piezofilm con 100 gramos, condensador de realimentación de 100nF y  $\tau = 100$

Aplicando 50 gramos:

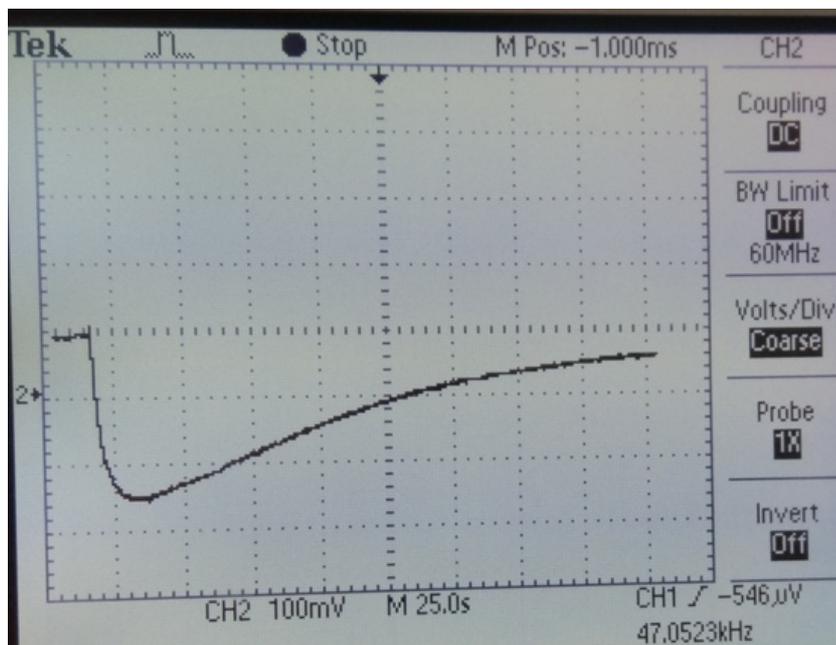


Fig. 5.2 Señal de salida del sensor piezofilm con 50 gramos, condensador de realimentación de 100nF y  $\tau = 100$

Aplicando 20 gramos

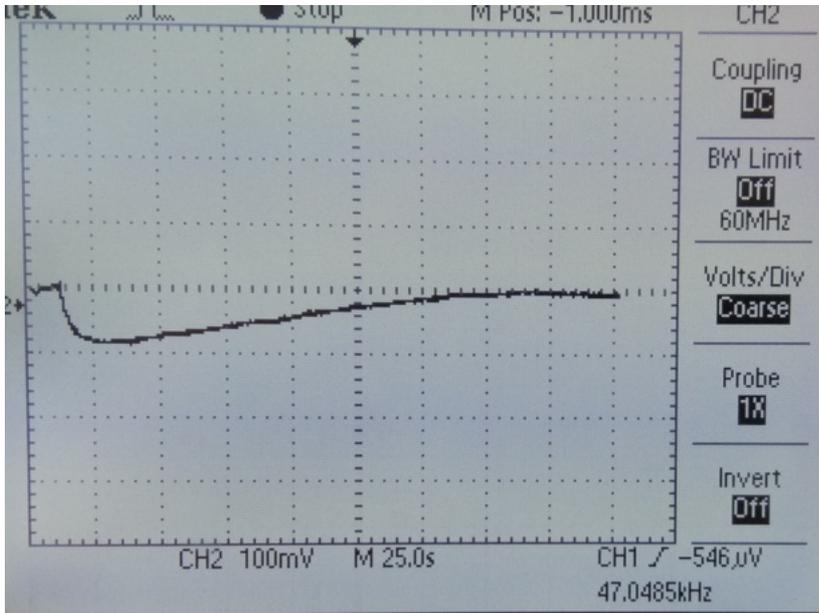


Fig. 5.3 Señal de salida del sensor piezofilm con 20 gramos, condensador de realimentación de 100nF y  $\tau = 100$

Como se puede observar la salida es negativa, lo cual no pasa nada simplemente indica que el piezo film se ha deformado en sentido contrario pero el valor absoluto es la misma. Por otra parte también es destacable que la carga del condensador tarda varios segundos y no se crea la forma característica de subida casi instantánea y descarga, pero esto se ha debido a que el método con el que se puso la pesa en el piezofilm era poco adecuado, se hizo como se indica en la figura 4.6, en posteriores medidas esto se corrigió y se hizo como en la figura 4.7 usando la superficie de la pesa menor, se ha dejado así con el fin de observar las complicaciones que surgen a la hora de aplicar fuerzas en el piezofilm.

### 5.1.1.1 Voltaje en $\tau$

La constante de tiempo es de 100 segundos, en ese tiempo desde el valor del voltaje máximo alcanzado se ha obtenido:

Tabla 3 Tensión de salida en  $t=\tau$  del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

Masa	Voltaje medido en $\tau$ 37% del valor máximo (mV)	Voltaje teórico en $\tau$ 37% del valor máximo (mV)
100 gramos	150	187
50 gramos	95	92,5
20 gramos	30	31,45

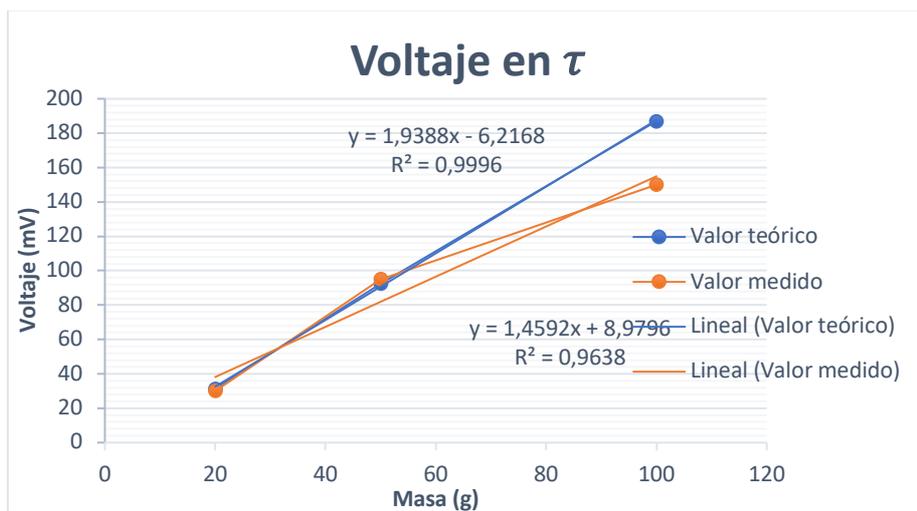


Fig. 5.4 Tensión de salida en  $t = \tau$  respecto a la masa del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

Respecto a la sensibilidad se ve que se existe una proporcionalidad, y que posee una linealidad casi consistente en 1.

### 5.1.1.2 Voltaje de salida

Midiendo en el punto donde alcanza el valor máximo se obtiene:

Tabla 4 Tensión máxima de salida del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

Masa (gramos)	Voltaje de salida aprox. (mV)
100	500
50	250
20	90

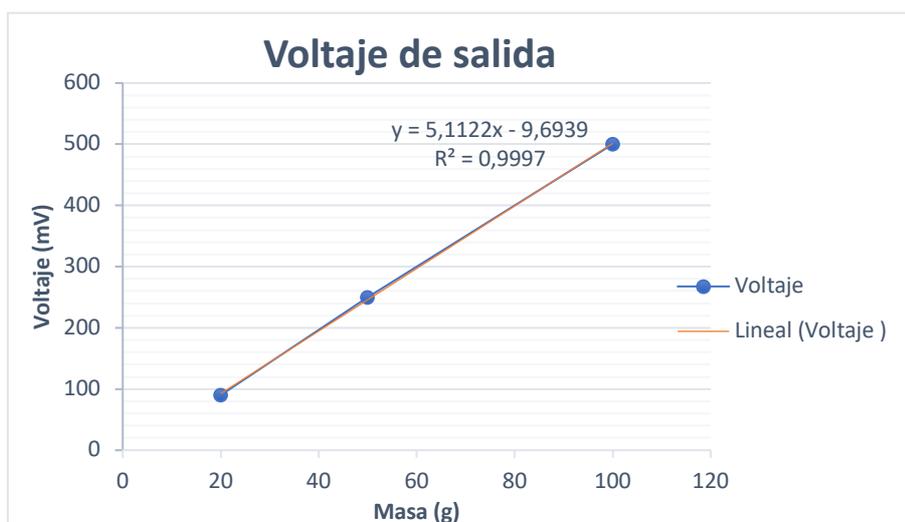


Fig. 5.5 Tensión máxima de salida respecto a la masa del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

En el voltaje de salida se aprecia una gran linealidad respecto a la masa aplicada.

### 5.1.2 Con un condensador de realimentación de 220 nF y $\tau = 220$

Esta vez se ha realizado mejor el proceso de aplicación de la fuerza como en la figura --- y se han obtenido los siguientes resultados:

Aplicando 10 gramos

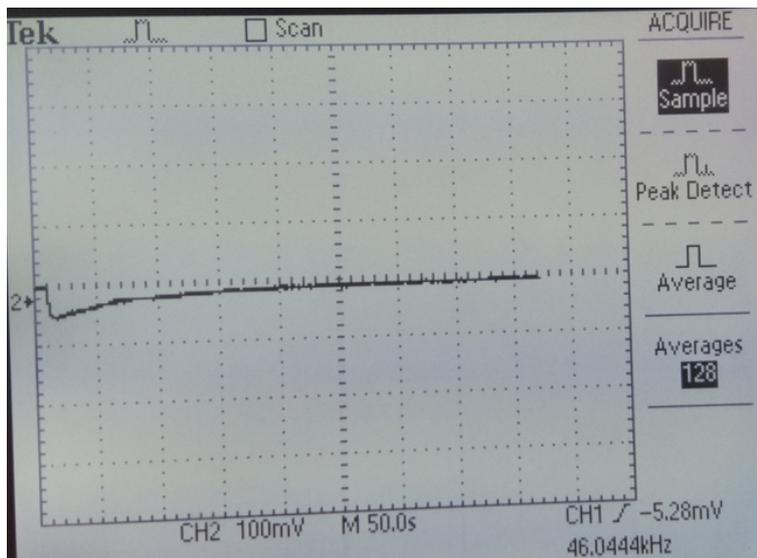


Fig. 5.6 Señal de salida del sensor piezofilm con 10 gramos, condensador de realimentación de 220nF y  $\tau = 220$

