

Estudio en temperaturas de la respuesta de un piezoeléctrico

Ainara Ferrante, Tomás Mastantuono, Florencia Ramos

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Departamento de Física, Laboratorio IV

Resumen

En este trabajo observamos cómo cambiaba la respuesta de un piezoeléctrico al variar la temperatura ~~a la que se encontraba~~. Excitamos el sistema con un generador de funciones y realizamos un barrido de frecuencias para cada temperatura ~~que medimos~~, las cuales variamos desde -196°C hasta 77°C . Observamos que distintos parámetros de su resonancia y antiresonancia cambiaban con la temperatura, como el factor de calidad Q disminuyendo al bajar la temperatura, al igual que la frecuencia de resonancia. Esto se contradice directamente con lo esperado a partir de resultados anteriores para piezoeléctricos cerámicos, que muestran que tanto el factor de calidad como la frecuencia de resonancia deberían disminuir al aumentar la temperatura.

Introducción

Un material piezoeléctrico es aquel que al sufrir un estrés mecánico genera una diferencia de voltaje en su superficie. Asimismo, los materiales que presentan esta propiedad también exhiben la inversa: que bajo un campo eléctrico pueden generar presión. Entre los materiales que presentan estas propiedades podemos destacar cristales, como el cuarzo, polímeros y cerámicos [1].

Al cambiar la temperatura a la que se encuentra el piezoeléctrico, se observa que para aquellos hechos de cerámica, en particular PZT, sus propiedades cambian: su constante dieléctrica aumenta con la temperatura, al igual que su tangente de pérdidas [2].

La constante dieléctrica ε^T cuantifica qué tan bien el material puede almacenar carga cuando está sometido a un campo eléctrico, con respecto a la situación de estar en vacío. En particular, el superíndice T indica que se mide a cero estrés mecánico ($T=0$). La capacitancia efectiva del material es proporcional a esta constante, por lo que un incremento en la constante dieléctrica implica un incremento en la capacitancia efectiva del piezoeléctrico. Que esto suceda al aumentar la temperatura indica que la frecuencia de resonancia, dada por $w = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, disminuye. En la Figura 1 se observa la variación de la constante dieléctrica en función de la temperatura para un PZT-5A y un PZT-5H. Se puede observar que para las frecuencias elegidas las curvas son muy similares entre sí, y en todas la constante dieléctrica aumenta con la temperatura en un rango de -200°C a 100°C , el cual resulta de interés para este trabajo.

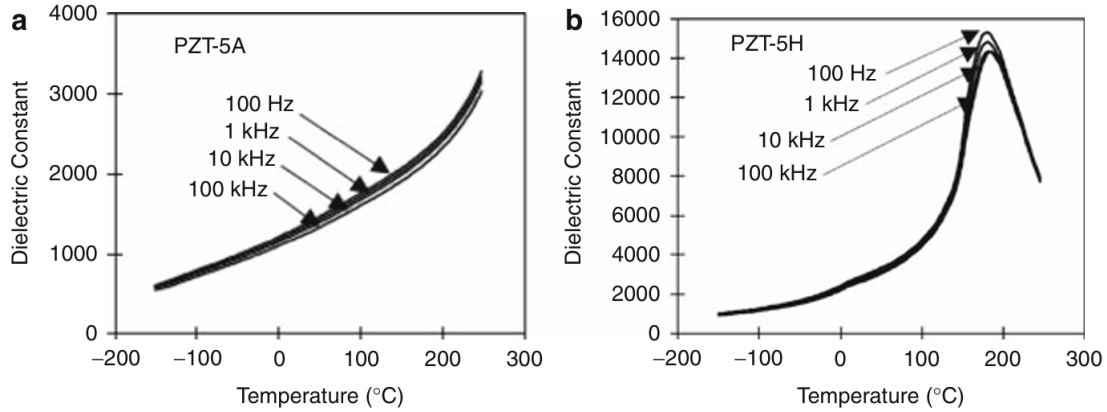


Figura 1: Constante dieléctrica en función de la temperatura para (a) un PZT-5A y (b) un PZT-5H. Tomada de Giurgiutiu (2014), *Piezoelectric Materials: Effect of Temperature*, en R.B.Hetnarski (Ed.), *Encyclopedia of Thermal Stresses* (pp. 3762–3769), Springer.

La tangente de pérdidas $\tan \delta$, también conocida como factor de disipación, expresa la cantidad de energía que se pierde como calor por ciclo, cuando está sometido a un campo alterno. Es decir, si este factor aumenta, entonces más energía se está convirtiendo en calor.

En la Figura 2 se ve que para la curva de 100kHz la tangente de pérdidas aumenta con la temperatura. Para este trabajo resultan relevantes frecuencias por encima de los 100kHz, por lo que esperaríamos que el comportamiento de nuestro material siga esta tendencia. Es decir, esperamos que para nuestro piezoeléctrico su factor de disipación también aumente con la temperatura.

