

**TRABAJO FINAL DEL CURSO 2009-2010 DE EXPERTO  
UNIVERSITARIO EN MANTENIMIENTO DE MEDIOS E  
INSTALACIONES INDUSTRIALES**

**ESCUELA POLITÉCNICA DE SEVILLA  
UNIVERSIDAD DE SEVILLA**

**CONCEPTOS ELECTRÓNICOS EN LA  
MEDIDA DE LA ACELERACIÓN Y LA  
VIBRACIÓN**

**Autor:** Daniel Monje Centeno  
Ingeniero Técnico Industrial en Electrónica Industrial

**Fecha:** 09/09/2010

## INDICE

1. Introducción
2. Tipos de Acelerómetros
3. Criterios de selección de acelerómetros
4. Sensores piezoeléctricos
  - 4.1. Comportamiento de los materiales piezoeléctricos
  - 4.2. Los dispositivos piezoeléctricos como sensores
  - 4.3. Problemática de la utilización de los sensores piezoeléctricos
5. Conclusiones

### 1. INTRODUCCIÓN

La medida de la aceleración ha alcanzado recientemente cotas de utilización muy altas, en parte gracias a las excelentes prestaciones de los sensores desarrollados para ser aplicados en sistemas de seguridad en automoción, como en el caso del *airbag*. Los primeros sensores de aceleración y vibración eran auténticos sistemas de alta complejidad y reducida fiabilidad que se basaban en la medida de los desplazamientos de una masa inercial sujeta a la aceleración con resortes que contrarrestaban el efecto de la fuerza generada por la masa.

De la misma forma, la medida de la vibración resulta muy parecida a la de la aceleración ya que la presencia de movimientos vibratorios supone aceleraciones cambiantes cuyo aspecto es similar al del movimiento inicial.

Otras variables habituales que llevan implícita la medida de la aceleración dan lugar a los sensores de impacto que se caracterizan por la detección de fuertes aceleraciones en cortos periodos de tiempo, como en el caso de los sensores de choque que disparan los *airbag* de los automóviles.

En todos estos casos cabe hablar de medidas de aceleración y los sensores para cada aplicación serán siempre acelerómetros aunque, en función de lo que se vaya a medir, el dispositivo estará diseñado para ofrecer las mejores características en ese sentido: por ejemplo, cuando se van a medir aceleraciones constantes no tiene sentido el empleo de dispositivos piezoeléctricos puesto que no responden bien ante sollicitaciones constantes.

Cuando lo que se pretende medir es una vibración, como es el caso dentro del mantenimiento predictivo de máquinas rotativas, muchas veces sólo interesa su amplitud y/o su frecuencia con lo que la linealidad del dispositivo que la mida es un factor secundario.

Así pues, aunque la medida de la aceleración genérica tenga varias vertientes, en muchas ocasiones los sensores se denominan como sensores de vibración, de choque o impacto, a pesar de que todos ellos puedan ser agrupados dentro del campo de los acelerómetros porque, de hecho, lo son.

Finalmente, cabe considerar los sensores de golpe (*tilt sensors*) que son un caso de sensor de impacto para detectar pequeños golpes.

## 2. TIPOS DE ACELERÓMETROS.

Los métodos para medir la aceleración son muy variados por lo que sólo vamos a mencionar algunos de ellos:

- **Acelerómetros mecánicos:** emplean una masa inerte y resortes elásticos. En este tipo de acelerómetro los cambios se miden con galgas extensiométricos, incluyendo sistemas de amortiguación que evitan la propia oscilación. Otros sistemas emplean sistemas rotativos desequilibrados que originan movimientos oscilatorios cuando están sometidos a aceleración (servoacelerómetros) o detectan el desplazamiento de una masa inerte mediante cambios en la transferencia de calor (acelerómetros térmicos).
- **Acelerómetros capacitivos:** modifican la posición relativa de las placas de un microcondensador cuando está sometido a aceleración.
- **Acelerómetros piezoeléctricos:** su funcionamiento se basa en el efecto piezoeléctrico y son, probablemente, de los más usados en la medida de vibraciones. Su principal inconveniente radica en su frecuencia máxima de trabajo y en la incapacidad de mantener un nivel permanente de salida ante una entrada continua.
- **Acelerómetros micromecánicos (MEMS según las siglas anglosajonas *Micro-Electro-Mechanical-System*):** este tipo de dispositivos ha sido desarrollado para su empleo como sensor de impacto en los sistemas de airbag, en sistemas antibloqueo de frenos o en cualquier otro proceso en que se pretenda medir impacto.

## 3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ACELERÓMETROS.

Para elegir un sensor para una medida de aceleración de entre las posibilidades del mercado, además de los márgenes de valores de la aceleración que admite habrá que tener en cuenta si es capaz de medir en continua o sólo en alterna, la máxima frecuencia a la que puede trabajar, así como los correspondientes parámetros instrumentales típicos de todo sensor.