Aplicando 30 gramos

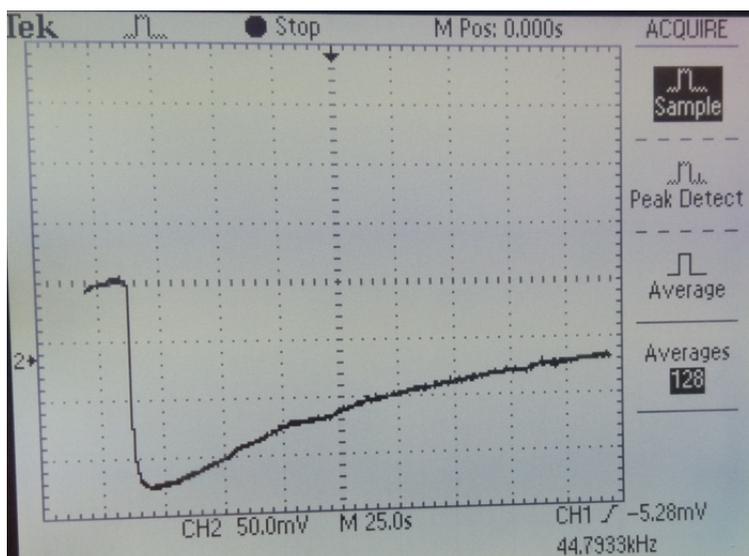


Fig. 5.7 Señal de salida del sensor piezofilm con 30 gramos, condensador de realimentación de 220nF y  $\tau = 220$

Aplicando 60 gramos

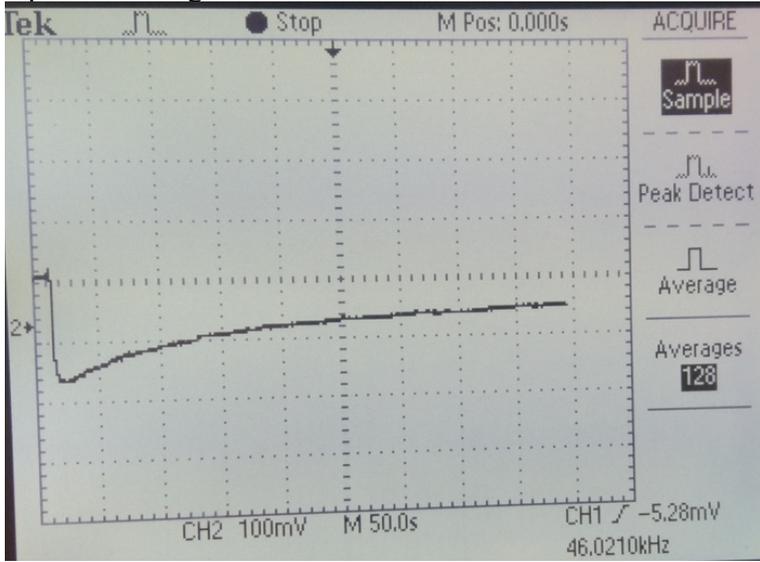


Fig. 5.8 Señal de salida del sensor piezofilm con 10 gramos, condensador de realimentación de 220nF y  $\tau = 220$

Se puede observar que en estas medidas la gráfica de carga y descarga sale con una forma más acorde a la deseada y no como en la anterior medida.

5.1.2.1 Voltaje de salida

En el voltaje máximo en la salida se obtiene

Tabla 5 Tensión máxima de salida del sensor piezofilm con 10, 30 y 60 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau = 220$

Masa (gramos)	Voltaje de salida aprox. (mV)
10	50
30	180
60	180

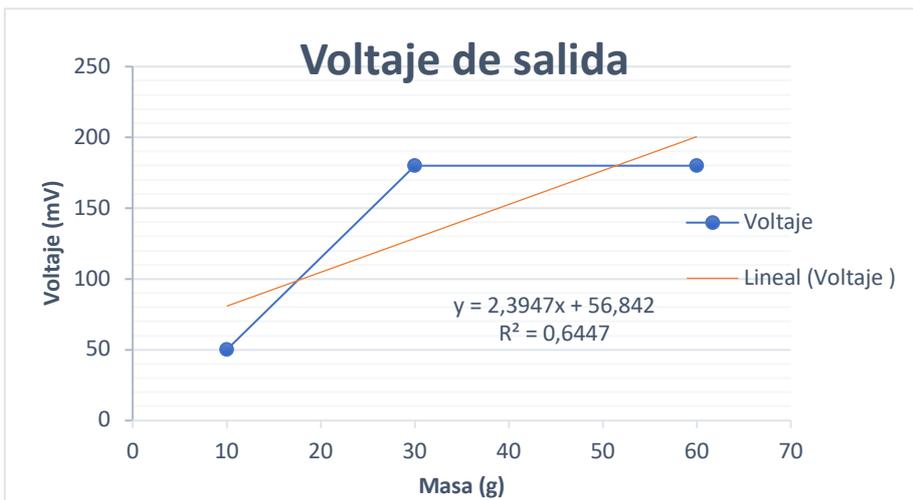


Fig. 5.9 Tensión máxima de salida respecto a la masa del sensor piezofilm con 10, 30 y 60 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau = 220$

En la gráfica se puede ver que falta linealidad en los datos, además es como si saturase el voltaje en 180 mV.

### 5.1.2.2 Voltaje en $\tau$

Analizando el valor del voltaje en  $\tau$  se obtiene:

Tabla 6 Tensión de salida en  $t=\tau$  del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau=220$

Masa (gramos)	Voltaje aprox. medido en $\tau$ 37% del valor máximo (mV)	Voltaje teórico en $\tau$ 37% del valor máximo (mV)
10	10	18,5
30	80	66,6
60	80	66,6

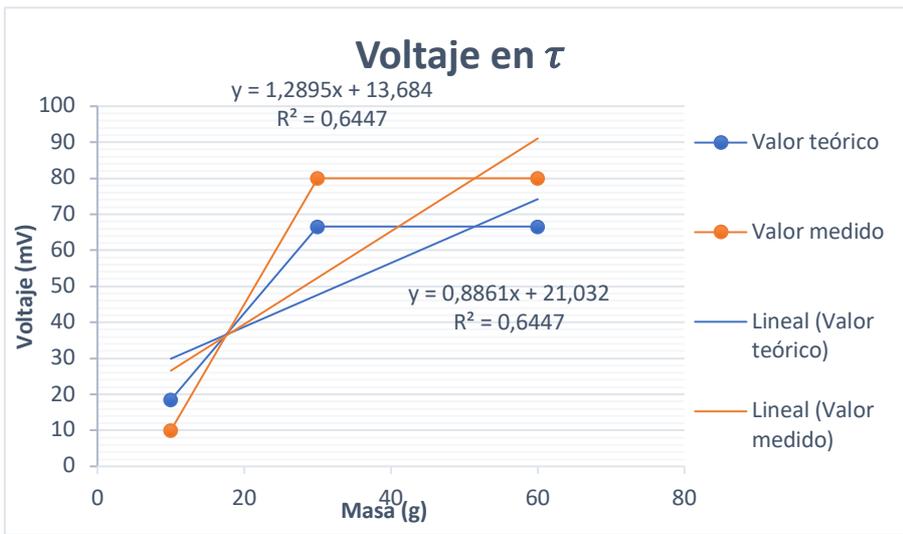


Fig. 5.10 Tensión de salida en  $t= \tau$  respecto a la masa del sensor piezofilm con 20, 50 y 100 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau=220$

Respecto al voltaje en  $\tau$  se obtiene para 30 y 60 gramos resultados casi iguales. Parece que es como si el voltaje de salida del amplificador de carga saturase, por tanto, se puede decir que para masas mayores a 30 gramos aprox. no sería válido.

### 5.1.3 Comportamiento cuando se ejerce y se deja de ejercer la fuerza

Se ha probado qué pasaría si se dejase de aplicar la fuerza y luego se volviese a ejercer. El resultado ha sido que cuando se vuelve a aplicar la fuerza no recupera el valor de la primera vez. La carga del sensor no se llega a descargar inmediatamente, y cuando se vuelve a aplicar la fuerza éste se vuelve a cargar y llega como máximo a un valor anterior pero nunca al inicial siendo el voltaje de salida en cada repetición cada vez menos.

Con 60 gramos y un condensador de realimentación de 200 nF se obtiene lo siguiente:

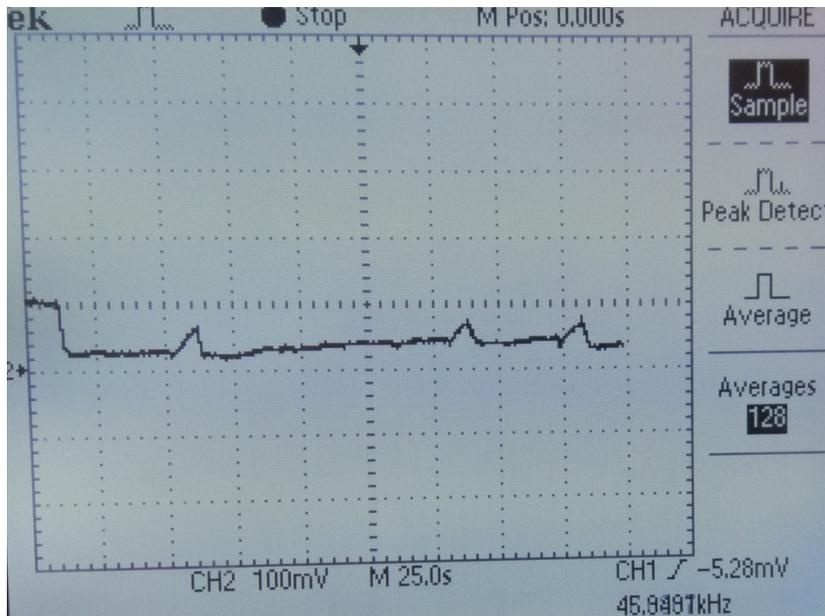


Fig. 5.11 Señal de salida cuando se ejerce y se deja de ejercer una fuerza, con 60 gramos y 200 nF.