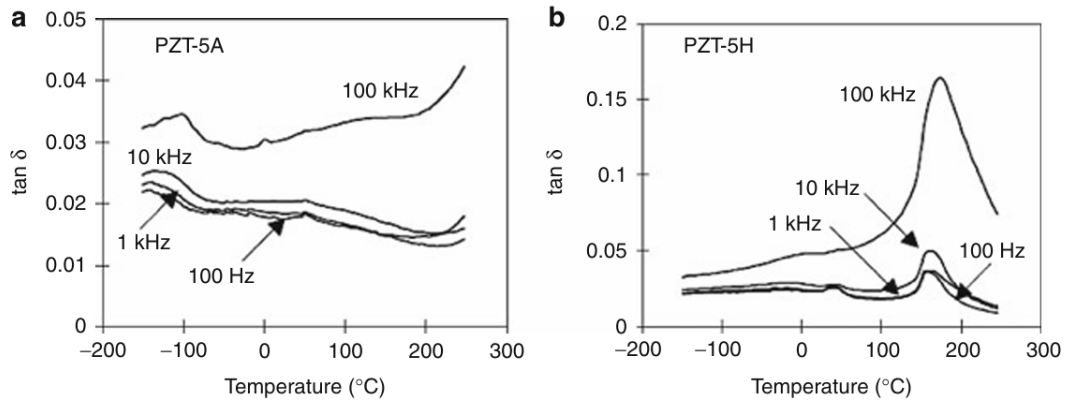


Figura 2: Tangente de pérdidas en función de la temperatura para (a) un PZT-5A y (b) un PZT-5H. Tomada de Giurgiutiu (2014), *Piezoelectric Materials: Effect of Temperature*, en R.B.Hetnarski (Ed.), *Encyclopedia of Thermal Stresses* (pp. 3762–3769), Springer.

Teniendo esto en consideración, y usando que el factor de calidad, Q , es inversamente proporcional a la tangente de pérdidas $Q \propto \frac{1}{\tan \delta}$, esperar que este factor aumente con la temperatura indica que Q deberá disminuir. Y, además, como el factor de calidad puede expresarse como la frecuencia de resonancia sobre el ancho de la campana, se espera que al disminuir el factor de calidad la campana se ensanche.

En este trabajo buscamos estudiar la respuesta de un piezoeléctrico cerámico cuando se varía su temperatura. Basándonos en estos resultados experimentales, esperaríamos que al aumentar la temperatura la frecuencia de resonancia disminuya y la campana se ensanche.

Desarrollo Experimental

Para este trabajo utilizamos un piezoeléctrico similar a un CSBLA500KEC8-B0, un tubo de ensayo, aceite para lograr termalizar el piezoeléctrico, un generador de funciones Tektronix AFG-1052, un osciloscopio Tektronix TBS-1022, un multímetro Amprobe38XRA y una termocupla tipo K conectado a este.

El montaje experimental se muestra en la Figura 3. Colocamos el piezoeléctrico, el cual posee un rango de trabajo en temperaturas desde -20°C a 80°C , dentro del tubo de ensayo y lo llenamos de aceite hasta taparlo. Para lograr excitarlo lo conectamos al generador de funciones Tektronix AFG-1022, configurado para generar una señal sinusoidal de 5Vpp, fase nula y frecuencia controlable mediante pyvisa desde la PC. Asimismo, el generador también estaba conectado al osciloscopio Tektronix TBS-1052 con un conector tipo T. Entre el generador y el piezoeléctrico pusimos una resistencia de $20\text{k}\Omega$, y colocamos otra igual a la salida, sobre la cual medimos la caída de voltaje con el osciloscopio. De esta forma, en el osciloscopio podíamos comparar la señal de entrada que venía directo del generador, y la señal de salida del piezoeléctrico.

Además, como nos interesaba conocer la temperatura del piezoeléctrico en todo momento, utilizamos una termocupla conectada a un multímetro Amprobe38XRA en su modo de adquisición de temperatura, el cual directamente leía en grados centígrados. La punta de la termocupla se mantuvo al mismo nivel que el piezoeléctrico, porque al tenerlo sumergido en aceite notamos que para temperaturas muy frías se formaba un gradiente de temperaturas en el mismo líquido, y que colocar la termocupla en el fondo del tubo de ensayo o apenas tocando el aceite no daban el mismo resultado.