En la siguiente tabla se resumen algunas de las principales características de los acelerómetros y sus aplicaciones más típicas teniendo en cuenta que el margen de medida se expresa en unidades de g (aceleración de la gravedad terrestre cuyo valor es aproximadamente de  $9,81 \text{ m/s}^2$ ):

<b>Tipo de acelerómetro</b>	<b>Margen de medida</b>	<b>Ancho de Banda (Hz)</b>	<b>Ventajas e inconvenientes</b>	<b>Aplicaciones</b>
Micromecánico	De 1,5 a 250g	De 0,1 a 1500	- Alta sensibilidad - Coste medio - Uso sencillo - Bajas temperaturas	- Impacto - ABS - Airbag - Automoción
Piezo-eléctricos	De 0 a 2000g	De 10 a 20000	- Sensibilidad media - Uso complejo - Bajas temperaturas - No funcionan en continua	- Vibración - Impacto - Uso industrial
Piezo-resistivos	De 0 a 2000g	De 0 a 10000	- Respuesta en continua y alterna - Prestaciones medias - Bajo coste	- Vibración - Impacto - Automoción
Capacitivos	De 0 a 1000g	De 0 a 2000	- Funciona en continua - Bajo ruido - Baja potencia - Excelentes características	- Uso general - Uso industrial
Mecánicos	De 0 a 200g	De 0 a 1000	- Alta precisión en continua - Lentos - Alto coste	- Navegación inercial - Guía de misiles - Herramientas - Nivelación

En cualquier caso, la selección del acelerómetro para una aplicación concreta se hará en función de una serie de criterios:

- a) Frecuencia de trabajo o margen de frecuencias de uso, tanto los valores mínimos (¿podrían trabajar en continua?) como los máximos que determinan la velocidad de respuesta que precisamos.
- b) Los valores máximos y mínimos del nivel de la señal que esperamos. El valor mínimo de señal no suele ser muy importante excepto para algunas aplicaciones en concreto en que se precisan medidas de vibraciones muy débiles. En estos casos, el valor de la señal debería ser de, al menos, cinco veces el valor del ruido generado. Por el contrario, el valor máximo no debería sobrecargar el sensor ni introducir distorsiones en la señal (tanto el sensor como el amplificador asociado podrían salirse de la zona lineal).
- c) Consideraciones acerca de la forma de montaje, el espacio disponible, la forma de salida de los cables, etc. pueden parecer triviales al usuario, pero pueden hacer que una selección quede invalidada.
- d) Otras consideraciones tales como la temperatura de trabajo, aspectos ambientales y de compatibilidad química o la necesidad de seguridad intrínseca deberán tenerse en cuenta a la hora de efectuar la elección final del sensor.

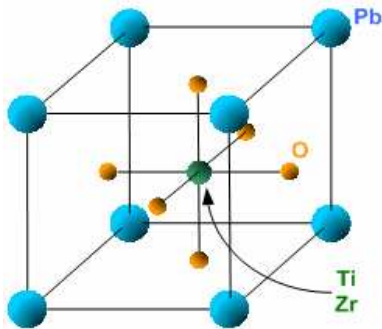
## 4. SENSORES PIEZOELÉCTRICOS.

Debido a su amplia utilización en el campo de la medida de vibraciones, explicamos a continuación las características más importantes de este tipo de sensores.

El funcionamiento de este tipo de sensores se basa en el efecto piezoeléctrico descubierto por Jacques y Pierre Curie en 1880 en los cristales de cuarzo. Este fenómeno se produce en determinados sistemas cristalinos y consiste en la aparición de una cierta carga eléctrica cuando el cristal es sometido a algún tipo de deformación.

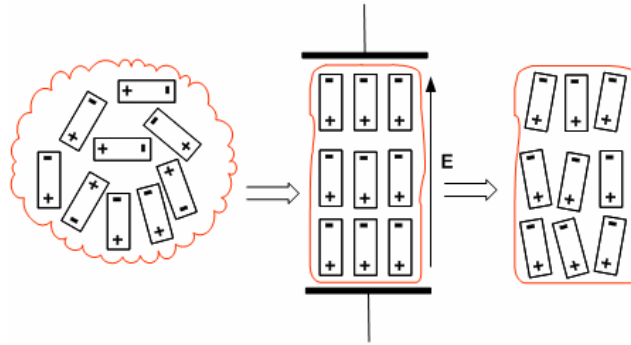
Además del cristal de cuarzo, existen otras sustancias naturales que poseen comportamientos similares tales como la turmalina o la sal de Rochelle. Estas sustancias tienen una gran estabilidad tanto ante el cambio en las condiciones medioambientales como en el transcurso del tiempo, pero las señales que son capaces de producir resultan muy débiles lo que es un problema para cualquier sistema de instrumentación. Habida cuenta de la importancia del fenómeno y de su aplicabilidad, se empezó a trabajar en el desarrollo de cristales que exhibieran las mismas propiedades que estos materiales naturales pero que mejoraran su comportamiento desde el punto de vista de la potencia de las señales producidas. Así, se obtuvieron materiales como el titanato de bario o el titanato-circonato de plomo (PZT) que, si bien no tienen tanta estabilidad como las sustancias naturales, sí que presentan un nivel mucho más alto de señal de salida lo que redundaría directamente en una mejora de los parámetros más significativos de cualquier sistema de instrumentación.