#### 5.1.4 Valoración de los resultados del piezofilm

Según los resultados obtenidos para el piezofilm se puede decir que para constante de tiempo de 100 funciona de una manera aceptable para pesos hasta 100 gramos. Para una constante de tiempo de 220 los valores ya no son lo suficientemente lineales a partir de una masa de unos 30 gramos. Según la información técnica esto es razonable ya que las aplicaciones principales son para vibraciones, para usarlo como voladizo, impactos, pulsos dinámicos, etc. y no para fuerzas próximas a ser estáticas. Se puede concluir que aplicar una fuerza de una forma homogénea en un sensor que se dobla con facilidad complica el proceso y el propio sistema de medición añade errores, a pesar de ello en ciertas condiciones se han podido obtener resultados con algunas características a las que tiene sensor piezoeléctrico para medir fuerzas cercanas a ser cuasi-estáticas. Además, en palabras de Gustav Gaustchi (2002), los sensores para medir fuerzas cuasi-estáticas en general deben ser de materiales piezoeléctricos rígidos como por ejemplo bloques de cuarzo o cerámicos, esto también confirma por qué los resultados del piezofilm no han resultado ser lo suficientemente satisfactorios.

## 5.2 Mediciones con el sensor de diafragma

### 5.2.1 Con un condensador de realimentación de 47 nF y $\tau = 47$

Aplicando 20 gramos

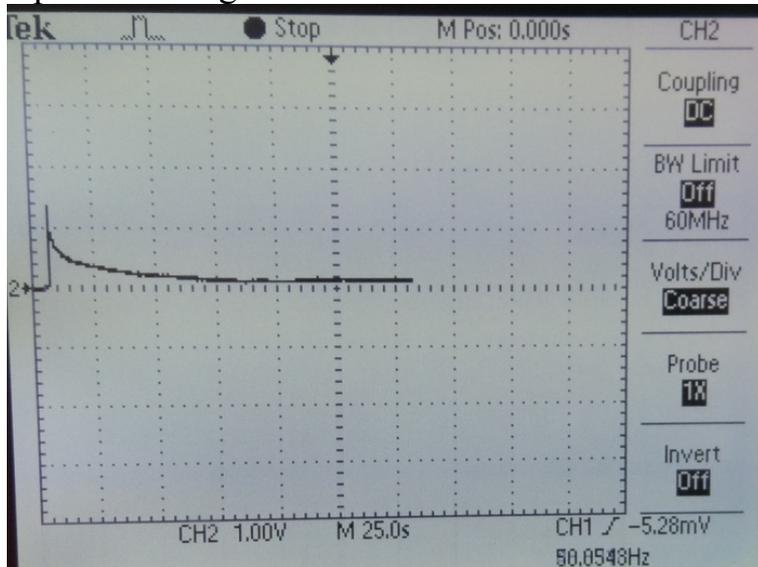


Fig. 5.12 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau = 47$

Aplicando 100 gramos

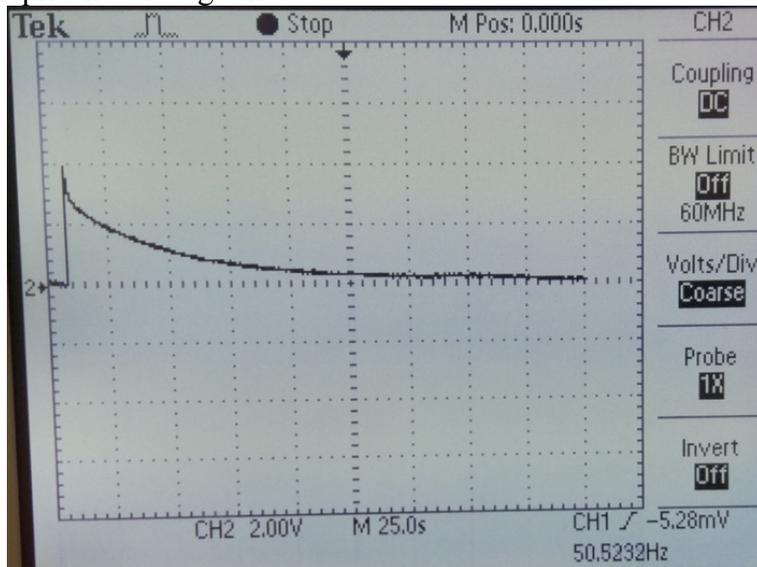


Fig. 5.13 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 100 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau = 47$

## Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza

Aplicando 200 gramos

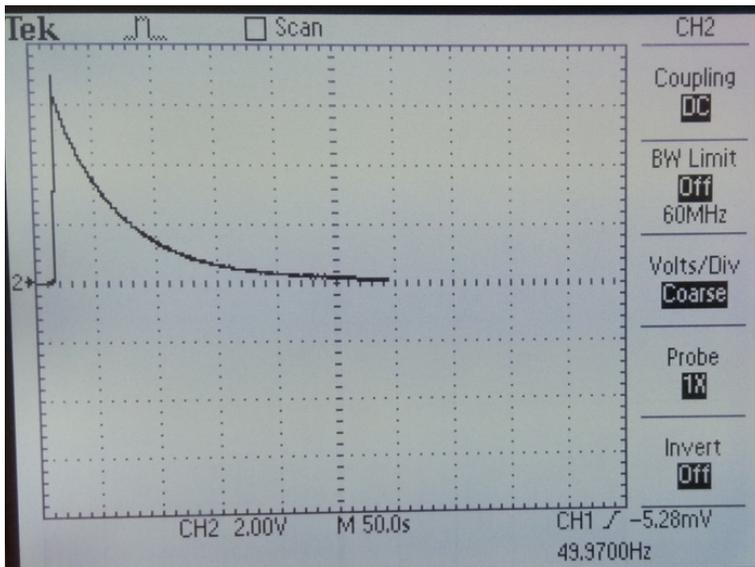


Fig. 5.14 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 200 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau=47$

Aplicando 500 gramos

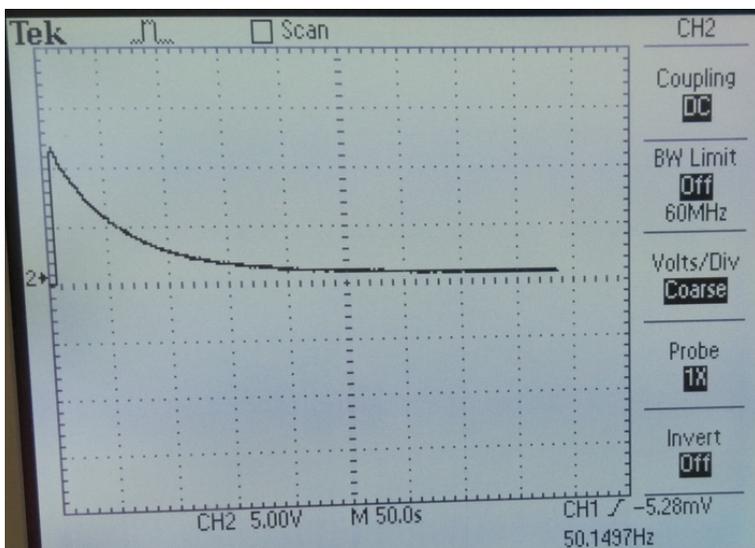


Fig. 5.15 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau=47$

### 5.2.1.1 Voltaje máximo a la salida

Los voltajes a la salida han sido:

Tabla 7 Tensión máxima de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau = 47$

Masa (gramos)	Voltaje de salida aprox. (V)
20	0,9
100	3,6
200	6,4
500	11,75

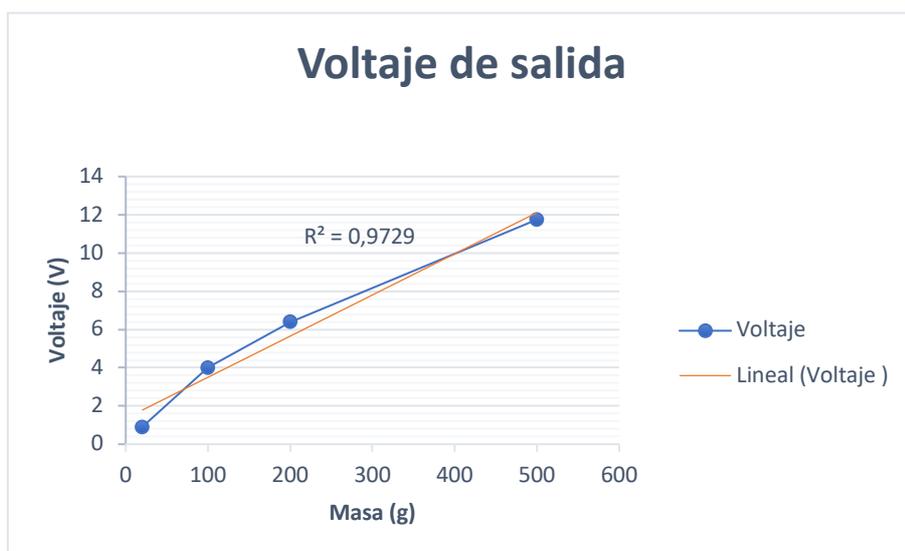


Fig. 5.16 Tensión máxima de salida respecto la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau = 47$

Se pueden apreciar resultados bastante lineales, la correlación es casi de 1.

Se ha podido ver un fenómeno en las mediciones, se produce como un pico en el máximo valor de voltaje que casi instantáneamente vuelve a bajar, este pico se ha despreciado y se ha tenido en cuenta el valor justo antes de cuando se produce. Este pico puede ser debido a que hay un pico de tensión al aplicar la pesa sobre el diafragma del sensor, lo cual tiene sentido porque la pesa al ser depositada de cierta manera “cae” aunque se haga cuidadosamente.