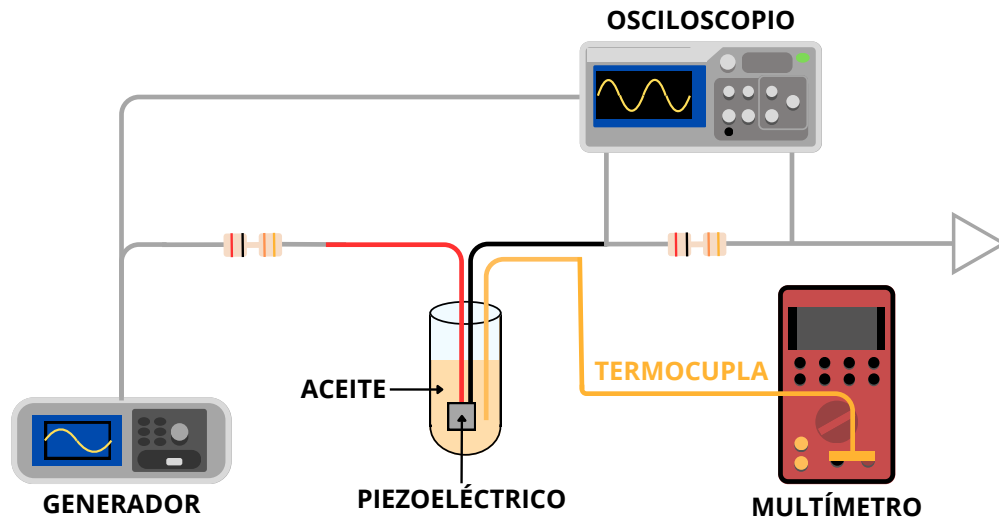


Figura 3: Montaje experimental. El generador se encuentra conectado a una resistencia de $20k\Omega$, seguido del primer electrodo del piezoeléctrico. Este está en un tubo de ensayo, con aceite. En este mismo aceite se encuentra la punta de la termocupla, conectada al multímetro. El otro electrodo del piezoeléctrico está conectado a otra resistencia de $20k\Omega$, y el osciloscopio lee la caída de voltaje en esta resistencia. Las tierras del generador y el osciloscopio estaban conectadas posterior a la resistencia. Además, el generador y el osciloscopio estaban conectados para ver la señal de entrada.

Como nuestro objetivo es el estudio en temperaturas de la respuesta de un piezoeléctrico, para lograr barrer varias temperaturas utilizamos dos métodos según el rango en el cual buscábamos realizar las mediciones. Para temperaturas menores a 0°C utilizamos un termo lleno de nitrógeno en estado líquido, y para enfriar el piezoeléctrico acercábamos el tubo de ensayo a la apertura del termo y esperábamos a que se enfriara hasta la temperatura que queríamos. Controlando constantemente con el multímetro, dejábamos el tubo a una altura tal del nitrógeno que se mantuviera en la temperatura que queríamos medir.

Para medir temperaturas mayores a 0°C , ~~o en particular mayores a~~ la temperatura ambiente, utilizamos un anafe eléctrico sobre el cual colocamos un recipiente lleno de agua. Dejando el tubo de ensayo con el piezoeléctrico en este recipiente podíamos regular la temperatura cambiando la potencia del anafe, y medir temperaturas cercanas a los 80°C .

Previo a realizar las mediciones sobre cada temperatura, buscamos las frecuencias en las cuales lográbamos visualizar resonancias y antiresonancias. Esperábamos antiresonancias por la forma constructiva que tenía el piezoeléctrico: el propio material encerrado entre dos placas metálicas. Teniendo esto en cuenta realizamos barridos de frecuencias teniendo en cuenta que queríamos adquirir ambas curvas para cada temperatura en la que se encontrara el piezoeléctrico.

Resultados y discusión

Para cada temperatura realizamos un barrido de frecuencias, donde para cada una de las frecuencias seleccionada adquiríamos los datos con el osciloscopio, el cual leía la señal de referencia y la señal de salida. A cada adquisición le realizamos un ajuste sinusoidal para obtener las amplitudes correspondientes a cada señal y su desfase. Una vez obtenidos estos parámetros calculamos la transferencia obtenida y la diferencia de fase entre la señal de salida y la señal enviada de referencia, tal como se muestra en la Figura 4, la cual corresponde a una temperatura de $(54,1 \pm 1,2)^{\circ}\text{C}$. El primer gráfico muestra, en su eje vertical izquierdo, la transferencia en función de la frecuencia, mientras que el eje vertical derecho muestra la diferencia de fase en función de la frecuencia. El segundo gráfico corresponde al muestreo de la temperatura en función del tiempo en el que se realiza su correspondiente barrido de frecuencias (para ver todas las mediciones referirse al Apéndice A).