Los materiales sintéticos producen el efecto piezoeléctrico gracias a la anisotropía de su estructura y a la distribución de sus cargas eléctricas, que se suele conseguir después de un tratamiento:



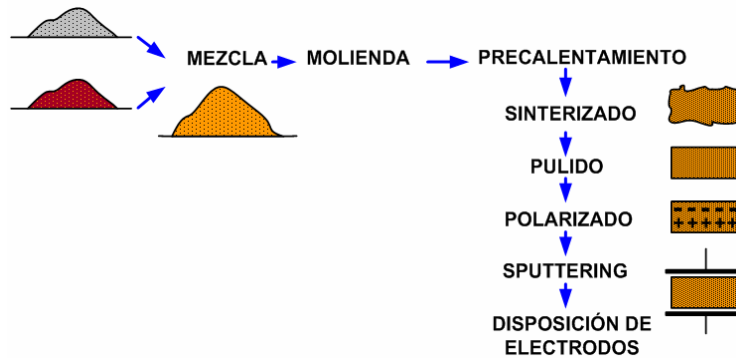
Estructura cristalina de un material sintético, el PZT

En dichos materiales, los dominios (grupos de unidades cristalográficas con la misma polarización y la misma orientación de deformación) pueden estar orientados en cualquier dirección de tal manera que, en condiciones generales, el cristal tendrá un comportamiento macroscópico nulo desde el punto de vista eléctrico y de deformación. Sin embargo, después de un proceso de polarización con campos eléctricos muy intensos, se puede conseguir una reordenación de los dominios y el reforzamiento de los comportamientos anisótropos que permite obtener el efecto piezoeléctrico:

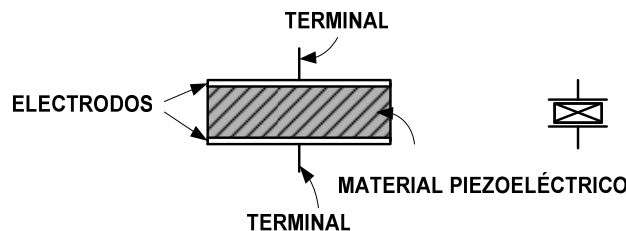


Obtención de un material piezoeléctrico por reordenación de los dominios magnéticos bajo una fuerte polarización.

El proceso de fabricación de los materiales cerámicos utilizados como dispositivos piezoeléctricos supone una serie de pasos que se indican en la siguiente figura, con etapas de sinterizado, pulido y polarizado para concluir con la deposición de los electrodos:

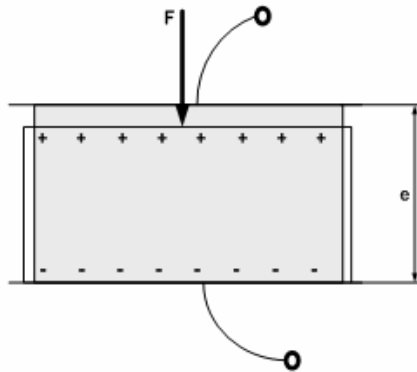


Al concluir el proceso de fabricación se dispone de un cristal de material piezoeléctrico con dos electrodos que es capaz de producir una carga sobre ellos cuando está sometido a un esfuerzo de deformación o de actuar en sentido contrario, es decir, producir una fuerza cuando se actúe eléctricamente sobre él, ya que el fenómeno es totalmente reversible. En la siguiente figura se muestra un dispositivo de este tipo junto con su símbolo de circuito:



### 4.1. Comportamiento de los materiales piezoeléctricos.

Supongamos un material piezoeléctrico configurado como se muestra en la siguiente figura al que se le aplica una fuerza  $F$ , provocando la siguiente deformación:



La suma de los comportamientos inercial, elástico y viscoso del material provoca la aparición de fuerzas que contrarrestan el efecto de la fuerza  $F$  de tal manera que se puede escribir que:

$$F = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + r \cdot \frac{dx}{dt} + s \cdot x$$

siendo  $m$  la masa del cristal,  $r$  el coeficiente de rozamiento (viscosidad),  $s$  el coeficiente elástico y  $x$  la deformación total producida.

El efecto piezoeléctrico provoca la aparición de una carga directamente proporcional a la deformación producida e inversamente proporcional al espesor  $e$  del cristal:

$$q = \frac{k'}{e} \cdot x$$

Si los terminales del dispositivo se cierran sobre un circuito, podría aparecer una corriente eléctrica según la ecuación:

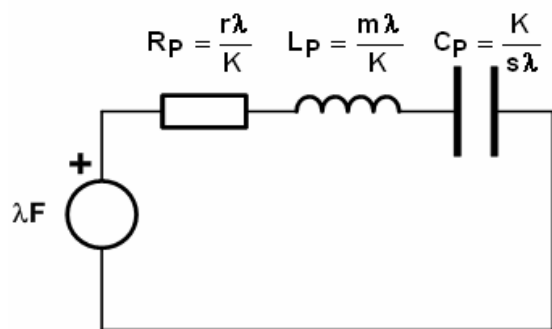
$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{k'}{e} \cdot \frac{dx}{dt} = K \cdot \frac{dx}{dt}$$

lo que significa que la corriente que aparecería sería proporcional a la velocidad de variación de la deformación y que, con una fuerza estática aplicada, la deformación sería constante y la corriente tendería a anularse.