### 5.2.1.2 Voltaje en $\tau$

Analizando el valor del voltaje en  $\tau$  se obtiene:

Tabla 8 Tensión de salida en  $t = \tau$  del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100, 200 y 500 gramos, condensador de realimentación 47 nF y  $\tau = 47$

Masa (gramos)	Voltaje aprox. medido en $\tau$ 37% del valor máximo (V)	Voltaje teórico en $\tau$ 37% del valor máximo (V)
20	0,25	0,33
100	1,25	1,48
200	2,4	2,37
500	4,5	4,35

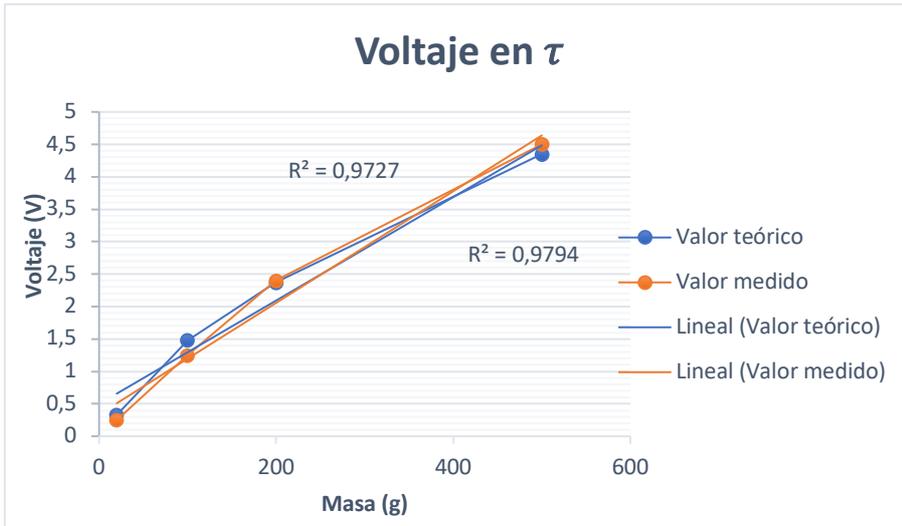


Fig. 5.17 Tensión de salida en  $t = \tau$  respecto a la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100, 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 47 nF y  $\tau = 47$

El valor del voltaje en  $\tau$  también resulta ser muy lineal, por tanto, se puede decir que los resultados obtenidos han sido satisfactorios y en relación con lo esperado.

### 5.2.2 Con un condensador de realimentación de 220 nF y $\tau = 220$

Aplicando 200 gramos

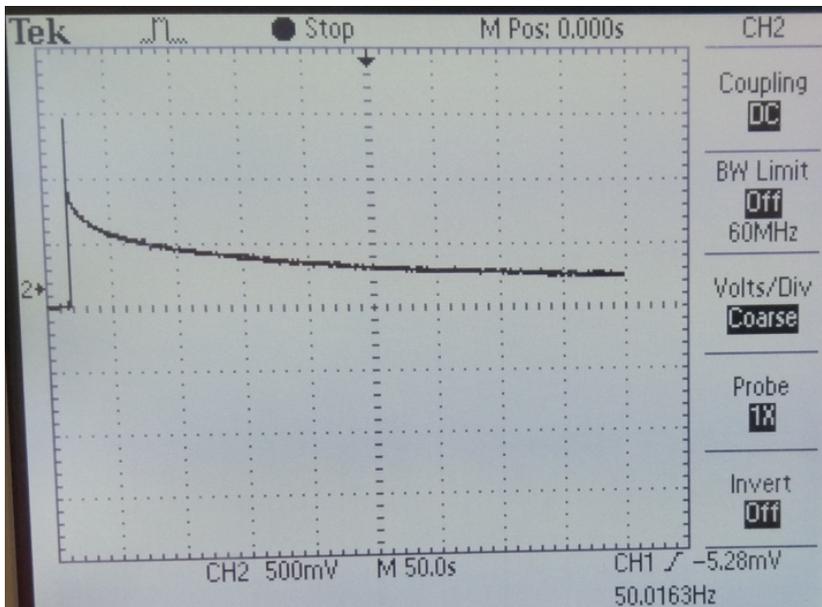


Fig. 5.18 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 200 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau = 220$

Aplicando 500 gramos

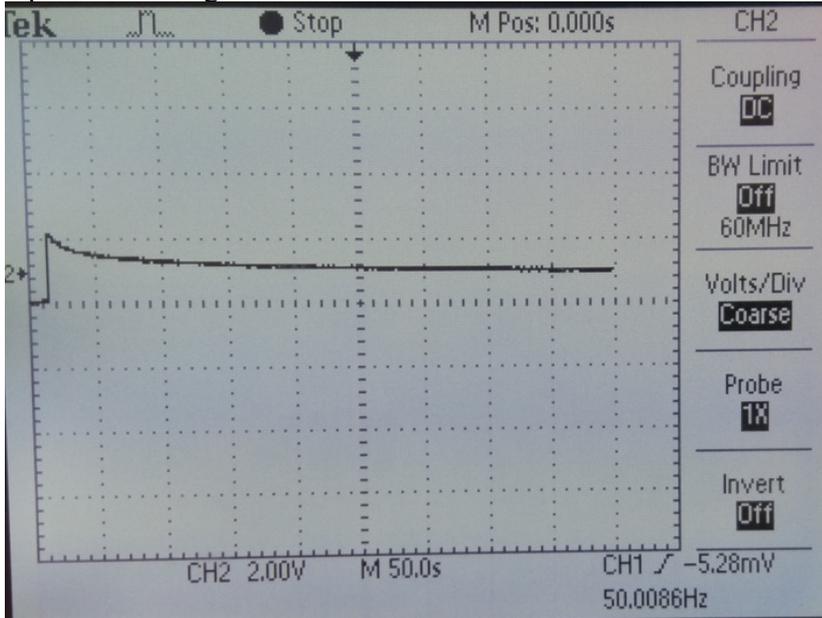


Fig. 5.19 Señal de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 500 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau=220$

### 5.2.2.1 Voltaje máximo a la salida

Los voltajes a la salida han sido:

Tabla 9 Tensión máxima de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau=220$

Masa (gramos)	Voltaje de salida aprox. (V)
20	0,1
200	0,9
500	2,2

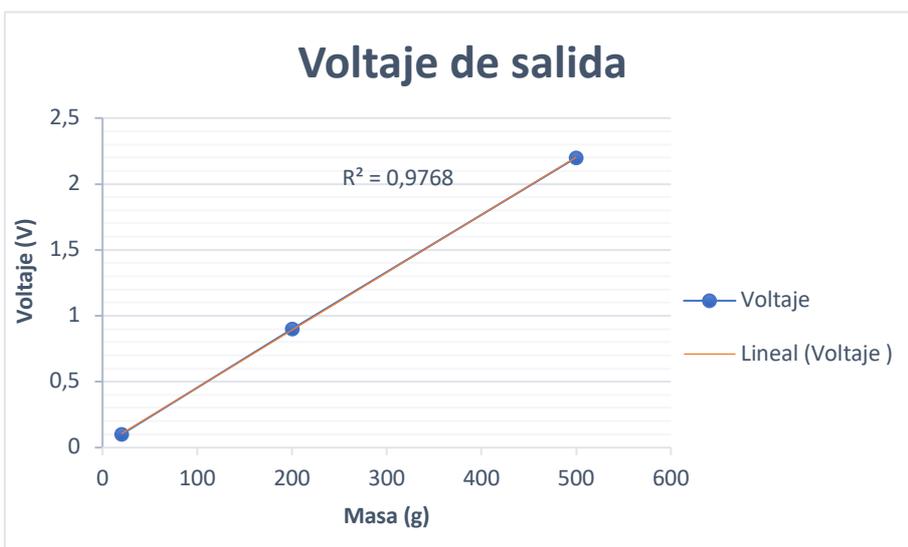


Fig. 5.20 Tensión máxima de salida respecto la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 y 500 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau=220$

Para la constante de tiempo 220 también se han obtenido unos voltajes a la salida muy lineales.

### 5.2.2.2 Voltaje en $\tau$

Analizando el valor del voltaje en  $\tau$  se obtiene

Masa (gramos)	Voltaje aprox. medido en $\tau$ 37% del valor máximo (V)	Voltaje teórico en $\tau$ 37% del valor máximo (V)
20	0,25	0,037
100	0,35	0,33
200	2,4	0,81

Tabla 10 Tensión de salida en  $t=\tau$  del sensor piezoeléctrico de diafragma con 20, 100 y 200 gramos, condensador de realimentación 220 nF y  $\tau=220$

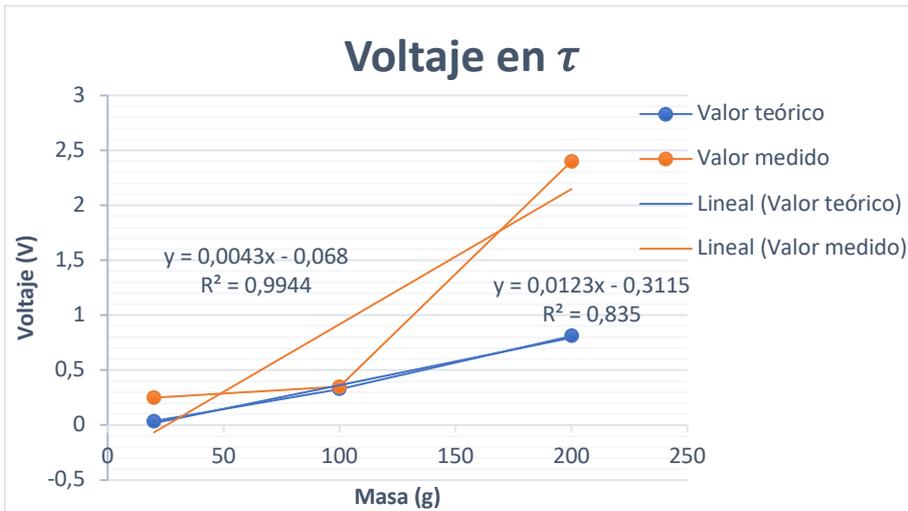


Fig. 5.21 Tensión de salida en  $t = \tau$  respecto a la masa del sensor piezoeléctrico con 20, 100 y 200 gramos, condensador de realimentación de 220 nF y  $\tau=220$

También se cumple una linealidad muy próxima a 1 para el voltaje en  $\tau$ , por tanto se podría considerar que ha habido éxito en las mediciones.

### 5.2.3 Algunas medidas dinámicas

Aunque no es el objetivo principal del trabajo, se han realizado algunas pruebas dinámicas con el fin de observar el funcionamiento del piezoeléctrico en este modo. Para ello se aplicó distintas masas en una misma medición del osciloscopio.