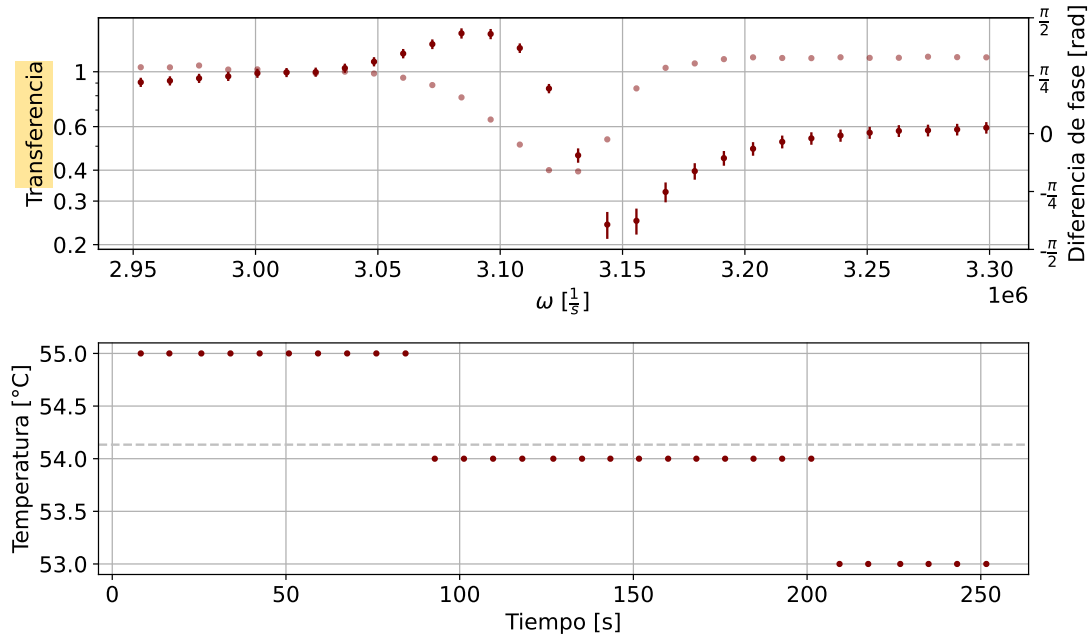


Figura 4: Respuesta de un piezoeléctrico a diferentes frecuencias para una temperatura $(54,1 \pm 1,2)^{\circ}\text{C}$. El primer gráfico, en su eje vertical izquierdo corresponde a la transferencia en función de la frecuencia, mientras que el eje vertical derecho corresponde a la diferencia de fase en función de la frecuencia. El segundo gráfico hace un muestreo de la temperatura en función del tiempo de medición.

Como se muestra en la Figura 4, la temperatura se encontraba variando a lo largo de cada medición, por lo que para asignarles a cada set de mediciones un cierto valor de temperatura decidimos tomar el valor medio de las mediciones como la temperatura representativa y asignarle como error la suma en cuadratura del error del promedio, es decir la desviación estándar sobre la raíz cuadrada de la cantidad de datos, con la resolución del instrumento.

Realizamos este proceso para doce curvas dentro del rango de -196°C hasta 54°C , las cuales se pueden visualizar superpuestas en la Figura 5. En esta Figura, el primer gráfico muestra la transferencia en función de la frecuencia, mientras que el gráfico debajo de este

muestra la diferencia de fase en función de la frecuencia de la señal de referencia. Además se encuentra una barra de colores que sirve de referencia para ayudar en el ordenamiento de las curvas en función de la temperatura, donde este comienza por colores azulados indicando las temperaturas más frías, mientras que las más calientes están marcadas por colores mas rojizos.