Considerando las expresiones anteriores podemos escribir:

$$F = \frac{m}{K} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{r}{K} \cdot i + \frac{s}{K} \cdot \int i \cdot dt$$

Esta expresión tiene la misma forma que la ecuación que rige la evolución de las variables eléctricas de un circuito RLC en serie lo que permite establecer una analogía con aquel circuito y permite una representación como la de la figura siguiente:



Circuito eléctrico análogo al comportamiento de un sensor piezoeléctrico

(Un circuito RLC serie que se excita con una fuente de tensión de valor  $V$  está representado por una expresión como:

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} + R \cdot i + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt$$

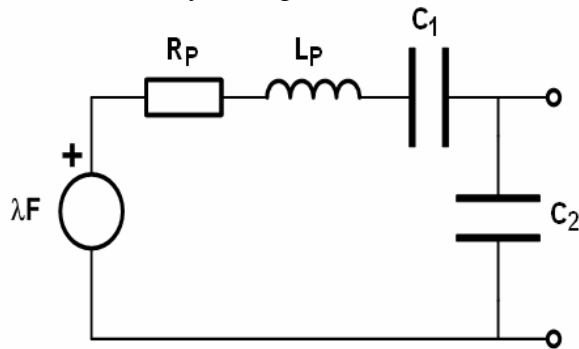
La ecuación que representa al circuito será pues:

$$V = \lambda F = R_p \cdot i + L_p \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_p} \cdot \int i \cdot dt, \text{ donde } \lambda \text{ es un factor de conversión dimensional.}$$

Este circuito representa perfectamente el comportamiento del dispositivo piezoeléctrico, pero podemos preguntarnos: ¿dónde están los terminales de salida? Dado el aspecto del dispositivo, un par de placas electrodos separadas por un material aislante podríamos pensar que el propio componente es el condensador del circuito anterior pero, en realidad no es así. En efecto, si se considera la capacidad real que representa el propio componente, asumiendo que tiene una superficie  $A$ , que los electrodos están separados una distancia  $e$  y que la permitividad dieléctrica absoluta del cuarzo es  $\epsilon$ , se obtiene:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{e}$$

La capacidad  $C$  que corresponde al valor de la capacidad física del dispositivo no tiene nada que ver con el efecto piezoeléctrico y es mayor que la capacidad de su circuito eléctrico equivalente  $C_p$ . Por todo ello, se considerará que la capacidad piezoeléctrica  $C_p$  se divide en  $C_1$  y  $C_2$  según se indica en el circuito de la siguiente figura:



Circuito equivalente modificado del sensor piezoeléctrico.

El equivalente serie de las capacidades  $C_1$  y  $C_2$  forma la capacidad piezoeléctrica  $C_p$  mientras que su equivalente paralelo representa la capacidad que se ve desde el exterior del dispositivo, es decir, la capacidad construida  $C$ . Por ello puede escribirse que:

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$C = C_1 + C_2$$

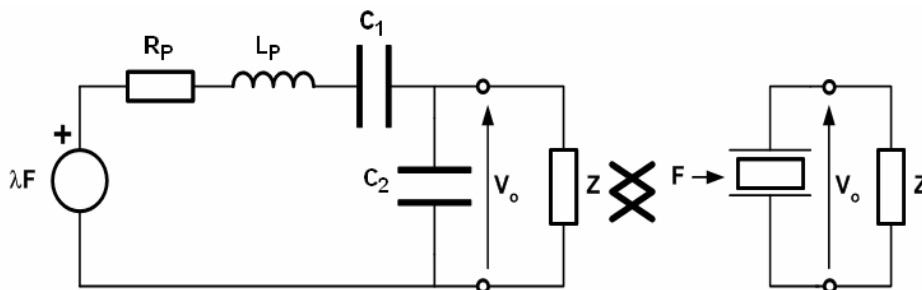
Operando se puede obtener que:

$$C_2 = \frac{C + \sqrt{C^2 - 4 \frac{k}{\lambda_s} C}}{2}$$

$$C_1 = \frac{C - \sqrt{C^2 - 4 \frac{k}{\lambda_s} C}}{2}$$

Con los valores típicos de la mayoría de los cristales se puede considerar sin demasiado error que  $C_2 \gg C_1$ .

Con un circuito como el que se muestra en la siguiente figura, la salida sobre la que se efectúa la medida estará cargada con una impedancia genérica  $Z$ :



En estas condiciones aparecen los primeros problemas:

- a) Si la carga tiene una componente resistiva y la fuerza es estática, la presencia del condensador  $C_1$  provocará que la señal de tensión en la salida vaya cayendo de valor hasta llegar a cero, lo que imposibilita al sistema para hacer medidas de esfuerzos estáticos con una salida de tensión. Visto desde otro punto de vista, si se dibuja el diagrama de Bode de la respuesta del dispositivo piezoeléctrico, aparecerá una frecuencia de corte inferior. En el fondo, lo que está ocurriendo es que se trata de un sensor generador de señal y sólo se introduce una cantidad limitada de energía por lo que no puede mantenerse indefinidamente en la salida una tensión sobre la resistencia.
- b) Con cargas dinámicas (del tipo de vibraciones) se podrá desarrollar una tensión de salida de forma permanente ya que se estará aportando energía constantemente. Sin embargo, en este caso, habrá que tener en cuenta el tipo de carga ya que la presencia de componentes reactivas modificará el comportamiento del sistema (su frecuencia de resonancia y su ganancia).