Con un condensador en la realimentación de 100 nF y aplicando 50, 100, 200 y 500 gramos, por ese

orden

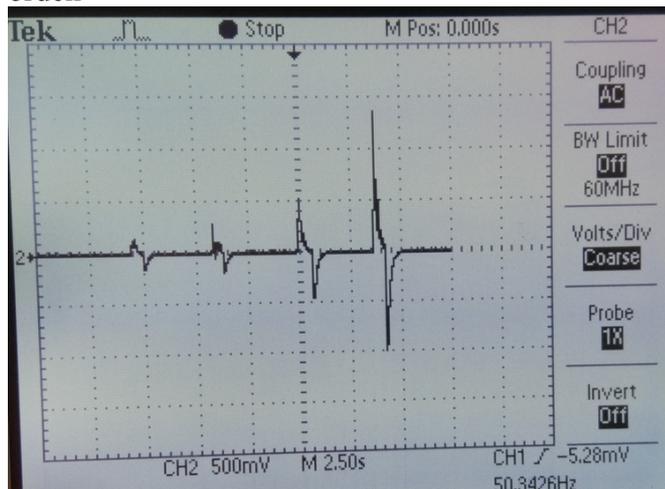


Fig. 5.22 Salida con mediciones dinámicas de 50, 100, 200 y 500 gramos respectivamente de izquierda a derecha, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

Se pueden ver en cada medida un pico positivo y uno negativo, esto sucede porque cuando se deposita la pesa el diafragma se comprime en un sentido y cuando se retira se expande en el otro.

### Voltaje máximo a la salida

Masa (gramos)	Voltaje obtenido aprox. (mV)
20	130
50	300
100	520
500	1400

Tabla 11 Tensión máxima de salida del sensor piezoeléctrico de diafragma con mediciones dinámicas de 50, 100, 200 y 500 gramos respectivamente de izquierda a derecha, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

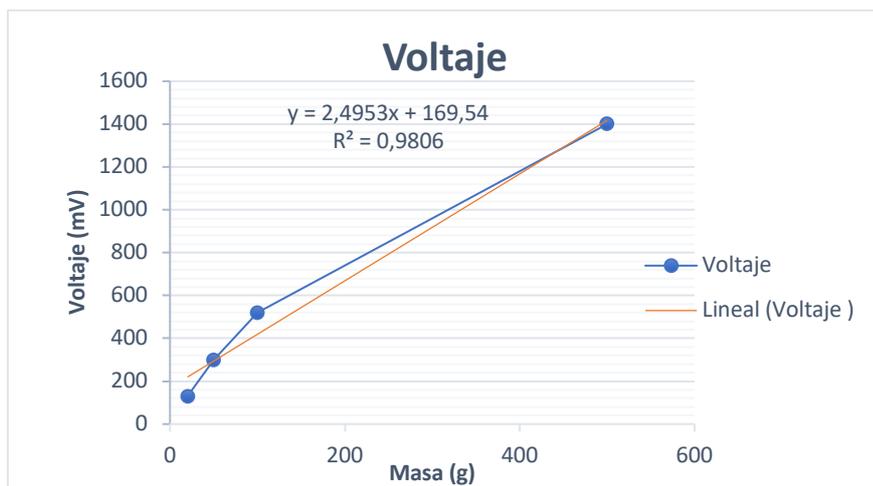


Fig. 5.23 Tensión máxima de salida respecto a la masa del sensor piezoeléctrico de diafragma con mediciones dinámicas de 50, 100, 200 y 500 gramos respectivamente de izquierda a derecha, condensador de realimentación de 100 nF y  $\tau = 100$

Con estos resultados se puede decir que con cargas dinámicas también existe una linealidad *aceptable respecto a la masa aplicada*.

### 5.2.4 Comportamiento cuando se ejerce y se deja de ejercer la fuerza

Se ha probado qué pasaría si se ejerciese y se dejara de ejercer fuerza, con 500 gramos y un condensador de 200 nF se obtiene:

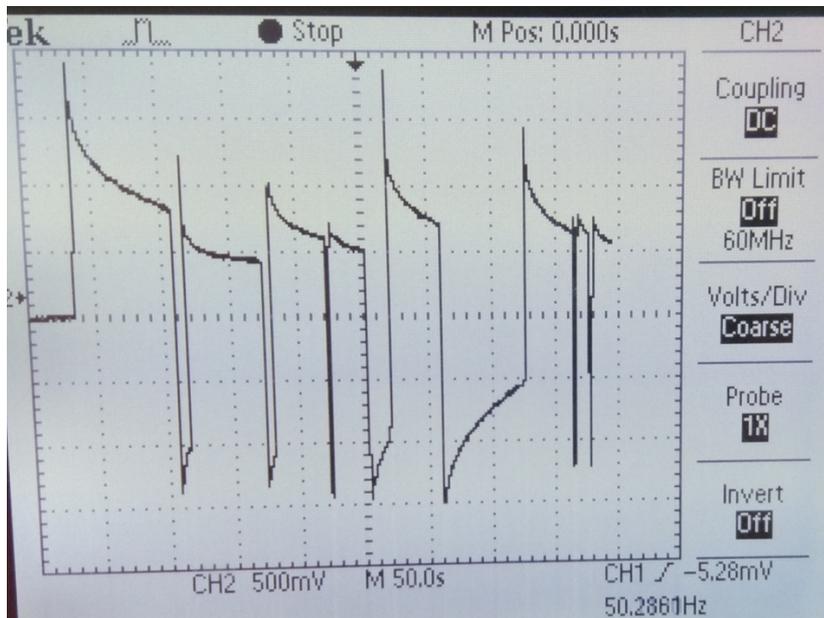


Fig. 5.24 Señal de salida cuando se aplica una fuerza y se deja de ejercerla

El resultado es que cuando se deja de ejercer la fuerza el voltaje de salida cae de inmediato y cuando se vuelve a ejercer en principio no recupera los valores que debería seguir. Repitiendo esto numerosas veces también se ve que el valor del voltaje inicial no lo vuelve a recuperar en las sucesivas repeticiones y hay que esperar un tiempo suficiente hasta que se realice la descarga completa para que vuelva a poder conseguir un voltaje como el de la primera medida. Se cree que la descarga tan inmediata se debe al efecto del diafragma, que al volver a su posición de reposo ayuda a que se cargue en el otro sentido.

### 5.3 El fenómeno de offset a la salida

En todas las medidas realizadas con los sensores ha aparecido un voltaje de offset no deseado el cual se ha tenido que corregir de una forma “manual” con la referencia del eje horizontal del osciloscopio. Según la teoría, este offset puede ser debido a los voltajes de offset de entrada del amplificador, además al haberse amplificado la señal de salida con una ganancia de aproximadamente 180 está también puede haberse amplificado. También puede ser debido a posibles interferencias en el sensor ya que estos son muy sensibles a estas.

Se ha observado que puede oscilar entre los valores de 10 mV y hasta unos 100 mV. Aunque una vez ajustada la referencia del osciloscopio se ha mantenido en el nuevo cero de referencia de una manera bastante estable.

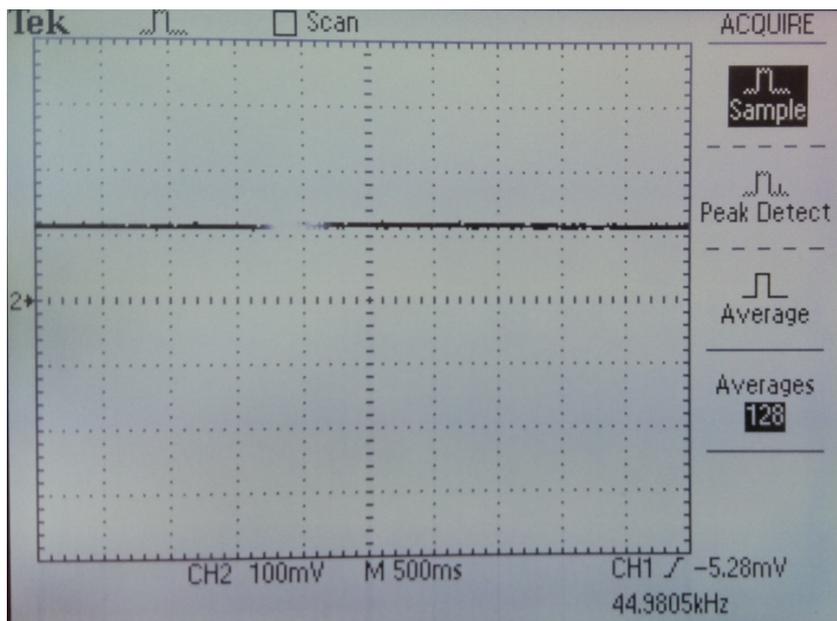


Fig. 5.25 Señal de offset en la salida, probablemente debido al voltaje de offset amplificado.

## 6. BREVE EJEMPLO DE APLICACIÓN INDUSTRIAL

### 6.1 Introducción y objetivo

Como ya se mencionó en la introducción de este trabajo, en la industria hay sensores piezoeléctricos industriales para la medición de fuerzas cuasi-estáticas. Existen empresas de reconocido prestigio como Kistler®, PCB® Piezotronics o American Piezo® las cuales llevan muchos años diseñando sistemas capaces de obtener resultados muy buenos. Como ya se comentó en el capítulo 3 hay gran variedad de opciones adaptadas a cada una de las situaciones. A modo de ejemplo se va a explicar brevemente y sin realizar presupuesto, como podría ser una aplicación industrial para la medición de fuerzas cuasi-estáticas de gran magnitud. Los principales componentes del sistema podrían ser:

### 6.2 Sensor

Se elige el 9091 B de Kistler®, se trata de un sensor cuyas características que se considerarán principales son: mide una componente, válido para fuerzas de entre 0 y 1200 kN, puede trabajar a temperaturas de entre -40 y 120 grados centígrados, 15.4 centímetros de diámetro y sensibilidad de -2,2 pC/N.