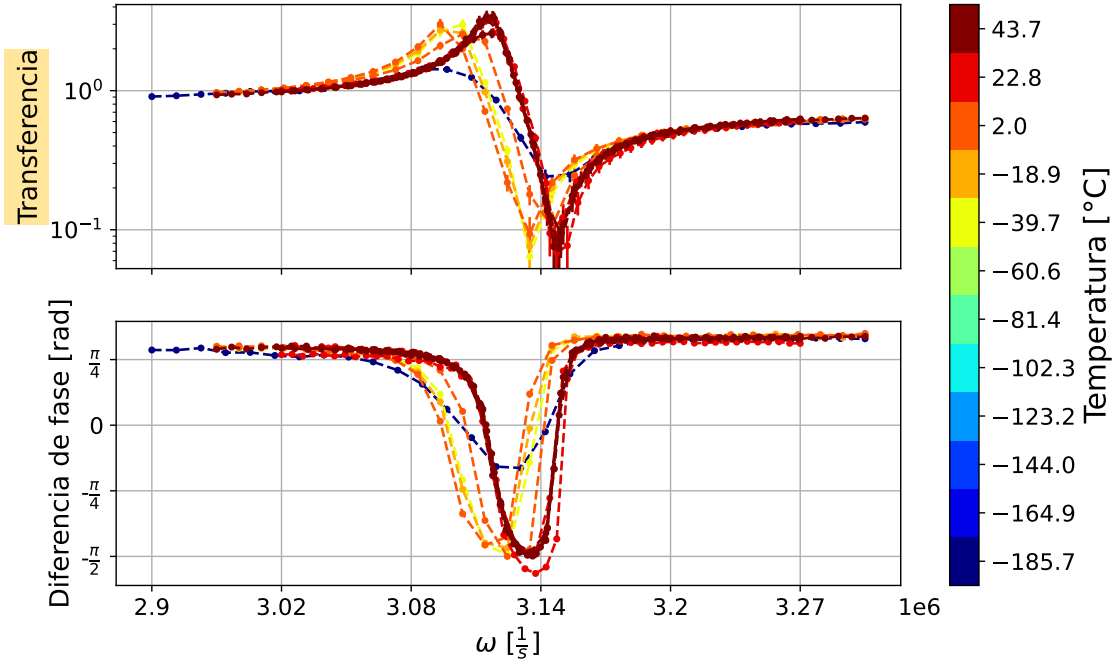


Figura 5: Respuestas de un piezoeléctrico al variar su temperatura. El gráfico superior representa la transferencia de la señal en función de la frecuencia enviada. El gráfico debajo a este representa la fase relativa entre la respuesta del piezoeléctrico y la señal de referencia en función de la frecuencia. En el lateral se indica mediante una *colorbar* las temperaturas respectivas de cada curva.

Como se puede visualizar en la **Figura**, los máximos de las curvas de trasferencia alcanzan valores mayores que uno, es decir, si las mediciones fueron realizadas correctamente, el piezoeléctrico respondería con un voltaje mayor que el enviado, **cosa que carece de sentido**. Al trabajar con altas frecuencias (el barrido ronda los 500kHz), nos encontramos con el problema de que la señal se puede reflejar en una **de las discontinuidades (por ejemplo, cuando conectamos el generador con la resistencia) si las impedancias no están adaptadas**. Esta reflexión puede provocar interferencia constructiva con la señal que se envía. Además, dado que estábamos trabajando con frecuencias altas y la señal que enviábamos era de 5Vpp, es posible que los mismos cables estén induciendo tensiones en los cables cercanos.

Otra observación que se puede realizar es que las frecuencias de resonancia y antiresonancia parecen variar con el aumento de la temperatura, en particular la frecuencia de resonancia muestra tendencia a aumentar junto con la temperatura. **Para poder lograr conocer mejor las tendencias con la variación de la temperatura, nos enfocamos en obtener parámetros característicos de este tipo de campanas, como los son el factor de calidad Q ,**

la frecuencia ω_{reso} donde llega a la resonancia, la frecuencia ω_{anti} donde la transferencia se hace aproximadamente nula y su transferencia T_{reso} en la resonancia.

En la Figura 6, se puede visualizar en (a) la variación del factor de calidad Q en función de la temperatura. Se puede notar como este factor disminuye cuando la temperatura baja, indicando que la frecuencia de resonancia pesada por el ancho de la campana disminuyen, lo que implica que la campana se ensancha cuando baja la temperatura. Sin embargo, podemos notar que para la temperatura del nitrógeno líquido el Q aumenta, pero se dificulta ver la tendencia que seguirían los datos intermedios por falta de mediciones en estas temperaturas. A su derecha, el gráfico (b) se encuentra la transferencia en la resonancia en función de la temperatura, donde se puede ver que tiende a disminuir al bajar la temperatura. En (c) se puede ver la frecuencia de resonancia ω_{reso} en función de la temperatura, donde continúa teniendo la misma tendencia que los parámetros anteriores, pero contradiciéndose con lo esperado por la teoría presentada, que indica que la frecuencia de resonancia debería disminuir al aumentar la temperatura. Finalmente, en el gráfico (d) se muestra la frecuencia de antiresonancia ω_{anti} , el cual muestra las mismas tendencias que la frecuencia de resonancia a bajar cuando disminuye la temperatura.