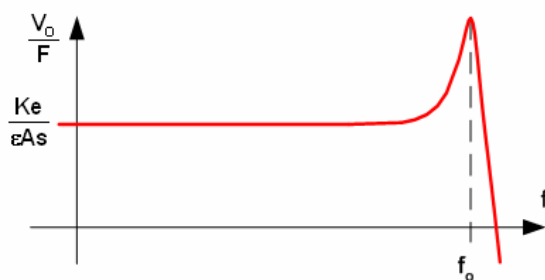
Concretando, consideremos la expresión que determina la magnitud de la tensión de salida del circuito equivalente modificado del sensor piezoeléctrico en principio sin carga ( $Z = \infty$ ):

$$V_0 = \lambda F \frac{C_p}{C_2} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 L_p C_p)^2 + \omega^2 R_p^2 C_p^2}}$$

Considerando la aproximación de que  $C_2$  es mucho mayor que  $C_1$  y, como quiera que el paralelo de ambos es  $C$ , se puede suponer que  $C \approx C_2$ . Sustituyendo las expresiones de  $L_p$ ,  $R_p$  y  $C_p$  en la ecuación anterior se obtiene la expresión:

$$V_0 = \frac{ke}{\epsilon A} \cdot \frac{1}{\sqrt{(s - \omega^2 m)^2 + \omega^2 r^2}} F$$

Representando esta expresión en función de la frecuencia, se obtiene el siguiente diagrama caracterizado por una ganancia en continua y una resonancia a la frecuencia  $f_0$ :



Representación de la función de transferencia de un sensor piezoeléctrico en función de la frecuencia.

La frecuencia  $f_0$  será:

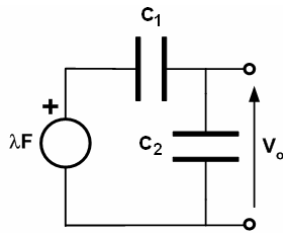
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/s}}$$

Si el circuito se considera cargado con una impedancia  $Z$ , la expresión no será la misma: por un lado, el efecto de la resistencia de carga evitará la presencia de tensión continua, mientras que la presencia de cualquier capacidad en la carga modificará la frecuencia de resonancia y la ganancia del sistema.

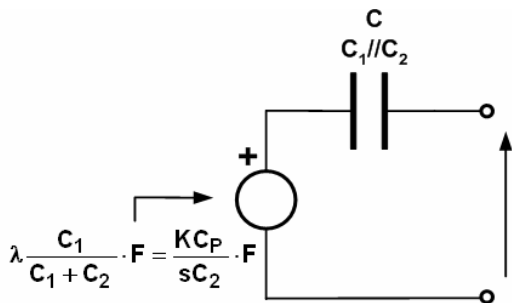
## 4.2. Los dispositivos piezoeléctricos como sensores.

Dada la influencia de la fuerza aplicada sobre el dispositivo piezoeléctrico en la carga generada en él, cabe la posibilidad de utilizarlo como sensor para la medida de la fuerza o de cualquier magnitud física que se pueda convertir en fuerza.

A la vista del aspecto que presenta su curva característica en función de la frecuencia, siempre que se considere que está trabajando en la zona en que la respuesta es plana, se pueden despreciar los efectos inductivo y resistivo de su equivalente y, por tanto, el sistema se puede considerar reducido al circuito de la figura siguiente, en el que sólo aparecen los dos condensadores:



Haciendo el equivalente de Thévenin, se obtiene el siguiente circuito, que representa el sistema con una fuente de tensión correspondiente al valor de la tensión de salida en vacío y una impedancia de salida que es el condensador que se ve entre los terminales de salida del dispositivo:

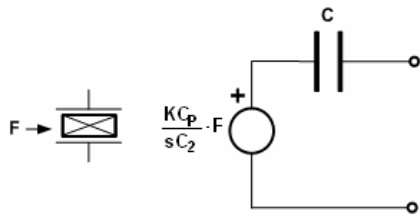


En general, los fabricantes proporcionan el valor del condensador de salida del dispositivo y la sensibilidad del sistema al parámetro que se está midiendo, suponiendo que se trabaja siempre en la zona plana de la curva de respuesta. También se suele proporcionar la frecuencia de resonancia y/o el margen de frecuencias de validez de los datos proporcionados (capacidad y sensibilidad).

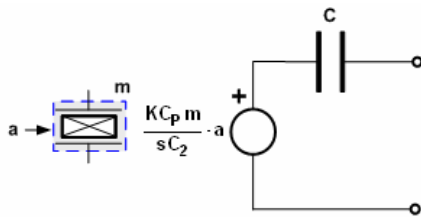
El sensor piezoeléctrico, en sí mismo, responde a la fuerza aplicada pero, como quiera que otras magnitudes tales como la aceleración o la presión se pueden relacionar directamente con la fuerza aplicada, es posible disponer también de sensores para la medida de estas dos magnitudes; es más, los fabricantes suelen utilizar una serie de materiales piezoeléctricos que mediante la adición de masas o la determinación de una superficie de actuación pueden actuar como sensores de aceleración o como sensores de presión, ya que se tiene que:

- Añadiendo una masa  $m$ :  $F = m \cdot a$
- Actuando sobre una superficie  $S$ :  $F = P \cdot S$

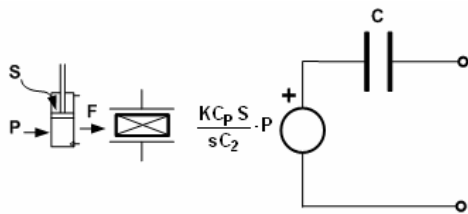
En la siguiente figura se muestran los circuitos equivalentes para los sensores piezoeléctricos de fuerza, presión y aceleración, indicando la sensibilidad del sistema a cada una de estas variables en función de los parámetros del sistema:



La medida de la fuerza es directa.