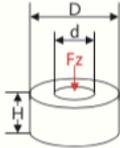
Technical Data	Type	9091B		
				
	<b>Unit SI</b>	<b>Unit EN</b>	<b>SI</b>	<b>EN</b>
Measuring range	$F_z^{1)}$ kN	k lb	0 ... 1200	0 ... 269
Calibrated measuring ranges	$F_z$ kN	k lb	0 ... 1200	0 ... 269
	$F_z$ kN	k lb	0 ... 96 <sup>2)</sup>	0 ... 21.5 <sup>2)</sup>
Sensitivity	$F_z^{1)}$ pC/N	pC/lb	≈ -2.2	≈ -9.7
Dimensions	D mm	in	154	6.03
	d mm	in	72	2.84
	H mm	in	28	1.10
Rigidity	$c_{A,z}$ kN/μm	lb/μin	≈ 65	≈ 371
Weight	g	oz	2180	76.9
Operating temperature range <sup>3)</sup>	°C	°F	-40 ... 120	-40 ... 248
Connector	KIAG 10-32 neg.			
Deg. of protection to IEC/EN 60529				
screwed with cable (e.g. 1631C...)	IP65	•		
welded with cable (e.g. 1983AD...)	IP68	•		

Fig. 6.1 Características del sensor 9091B de Kistler®

### 6.3 Cable del sensor

Para el cable del sensor se empleará el recomendado para el sensor elegido, se trata de un cable marca Kistler® con conexiones modelo KIAG 10-32 este cable apantallado tiene distintos modelos en función del material de recubrimiento, longitud, tipo de conector en los extremos, etc. En concreto se elegirá el modelo 1967 A, este consta de alto aislamiento PFA, recubierto de cable trenzado de acero inoxidable, con aislamiento a tierra, temperatura de funcionamiento de entre -55 y 200 grados centígrados, con una protección IEC/EN 60529 en ambos conectores grado IP65 y en este caso se elige una longitud de 2 metros (puede ser de entre 0,5 y 3 metros).

Sensor Family	Cable				Length (standard) [m, ft] <sup>2)</sup>
	Technical Data	Type	Connector		
			Left	Right	
933A... 93x3A...		1967A...	KIAG 10-32 pos. int.	KIAG 10-32 pos. int.	0.5 / 1 / 2 / 3 1.6 / 3.3 / 6.6 / 9.8

Length (custom) [m, ft] <sup>2)</sup>		Cable sheathing material	Operating temperature range [°C, °F]		Cable can be welded to sensor		Degree of protection to IEC/EN 60529		Comments
min.	max.		min.	max.	Yes	No	Left	Right	
0.1	10	PFA with stainless steel braiding, ground-isolated	-55	200	•		IP65	IP65	
0.3	33		-67	392			-> screwed connection		

Fig. 6.2 Características técnicas del cable de Kistler® modelo 1967A que conecta el sensor con el amplificador de carga.

### 6.4 Amplificador de carga

Para amplificar la carga de la señal se empleará un amplificador de carga industrial, en este caso se usará el 5015 A de Kistler®, versátil porque tiene constantes de tiempo corta, media y larga, de las cuales la larga es la que interesaría ya que se quieren medir fuerzas cuasi-estáticas. Además, entre sus características se pueden destacar:

- Trabaja en un rango de frecuencias de 0 a 200.000 Hz y de carga de entrada de 0 a 2.200.000 pC. -
- Tiene una temperatura de funcionamiento de entre 0 y 50 grados y consta de una protección grado IP 40.
- Tiene una salida modelo RS-232C

## Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza

Technical Data		Type	5015 A...
			
Number of channels			1
Charge input	Measuring ranges	pC	• ±2 ... 2 200 000
	Frequency range (-3dB)	Hz	=0 ... 200 000
	Time constants		Short / Medium / Long
	Connector type		• • BNC neg. • Fischer 9-pole neg.
Piezotron® input (IEPE)	Sensor voltage supply	V	o 20
	Sensor current supply	mA	4
	Frequency range (-3dB)	Hz	=0 ... 200 000
	Time constants		Short / Medium / Long
	TEDS support		
	Connector type		BNC neg.
Analog output		V	• ±2 / ±2.5 / ±5 / ±10
	Output range Connector type		BNC neg.
Analog 6-Component Summing Processor	Output range	V	
	Connector type		
Operation	Display & rotary knob/membrane keys		•
	PC		
Interfaces	LabVIEW™ (Virtual Instrument Driver)		•
	RS-232C		•
	IEEE-488		o
	USB 2.0		
Ethernet			
Integrated data acquisition			
Housing/installation	Desktop unit		o
	19" rack-mounted unit		o
	Panel mount		
	Module for installation in CompactRIO™ chassis		
	Handheld unit		
Power supply	Mains power (115/230 VAC)		•
	DC power		
	Voltage range	VDC	
Operating temperature range		°C	0 ... 50
		°F	32 ... 122
Deg. of protection (IEC/EN 60529)			IP40
Outer dimensions	WxHxD	mm	105x142x253
		in	4.13x5.59x9.96

Fig. 6.3 Características técnicas del amplificador de carga 5015 A.

## 6.5 Adquisición de datos

A la salida del amplificador se necesitaría conectar una unidad de adquisición de datos por medio de un cable RS-232C. Como unidad de adquisición de datos se podría emplear por ejemplo el modelo 5697 A de Kistler® el cual tiene salida de USB para conectarlo a un ordenador. El software instalado en el ordenador podría ser LabVIEW® controlado con un instrumento virtual o bien el software específico Dynoware®.



Fig. 6.4 Unidad de adquisición de datos modelo 5697A de Kistler®.

## 6.6 Esquema del sistema completo

El esquema de la *fig. 6.5* representa gráficamente como sería el sistema de medida explicado en este capítulo.



Fig. 6.5 Sistema de medida completo.

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 7.1 Ventajas del sensor de diafragma respecto al piezofilm

Lo que se trataba de conseguir era demostrar lo válido que podían distintos sensores en la medición de fuerzas cuasi-estáticas, para ello se ha comparado entre dos sensores para distintos usos. Los resultados obtenidos en cada uno de ellos no han sido muy distantes a lo esperado. Lo que se esperaba que el piezofilm debido a sus características es que solo funcionase bien para fuerzas relativamente pequeñas y que además debido a su facilidad para doblarse fuese algo complicado medir fuerzas. En la práctica también ha sido así, se han obtenido saturaciones en la salida y ha sido relativamente difícil poder ejercer una fuerza de una manera homogénea sobre el sensor ya que es difícil que en cada medida se deforme de la misma manera. A pesar de esto para fuerzas pequeñas y DTC del amplificador de carga adecuadas se obtienen unas medidas bastante lineales. El autor Gustav Gautschi (2002) dijo que, en general, los materiales piezoeléctricos en bloques compactos solían funcionar mejor para medición de fuerzas que los menos consistentes y en este caso parece que se ha cumplido.

Por otra parte, los problemas que se han tenido con el piezofilm no se han tenido con el sensor de diafragma, aunque también está limitado con el peso, es capaz de medir fuerzas algo más grandes que el piezofilm. La linealidad en los resultados del de diafragma han sido más lineales y más estables. Por tanto, se puede afirmar que para realizar las medidas deseadas este ha sido bastante mejor.

### 7.2 Limitaciones en los materiales utilizados

Se han encontrado limitaciones en los materiales utilizados, ya que en comparación a los del uso industrial y profesional están muy por debajo en calidad y precisión. El principal problema ha sido económico ya que un sensor piezoeléctrico profesional puede costar cientos o miles de euros, al igual que los amplificadores de carga. A pesar de ello se ha podido realizar un experimento en el cual se ha podido observar la naturaleza del fenómeno piezoeléctrico de una forma interesante.

### 7.3 Posibles mejoras

Ciertos aspectos se podrían haber mejorado, pero por cuestiones técnicas o de tiempo no han sido posibles. Algunos aspectos son:

- El amplificador de carga: Se podría haber hecho en un circuito impreso, además los componentes de más calidad como resistencias de mayor valor y los amplificadores operacionales de más precisión solo están disponibles para la tecnología SMD, aunque son significativamente más caros que los utilizados. Por ejemplo como amplificador operacional se podría haber usado el LTC 6242 de Analog Devices® ya que ofrece unas características muy superiores al de uso común que se ha utilizado, para la resistencia se podría haber elegido una resistencia de  $25\text{ G}\Omega$  modelo HVC4020Z2508KET de Ohmite® esto incrementaría la DTC considerablemente y en teoría se obtendrían mejores mediciones cuasi-estáticas.

- Cables: Se podrían haber utilizado cables coaxiales/apantallado por ejemplo en la salida del sensor y en la salida del amplificador de carga, en la industria por ejemplo estos siempre tienen cables apantallados de una gran variedad. La instalación en el sensor era relativamente compleja para los

conocimientos técnicos/prácticos que se tienen y en la salida del amplificador de carga hubiera sido relativamente más fácil si se hubiese hecho sobre circuito impreso.

- También se podría modificar el circuito del amplificador de carga de modo que tuviese un selector de valores de condensadores y de resistencias, para poder ajustarlo a las necesidades requeridas, algo así como lo que tienen los de uso industrial.

### **7.4 Líneas futuras**

Este trabajo fin de grado está dentro de un proyecto más grande en el que se estudian soluciones para un robot, así que mejorando el sistema como se ha explicado en el apartado 7.3 se cree que se podrían hacer ensayos con mucha más precisión y quizás dar soluciones más interesantes al proyecto que lo engloba.

Utilizando soluciones industriales como la del capítulo 6 se podrían hacer experimentos con fuerzas grandes del orden de kN o con grandes amplificaciones de la señal. Además, con estas mejoras considerables se podrían diseñar experimentos enfocados a aplicaciones reales y con complejidad ya que los realizados en el estudio han sido básicos.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Gautschi, G., (2002), Piezoelectric Sensorics - Force Strain Pressure Acceleration and Acoustic Emission Sensors Materials and Amplifiers, Zurich, Suiza, Ed. Springer.
- [2] PCB Piezotronics ®, 2007, Sensor for Force, Load, Strain and Torque -Product Catalog, Estados Unidos.
- [3] Kistler®, 2015, Test and Measurement Force and Strain, Documento informativo, Suiza.
- [4] Measurement Specialities ®,1999, Piezo Film Sensors Technical manual, Estados Unidos.
- [5] [www.americanpiezo.com](http://www.americanpiezo.com)
- [6] PCB Piezotronics ®, 2007, Dynamic force and Strain sensors, Estados Unidos.
- [7] Pallás Areny, R., (2003), Sensores y acondicionadores de señal, Barcelona, España, Ed.Marcombo.