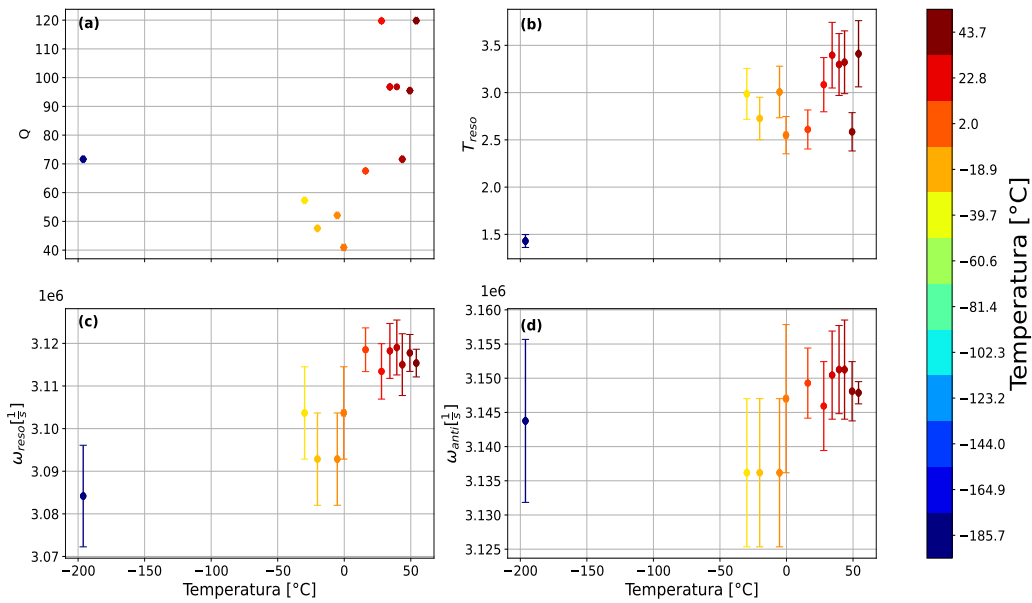


Figura 6: Parámetros característicos de las campanas de resonancia. El gráfico (a) se muestra la variación del factor de calidad Q en función temperatura. A su derecha, el grafico (b) muestra la transferencia en la resonancia en función de la temperatura. El gráfico (c) corresponde a la frecuencia de resonancia en función a la temperatura. Por último, el gráfico (d) muestra la frecuencia de antiresonancia en función de la temeperatura.

En la Figura 5, se puede notar que la transferencia en la frecuencia de resonancia dio valores mayores que uno. Dado esto decidimos realizar algunas modificaciones al armado experimental. Colocamos unas sondas de osciloscopio X10, y configuramos en el osciloscopio

el modo de atenuación $X10$. Luego adaptamos las impedancias para no tener el problema de las reflexiones: colocamos dos resistencias de 50Ω en paralelo a las que ya se encontraban sobre las terminales del piezoeléctrico. De esta manera el generador se seguía de una resistencia de 50Ω .

Ya realizadas estas modificaciones repetimos los mismos pasos para la adquisición de datos, logrando obtener nuevamente para cada temperatura un barrido de frecuencias como en el caso de la Figura 7. Esta se corresponde a una temperatura de $(-24,8 \pm 1,0)^\circ\text{C}$. El primer gráfico muestra, en su eje vertical izquierdo, la transferencia en función de la frecuencia, mientras que el eje vertical derecho corresponde a la diferencia de fase respecto de la señal de referencia en función de la frecuencia. Debajo del primer gráfico se hace un muestreo de la temperatura en función del tiempo en el que se realiza su correspondiente barrido de frecuencias (para ver todas las mediciones referirse al Apéndice B).