La aceleración se mide con una masa  $m$  solidaria al sensor.

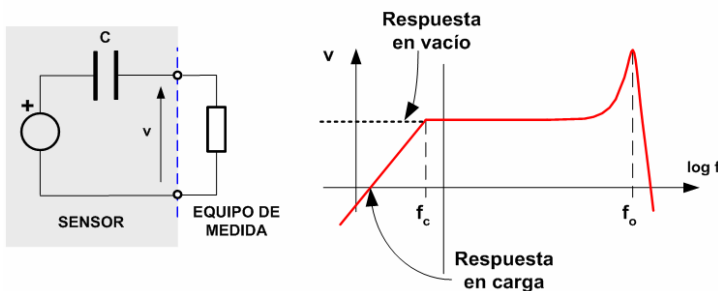


La presión se puede medir mediante un pistón de superficie  $S$  aplicado sobre el sensor que transforma la presión en fuerza.

### 4.3. Problemática de la utilización de los sensores piezoeléctricos.

La utilización de los tres circuitos anteriores no es tan inmediata como pueda parecer de un circuito tan sencillo como el equivalente mostrado. En efecto, si se pudiera extraer la información del dispositivo mediante la lectura de la señal con algún sistema de impedancia infinita, es decir, sin transferencia de energía hacia el sistema de lectura, todo lo dicho hasta este momento sería totalmente cierto y la medida resultaría muy sencilla.

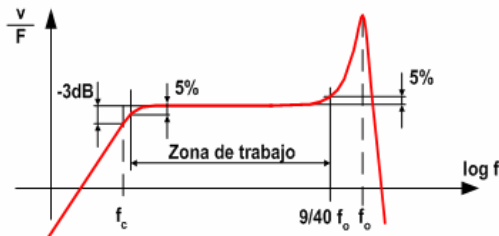
Desgraciadamente, cualquier sistema para la lectura del valor de salida del sensor no posee impedancia infinita por lo que cargará inevitablemente el circuito. En estas circunstancias, la carga colocada en la salida modificará el comportamiento del sistema, introduciendo un polo a baja frecuencia y estableciendo la correspondiente frecuencia de corte inferior según se muestra en la siguiente figura:



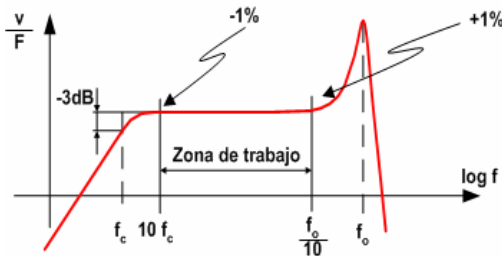
Aparición de una frecuencia de corte inferior en la respuesta del sensor piezoeléctrico debido a la carga conectada.

Los efectos de la resistencia de salida sobre el comportamiento del sensor se traducen en la reducción del margen de frecuencias al que se puede usar; a pesar de que puede hacerse que la frecuencia de corte inferior sea muy baja, no puede llegar a medir en continua por lo que el ámbito de aplicación de este tipo de sensores queda limitado (en principio) a las medidas dinámicas, es decir, medidas en las que la fuerza aplicada sobre el dispositivo (la aceleración o la presión en su caso) sea variable.

Para los casos de las medidas dinámicas se puede hablar de una zona de trabajo comprendida entre la frecuencia de corte inferior y la frecuencia de resonancia. Sin embargo, a la frecuencia de corte inferior la respuesta del sistema es -3 dB menor que en la zona plana y, además, habrá un desfase claro entre la fuerza de excitación y la señal entregada. En la parte superior, tampoco se deberá trabajar en las cercanías de la frecuencia de resonancia ya que se introducirían ganancias adicionales y desfases importantes por lo que se recomienda un valor mucho menor tal como  $9/40f_0$  que introduce un error inferior al 5%. Si se pretende minimizar el error en las frecuencias extremas de la zona de trabajo, se puede trabajar una década por encima de la frecuencia de corte inferior y una década por debajo de la frecuencia de resonancia, consiguiendo que el error en la medida sea de un 1% aproximadamente (ver siguientes figuras):