# DOCUMENTO 2

# PRESUPUESTO



## Índice

1. Desarrollo del presupuesto	
1.1 Materiales y equipo utilizado .....	Pág. 1

INDICE DE TABLAS

Tabla.1 Materiales y equipo utilizado para el desarrollo del experimento

Pág.1

## 1. Desarrollo del presupuesto

Para poder llevar a cabo este proyecto se han necesitado unos recursos materiales que tienen un coste. No se han tenido en cuenta impuestos por venta, costes de amortización ni de investigación ya que ha sido simplemente un desarrollo experimental.

### 1.1 Materiales y equipo utilizado

Para el desarrollo del experimento se han usado tanto materiales electrónicos como instrumentos de medida. A continuación, en la tabla 1 se explica con más detalle:

Referencia	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€)	Total (€)
Placa board	Placa 15x5 cm marca Ariston	Unidades	1	15	15
Osciloscopio	Marca Tektronix modelo TDS 1002	Unidades	1	500	500
Fuente de Alimentación	Fuente simétrica	Unidades	1	270	270
Sondas de medida	Marca HP	Unidades	2	25	50
Amplificador operacional	TL 071 de Texas Instruments	Unidades	1	0,85	0,85
Sensor	7BB-20-6L0 de MuRata®	Unidades	1	0,86	0,86
Sensor	SDT1-028K (1-1000288-0) de Measurement Specialities®	Unidades	1	27,42	27,42
Condensador 47 nF		Unidades	1	0,25	0,25
Condensador 100 nF		Unidades	1	0,25	0,25
Condensador 220 nF		Unidades	1	0,25	0,25
Cables DuPont	Cables modelo DuPont	Pack	1	4,5	4,5
Resistencia 1 G Ohm	Vishay RNX0501G00FNEL 1	Unidades	1	2,75	2,75
Resistencia 5,6 M Ohm		Unidades	1	0,2	0,2
Resistencia 1,5 M Ohm		Unidades	1	0,15	0,15
Pesas de precisión		Pack	1	30	30
Cinta adhesiva		Unidades	1	1	1
				<b>TOTAL</b>	<b>903,48</b>

Cabe destacar que la parte más costosa del presupuesto son los instrumentos de medida y la fuente de alimentación ya que los materiales para el montaje del circuito representan un valor reducido respecto al total.



# DOCUMENTO 3

## ANEXOS



## Índice

1. Amplificador operacional TL 071 de Texas instruments®
2. Datasheet del sensor SDT1-028K (1-1000288-0) de Measurement Specialities®
3. Datasheet del sensor 7BB-20-6L0 de MuRata®
4. Datasheet de resistencia Vishay RNX0501G00FNEL 1



# 1. Amplificador operacional TL 071 de Texas instruments®



TL071, TL071A, TL071B  
TL072, TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B, TL072M, TL074M

SLOS080N – SEPTEMBER 1978–REVISED JULY 2017

## TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers

### 1 Features

- Low Power Consumption
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias and Offset Currents
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion: 0.003% (Typical)
- Low Noise  
 $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (Typical) at  $f = 1 \text{ kHz}$
- High-Input Impedance: JFET Input Stage
- Internal Frequency Compensation
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate: 13 V/ $\mu\text{s}$  (Typical)
- Common-Mode Input Voltage Range Includes  $V_{CC+}$

### 2 Applications

- Motor Integrated Systems: UPS
- Drives and Control Solutions: AC Inverter and VF Drives
- Renewables: Solar Inverters
- Pro Audio Mixers
- DLP Front Projection System
- Oscilloscopes

### 3 Description

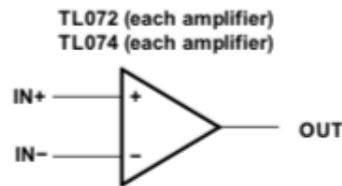
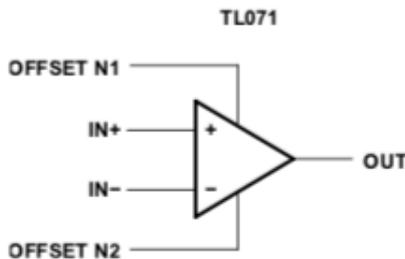
The TL07xx JFET-input operational amplifiers incorporate well-matched, high-voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit. The devices feature high slew rates, low-input bias and offset currents, and low offset-voltage temperature coefficient. The low harmonic distortion and low noise make the TL07x series ideally suited for high-fidelity and audio pre-amplifier applications. The TL071 device has offset pins to support external input offset correction.

#### Device Information<sup>(1)</sup>

PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL07xxD	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.90 mm
TL07xxJG	CDIP (8)	9.59 mm × 6.67 mm
TL074xJ	CDIP (14)	19.56 mm × 6.92 mm
TL07xxP	PDIP (8)	9.59 mm × 6.35 mm
TL07xxPS	SO (8)	6.20 mm × 5.30 mm
TL074xN	PDIP (14)	19.3 mm × 6.35 mm
TL074xNS	SO (14)	10.30 mm × 5.30 mm
TL07xxPW	TSSOP (8)	4.40 mm × 3.00 mm
TL074xPW	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

### Logic Symbols



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

### 6.10 Electrical Characteristics: TL071C, TL072C, TL074C

$V_{CC\pm} = \pm 15$  V (unless otherwise noted)

PARAMETER		TEST CONDITIONS <sup>(1)</sup> <sup>(2)</sup>		MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{IO}$	Input offset voltage	$V_O = 0$ $R_S = 50 \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3	10	mV
			$T_A = \text{Full range}$			13	
$\alpha$	Temperature coefficient of input offset voltage	$V_O = 0$ $R_S = 50 \Omega$	$T_A = \text{Full range}$		18		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$I_{IO}$	Input offset current	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		5	100	pA
			$T_A = \text{Full range}$			10	nA
$I_{IB}$	Input bias current <sup>(3)</sup>	$V_O = 0$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		65	200	pA
			$T_A = \text{Full range}$			7	nA
$V_{ICR}$	Common-mode input voltage range	$T_A = 25^\circ\text{C}$		$\pm 11$	-12 to 15		V
$V_{OM}$	Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	$\pm 12$	$\pm 13.5$		V
		$R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$	$T_A = \text{Full range}$	$\pm 12$			
		$R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$		$\pm 10$			
$A_{VD}$	Large-signal differential voltage amplification	$V_O = \pm 10$ V $R_L \geq 2 \text{ k}\Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	25	200		V/mV
			$T_A = \text{Full range}$	15			
$B_1$	Utility-gain bandwidth	$T_A = 25^\circ\text{C}$			3		MHz
$r_i$	Input resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$			$10^{12}$		$\Omega$
CMRR	Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICR(\text{min})}$ $V_O = 0$ $R_S = 50 \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	70	100		dB
$k_{SVR}$	Supply voltage rejection ratio ( $\Delta V_{CC\pm}/\Delta V_{IO}$ )	$V_{CC} = \pm 9$ V to $\pm 15$ V $V_O = 0$ $R_S = 50 \Omega$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	70	100		dB
$I_{CC}$	Supply current (each amplifier)	$V_O = 0$ ; no load	$T_A = 25^\circ\text{C}$		1.4	2.5	mA
$V_{O1} / V_{O2}$	Crosstalk attenuation	$A_{VD} = 100$	$T_A = 25^\circ\text{C}$		120		dB

(1) All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode voltage, unless otherwise specified.

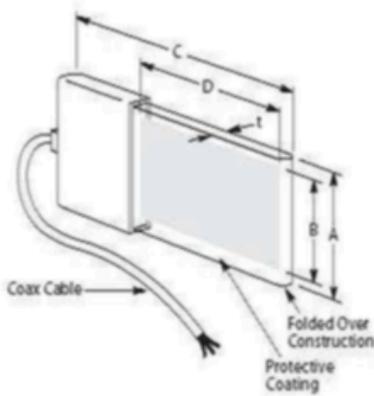
(2) Full range is  $T_A = 0^\circ\text{C}$  to  $70^\circ\text{C}$ .

(3) Input bias currents of an FET-input operational amplifier are normal junction reverse currents, which are temperature sensitive, as shown in Figure 1. Pulse techniques must be used that maintain the junction temperature as close to the ambient temperature as possible.

2. Sensor SDT1-028K (1-1000288-0) de Measurement Specialities®



**DIMENSIONS**



DIMENSION in INCHES (mm)

A Film	B Electrode	C Film	D Electrode	t ( $\mu$ m)	Cap (nF)
.640 (16)	.520 (13)	1.64 (41)	1.18 (30)	75	2.78

**SDT SHIELDED PIEZO SENSORS**

**SPECIFICATIONS**

- Shielded coaxial cable lead
- Shielded sensor
- Low noise
- Flexible
- Multi-purpose
- Piezo film Technology

The "S" in SDT stands for "Shielded Sensor." SDT1 Piezo Film Sensors consist of a rectangular element of Piezo film together with a molded plastic housing and 18" of coaxial cable. The film element, screen printed with silver ink, is folded over on itself, providing self-shielding of the transducer area. This is important in applications in high EMI environments.

The SDT1 can be adhered to other surfaces using double sided adhesives, epoxy or cyanoacrylate (super glue). Care should be taken if the sensor is to be removed, as the double-side adhesive can peel the metallization from the film.

When adhered to a surface in this manner, the SDT1 is an excellent contact microphone or dynamic strain gage. The output from the SDT1 can input directly to an oscilloscope (10 M $\Omega$  preferred input impedance) or a signal analyzer.