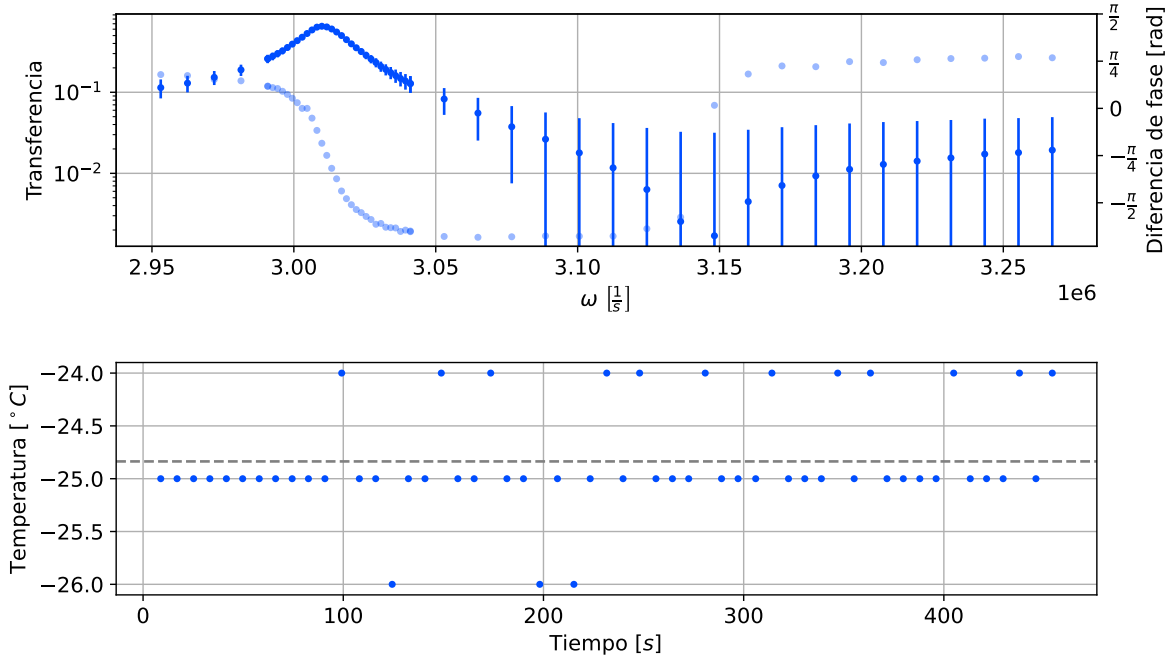


Figura 7: Respuesta de un piezoeléctrico a una temperatura de $(-24,8 \pm 1,0)^\circ\text{C}$. El gráfico superior representa la transferencia de la señal en función de la frecuencia enviada por el generador de funciones a su izquierda, y a su derecha presenta la fase relativa entre la respuesta del piezoeléctrico y la señal excitadora en función de la frecuencia. Debajo, la temperatura en función del tiempo en el que se realizó el barrido de frecuencias.

Realizamos este proceso para once temperaturas diferentes dentro del rango de -50°C hasta 77°C , las cuales se muestran superpuestas en la Figura 8. En esta Figura se muestra como primer gráfico la transferencia en función de la frecuencia para cada temperatura, mientras que el gráfico de abajo muestra la diferencia de fase en función de la frecuencia. Al igual que en la Figura 5, correspondiente al set de mediciones anterior, al costado se encuentra una barra de colores que sirve de referencia para ayudar en el ordenamiento de

las curvas en función de la temperatura utilizando el mismo mapa de colores.

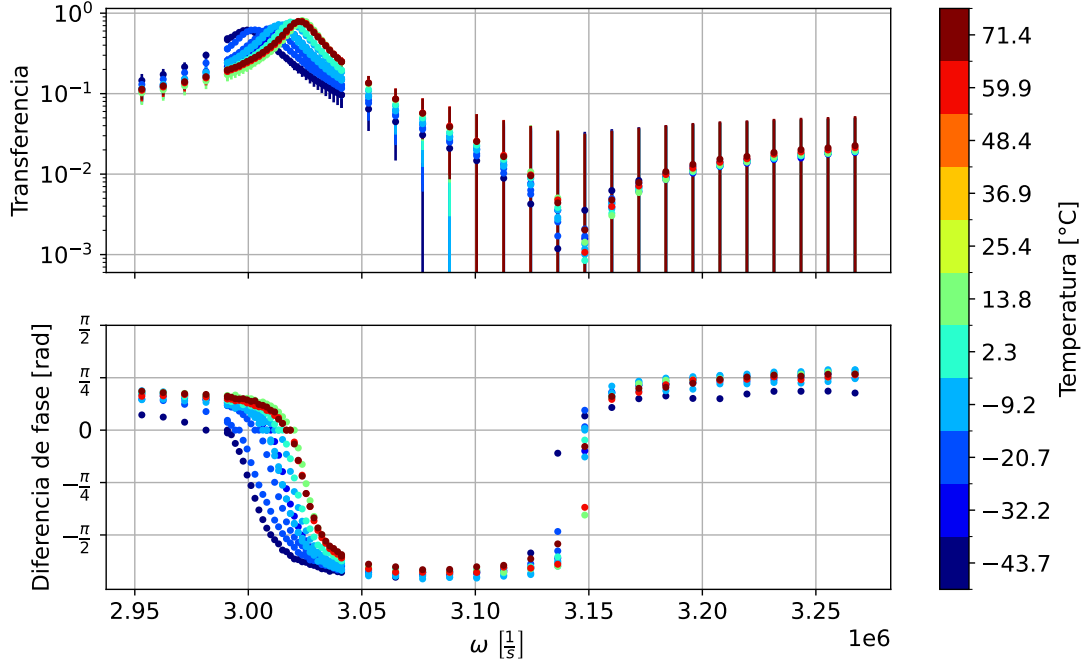


Figura 8: Respuestas de un sistema piezoeléctrico al variar su temperatura. El gráfico superior representa la transferencia de la señal en respuesta a la frecuencia enviada. El gráfico de abajo representa la fase relativa entre señal de respuesta y la señal de referencia. La barra lateral indica una guía de colores para representar la temperatura correspondiente a cada medición.

A primera vista se puede notar que las modificaciones realizadas al armado experimental funcionaron para solucionar que las transferencias medidas disminuyeran a valores por debajo de uno, lo cual es ~~mas~~ **mas** esperable considerando este tipo de sistemas. Para volver a visualizar las tendencias con la variación de la temperatura, nos enfocamos en obtener nuevamente los parámetros característicos para este set de mediciones.