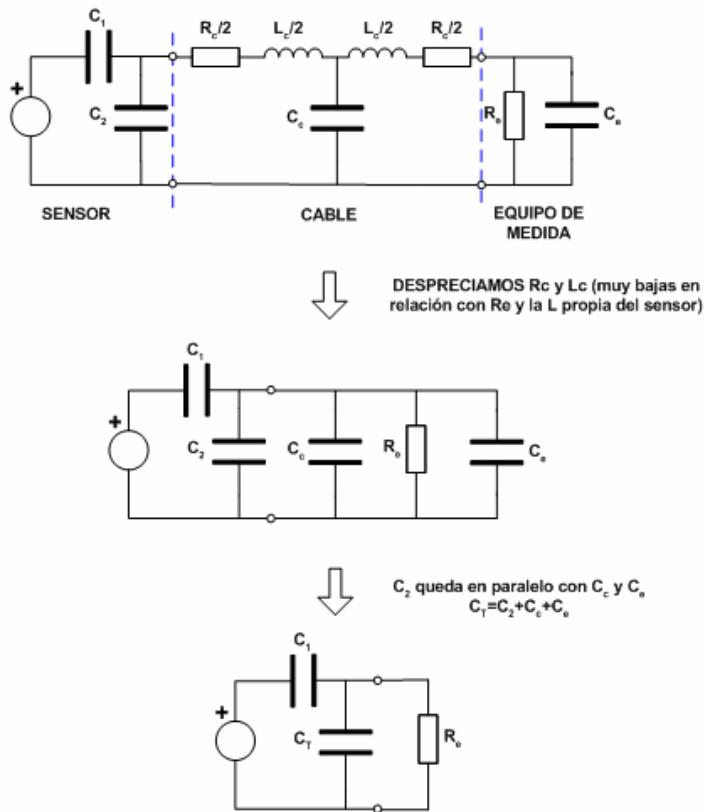
Definición tradicional de la zona de trabajo del sensor



Redefinición de la zona de trabajo para que el error sea menor o igual al 1%

Pero aunque se tengan en cuenta las anteriores circunstancias, la medida puede traer más complicaciones ya que lo dicho hasta aquí presupone condiciones pseudos-ideales en la conexión de un equipo de medida al sensor (sólo se ha tenido en cuenta la resistencia de carga). Además, será necesario utilizar algún tipo de cable de conexión que introducirá un equivalente resistivo-capacitivo modificando sustancialmente la medida.

Si consideramos el equivalente del sensor piezoeléctrico para la medida directa de la fuerza visto anteriormente, encontraremos que cualquier capacidad introducida por el cable (o la que introduzca la entrada del equipo de medida) quedará en paralelo con  $C_2$ , afectando al divisor capacitivo y, por ende, afectando a la tensión de salida, según podemos ver en las siguientes figuras:

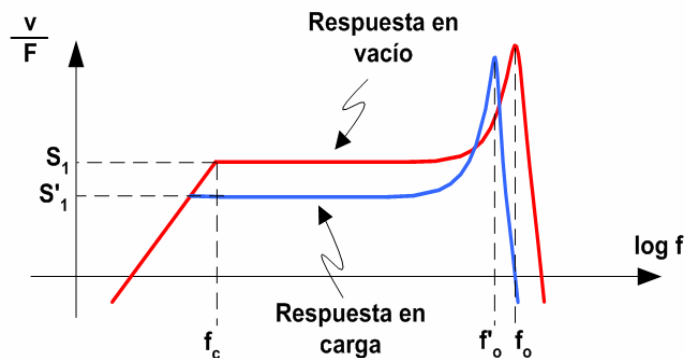


Efecto del cable sobre el circuito del sensor piezoeléctrico.

Como se puede observar el equivalente final tiene un aspecto igual al original excepto en el valor de la capacidad  $C_2$  que es ahora  $C_T$  y que engloba, además, el valor de la capacidad del cable  $C_c$  y la capacidad de entrada  $C_e$ :

$$C_T = C_2 + C_c + C_e$$

Este cambio en el valor de las capacidades establece una modificación en la respuesta del sistema ya que la zona plana se desplaza hacia abajo (menor sensibilidad del sistema) y la frecuencia de resonancia baja de valor:



La presencia del cable de conexión del sensor modifica la ganancia y la frecuencia de resonancia del conjunto.

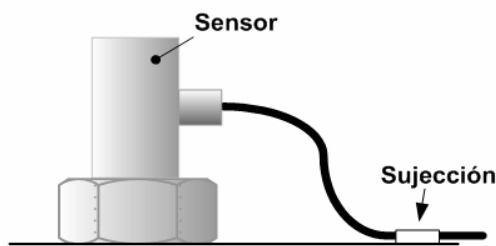
Pero los problemas no terminan aquí; la capacidad introducida por el cable y por el amplificador restringe las frecuencias de uso del sistema, aunque el principal problema está en que la capacidad total afecta a la ganancia en la zona de uso (la región plana). Para un sistema de medida determinado ( $C_e$ ) conocida y para un cable determinado ( $C_c$  conocida) el valor de la sensibilidad  $S_F$  en la zona plana es:

$$S_F = \frac{k}{s} \cdot \frac{C_p}{C_T}$$

Por lo que cualquier cambio en el valor de  $C_T$  le afecta directamente. No es frecuente un cambio en  $C_e$  pero sí que puede ocurrir un cambio en la capacidad del cable si modificamos su longitud ya que el valor de  $C_c$  se puede obtener como la capacidad propia del cable por unidad de longitud multiplicada por la longitud de cable empleada. Así pues, cualquier cambio en este sentido se traducirá inmediatamente en un cambio en la zona de uso y, lo que es peor, un cambio en la tensión de salida del sistema.

Finalmente, el cable introduce un factor que reduce la sensibilidad del sistema a medida que se incrementa la longitud; como quiera que los valores de sensibilidad de estos sistemas no es muy alta, la longitud del cable debe ser minimizada para conseguir reducir  $C_c$  y, por ello,  $C_T$ .