**FEATURES**

- Shielded piezo film sensor
- High longitudinal strain coefficient
- Integral coax cable
- Wide frequency response

**APPLICATIONS**

- Machine monitoring
- Acoustic emission detection
- Contact microphone
- Vibration / impact sensing
- Detecting machine tool chatter
- Acoustic pickup
- Vibration analysis for equipment and product design

# Estudio de sensores piezoeléctricos en aplicaciones de fuerza

## PERFORMANCE SPECIFICATIONS

<b>Minimum Impedance</b>	1 M $\Omega$
<b>Preferred Impedance</b>	10 M $\Omega$
<b>Output Voltage @ 10 m<math>\Omega</math></b>	Min 15 V
<b>Storage Temperature</b>	-40°C to +70°C [-40°F to 160°F]
<b>Operating Temperature</b>	0°C to +70°C [32°F to 160°F] (Depending on adhesive system). For more stringent, high operating temperature requirements, special preparation of the sensor can be arranged.
<b>Operating Force Range</b>	up to 2% strain
<b>Output</b>	15-20 mV/ $\mu$ strain
<b>Circuit Connection</b>	Red Wire-Signal White/Braided Wire-Ground
<b>Physical Characteristics</b>	Wire Length 457.2 mm [18 In.] Total Sensor Length/Width/Height 44.5 x 19.7 x 3.2 mm [1.75 x .775 x .125 In.] Sensor Element Length/Width/Height 28.6 x 11.2 x .13 mm

## ORDERING INFORMATION

Description	Model No.	Part No.
SDT Shielded Piezo Sensor	SDT1-028K	1-1000288-0

### INSTRUCTIONS

Using a double-sided adhesive tape, adhere the sensing element to the vibrating object. The adhesive tape should have a thin and non-foam type carrier. A double-sealed tape, such as 3M® 444, works well.

Clean off the surface of the object upon which the sensor is to be placed, removing any foreign particles such as dirt, dust, grease, etc. Then apply the adhesive tape to the clean surface. Next, adhere the SDT1-028K to the adhesive by attaching the end of the sensor element first and smoothing out the element (avoiding any creases or air bubbles) towards the lead attach.

The adhesive must continue out and hold down the plastic lead attachment housing as well, to prevent errant results. Similarly, it is recommended that the wire be taped down in some instances (this can be done with masking tape in a designated position).

If the sensor is to be used in an environment above 45°C [114°F], then a different adhesive system is recommended since the double sided tape can become soft and affect the sensor's ability to detect vibration. Cyanoacrylate or a five-minute epoxy are useable, but they are permanent.

The leads can be connected directly into an oscilloscope or frequency analyzer with preferably, a 10 MΩ impedance.

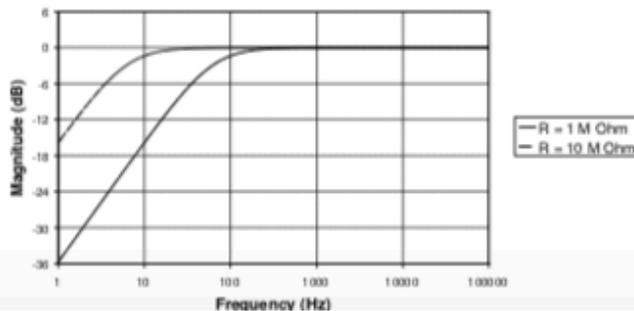
### SENSOR OPERATION

Operating in a reciprocal fashion, changes in length generate a corresponding charge and hence, voltage to appear on the electrodes of the film. The transducer behaves like an "active" capacitor, consequently, loading of the signal by the input impedance of the measuring device must be considered. Due to the thinness of the films, the associated capacitance can be sufficient to give adequate low frequency response into standard 1 MΩ loads, but use of an X10 probe will extend the low frequency range by a decade. For extremely small devices and low frequency vibration levels, some buffering may be desirable. For the majority of analysis work, this is unnecessary and the film can feed directly to the instrument.

The low mass contributed by the transducer is of major importance, and its non-resonant behavior. Frequency response is inherently flat into the MHz region with only the R-C roll off at low frequencies distorting the profile. Since it is responding to strain rather than acceleration, high signal levels may be generated by low frequency flexing, so a distinction must be made between the frequency response of the film for changes in its primary parameter (i.e., strain) and its relative behavior compared with, say piezoelectric accelerometers.

The response of the sensor to strain enforces its likeness to a strain gauge, but with much higher output. The sensor performs well at low frequencies where displacement is large and acceleration low, as well as at high frequencies where displacement is small and acceleration high. The sensor has a flat response over a very wide frequency range, with resonant frequency points above 10 MHz.

SDT1-028K Low Frequency Response



### 3. Sensor 7BB-20-6L0 de MuRata®

<b>7BB-20-6L0</b>	6.3 ±0.6kHz	1000 max.	10.0 ±30% [1kHz]	20.0	14.0	12.8	0.42	0.20	Brass (with Lead Wire: AWG32 Length 50mm)
-------------------	-------------	-----------	---------------------	------	------	------	------	------	---

		Application Part Number	Phone	Watch	Clock	Medical Equip- ment	Fire/ Gas Alarm	Digital Camera	Toy	Bar Code Scanner	Printer	Note- PC PDA	
Piezoelectric Diaphragm	External Drive Type	7BB-12-9		●	●	●		●	●			●	
		7BB-15-6			●	●		●	●			●	
		7BB-20-3	●	●	●	●	●			●	●		
		7BB-20-6			●	●		●	●			●	
		<b>7BB-20-6L0</b>			●	●				●			●
		7BB-27-4	●		●	●				●	●		
		7BB-27-4L0	●		●	●				●	●		
		7BB-35-3	●		●					●	●		
		7BB-35-3L0	●		●			●		●	●		
		7BB-41-2	●										
		7BB-41-2L0	●										
		7NB-31R2-1					●	●					
	Pie	7BB-20-6C	●						●	●			
		7BB-20-6CL0	●						●	●			
		7BB-27-4C	●					●		●	●		

### 4. Datasheet de resistencia Vishay RNX0501G00FNE1

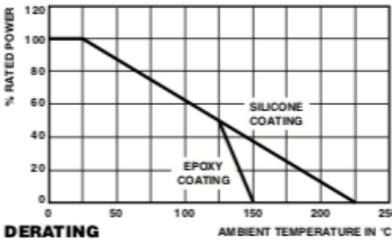
TECHNICAL SPECIFICATIONS										
PARAMETER	UNIT	RNX025	RNX038	RNX050	RNX075	RNX100	RNX125	RNX150	RNX200	
Insulation Resistance	$\Omega$	$\geq 10^{11}$								
Category Temperature Range	$^{\circ}\text{C}$	Epoxy coated = - 55/+ 150; silicone coated = - 55/+ 225								

GLOBAL PART NUMBER INFORMATION						
New Global Part Numbering: RNX05010K0KLB (preferred part numbering format)						
<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-weight: bold; font-size: 1.2em;"> <span>R</span><span>N</span><span>X</span><span>0</span><span>5</span><span>0</span><span>1</span><span>0</span><span>K</span><span>0</span><span>K</span><span>K</span><span>L</span><span>B</span><span> </span><span> </span><span> </span><span> </span> </div>						
GLOBAL MODEL <small>(See Standard Electrical Specifications table)</small>	RESISTANCE VALUE R = $\Omega$ K = k $\Omega$ M = M $\Omega$ G = G $\Omega$ 910R = 910 $\Omega$ 10M0 = 10 M $\Omega$ 1G00 = 1.0 G $\Omega$	TOLERANCE CODE D = $\pm 0.5\%$ F = $\pm 1\%$ G = $\pm 2\%$ J = $\pm 5\%$ K = $\pm 10\%$	TEMP. COEFFICIENT H = 50 ppm K = 100 ppm N = 200 ppm	PACKAGING <sup>(1)</sup> EL = Lead (Pb)-free, lacer EE = Lead (Pb)-free, T/R (1/4, 3/8, 1/2, 3/4, 1 only) LB = Tin/lead, lacer RC = Tin/lead, T/R (1/4, 3/8, 1/2, 3/4, 1 only)	CONSTRUCTION Blank = Standard N = Non-inductive P = 0.032" $\varnothing$ leads	SPECIAL Blank = Standard (Dash number) (Up to 3 digits) From 1 to 999 as applicable
Historical Part Number example: RNX-1/210K0K (will continue to be accepted)						
RNX-1/2		10K0		K		L05
HISTORICAL MODEL	CONSTRUCTION	RESISTANCE VALUE	TOLERANCE CODE	TEMP. COEFFICIENT	PACKAGING	

- Notes**
- <sup>(1)</sup> Some packaging codes are model specific
  - For additional information on packaging, refer to the Through-Hole Resistor Packaging document ([www.vishay.com/doc?31544](http://www.vishay.com/doc?31544)).

DIMENSIONS in inches (millimeters)			
GLOBAL MODEL	L	L <sub>1</sub> MAX.	
RNX025	0.290 $\pm$ 0.020 (7.37 $\pm$ 0.51)	0.358	(9.09)
RNX038	0.420 $\pm$ 0.020 (10.67 $\pm$ 0.51)	0.470	(11.94)
<b>RNX050</b>	0.540 $\pm$ 0.020 (13.72 $\pm$ 0.51)	0.595	(15.11)
RNX075	0.790 $\pm$ 0.020 (20.07 $\pm$ 0.51)	0.845	(21.46)
RNX100	1.040 $\pm$ 0.020 (26.42 $\pm$ 0.51)	1.100	(27.94)
RNX125	1.290 $\pm$ 0.020 (32.77 $\pm$ 0.51)	1.350	(34.29)
RNX150	1.540 $\pm$ 0.020 (39.12 $\pm$ 0.51)	1.600	(40.64)
RNX200	2.040 $\pm$ 0.020 (51.82 $\pm$ 0.51)	2.100	(53.34)

**Note**  
<sup>(1)</sup> Available with 0.032" (0.813 mm) leads  $\pm$  0.002" (0.051 mm)



MATERIAL SPECIFICATIONS	
Element	High temperature fired cermet film
Core	High purity 96 % alumina
Coating	Flame-retardant epoxy on RNX025 and RNX038, flameproof silicone on RNX050 to RNX200
Termination	Standard lead material is solder-coated copper. Solderable and weldable.

MECHANICAL SPECIFICATIONS	
Terminal Strength	5 pound pull test
Solderability	Continuous satisfactory coverage when tested in accordance with MIL-STD-202, method 208

RNX050	RNX-1/2	1.2	0.86	0.6	2K	1M to 100M	0.5, 1, 2, 5, 10	50
						1K to 250M	1, 2, 5, 10	100
						1K to 2G	1, 2, 5, 10	200
						100 to 100K	1, 2, 5, 10	Non-inductive <sup>(4)</sup>