Como precaución adicional, **cuando el sensor piezoeléctrico se use para medir vibraciones**, el cable debe sujetarse firmemente para evitar la introducción de ruido en la conexión (efecto triboeléctrico) lo que es especialmente importante en caminos de alta impedancia. En la siguiente figura se muestra la forma típica de sujeción del cable de estos sensores mediante una grapa o un adhesivo:



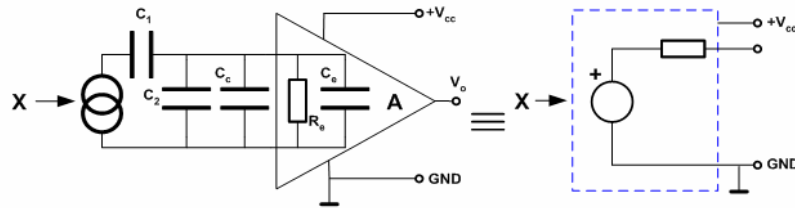
Precauciones de montaje de un sensor piezoeléctrico midiendo vibraciones.

A la hora de utilizar este tipo de sensores en medidas dinámicas ya sean de fuerza, aceleración o presión, nos podemos encontrar con diversos tipos en el mercado con distintos valores de sensibilidad, alcance de la medida, banda de frecuencias de uso, etc. aunque la mayoría suele ser de dos tipos:

1. Los sensores propiamente dichos
2. Los sensores piezoeléctricos pre-amplificados

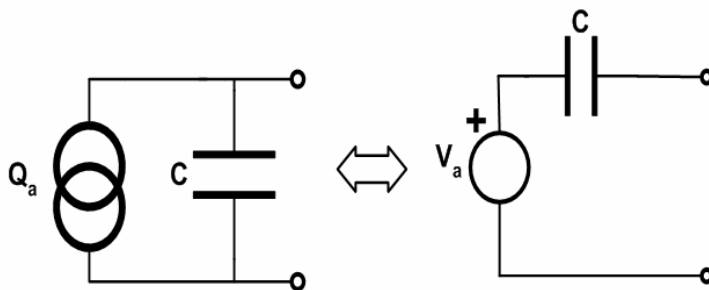
Los sensores piezoeléctricos propiamente dichos no incorporan más que el dispositivo sensor, careciendo de una salida tan cómoda como los pre-amplificados. En este caso, todas las precauciones anteriormente mencionadas son imprescindibles.

Por otro lado, los sensores piezoeléctricos pre-amplificados incorporan un amplificador, y van siendo cada vez más habituales por la comodidad de uso, ya que producen un valor de tensión proporcional a la excitación aplicada en la salida del amplificador y su comportamiento resulta independiente del conexionada exterior puesto que carga y resistencia de entrada del amplificador se mantiene constante siempre. El fabricante de estos sensores suele proporcionar como datos básicos la sensibilidad en tensión, la banda de frecuencias de uso y la impedancia de salida. Para utilizarlos se puede sólo emplear su equivalente Thévenin de salida como cualquier circuito electrónico. Lógicamente, este tipo de sensores precisa alimentación (ver siguiente figura):



Sensor piezoeléctrico pre-amplificado y su sencillo equivalente.

Además de los datos de los márgenes de uso típicos, los fabricantes proporcionan los datos de la capacidad de salida y de la sensibilidad para la carga, es decir, la caracterización de un equivalente similar al equivalente simplificado mostrado anteriormente pero en el que se ha utilizado un equivalente eléctrico distinto con una fuente de carga en lugar de una fuente de tensión. En la siguiente figura se muestra este nuevo equivalente (el que más habitualmente proporcionan los fabricantes) en relación con el equivalente anterior:



Equivalente eléctrico usual de un sensor piezoeléctrico.

Para hacer la conversión entre uno y otro equivalente basta con realizar un paso similar al que se hace para convertir un equivalente de Thévenin en uno Norton o viceversa.

## 5. CONCLUSIONES.

Los sensores piezoeléctricos se construyen con determinados materiales que tienen la propiedad de producir cargas cuando son sometidos a deformación. Su equivalente eléctrico resulta similar al de un circuito RLC aunque, en una primera aproximación, pueden despreciarse los comportamientos resistivos e inductivos quedando sólo el comportamiento capacitivo.

La respuesta de los sensores piezoeléctricos tiene dependencia de la frecuencia de trabajo presentado un pico de resonancia, una zona plana en la que se puede trabajar y una frecuencia de corte inferior causada por la carga que se coloque en el circuito.

La utilidad de los sensores piezoeléctricos trasciende la mera medida de la fuerza ya que cualquier variable física que se pueda transformar en una fuerza puede ser medida con ellos; casos muy habituales son los de la medida de aceleraciones y vibraciones y los de medida de presión. En cualquiera de esos casos, la medida es relativamente sencilla cuando la variable a medir es de una señal de alterna (medidas dinámicas), mientras que el problema se complica con señales constantes en el tiempo tales como las medidas de peso (medidas estáticas).

Cuando se pretende realizar medidas dinámicas (tales como las vibraciones) se emplea un amplificador de alterna aunque hay que tener precauciones con los diversos

parásitos de cables y entrada del amplificador, sobre todo los capacitivos ya que perturban la ganancia del conjunto y su banda de frecuencia de trabajo.