En la **Figura 9** el primer gráfico, **(a)**, corresponde a la variación del factor de calidad Q en función de la temperatura. Se puede visualizar que en este caso, para temperaturas menores a 20°C tiende a disminuir **cuando baja la temperatura**, mientras que obtuvimos **dos mediciones para temperaturas mayores a 60°C que muestran que también disminuye Q pero al aumentar la temperatura**. El gráfico que se encuentra a su derecha, **(b)**, muestra la transferencia medida en la frecuencia de resonancia en función de la temperatura. Estos datos parecieran tener una misma tendencia que el factor Q , donde para temperaturas menores a 20°C la transferencia disminuye con la disminución de la temperatura, mientras que para ambos datos correspondientes a temperaturas mayores a 60°C , tienen una tendencia constante. El gráfico **(c)** presenta la frecuencia de resonancia ω_{reso} en función de la temperatura, la cual posee tendencias muy similares a lo obtenido en el primer set de mediciones, que también va en contra de lo que esperábamos con las **referencias observadas**. Finalmente **(d)** corresponde a la frecuencia de antiresonancia ω_{anti} en función de la temperatura, que en

contra de los demás resultados y diferente al primer set de mediciones, obtuvimos que para muchas temperaturas esta frecuencia se mantiene constante.

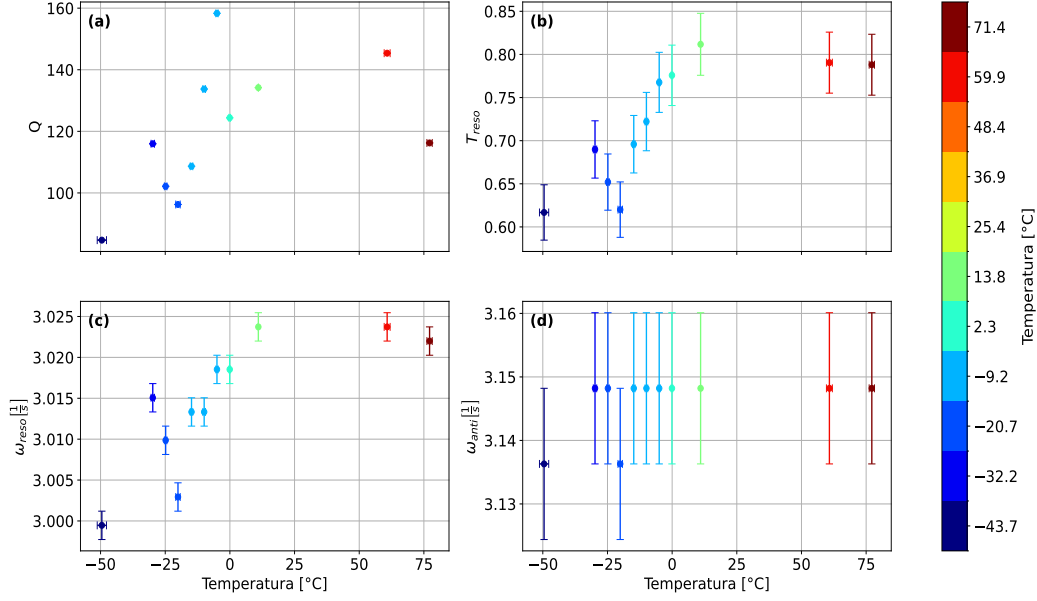


Figura 9: Parámetros característicos de las campanas de resonancia. El gráfico (a) muestra la variación del factor de calidad en función temperatura. A su derecha, el gráfico (b) muestra la transferencia en la resonancia en función de la temperatura. El gráfico (c) corresponde a la frecuencia de resonancia en función de la temperatura. Por último, el gráfico (d) muestra la frecuencia de antiresonancia en función de la temperatura.

Además, si comparamos estos resultados con los obtenidos en el set de mediciones anterior, no solo vemos las discrepancias en la frecuencia de antiresonancia, sino que también podemos visualizar como en la segunda experiencia las frecuencias de resonancia tuvieron un corrimiento hacia valores más chicos en la frecuencia respecto del primer set de mediciones. Esto podría deberse a la última medición del primer set de datos, la cual fue realizada a $-196,15^\circ \text{C}$, una temperatura muy por debajo del rango de temperaturas de trabajo reportado para el piezoeléctrico utilizado en la experiencia. Creemos que esta exposición pudo haber causado leves cambios en la estructura interna del material, cambiando los valores de sus constantes características de las que depende su frecuencia de resonancia. Aunque se observa que, a pesar de estos presuntos cambios, se mantiene la tendencia mostrada en las mediciones anteriores.

Conclusiones

Pudimos observar que la respuesta del piezoeléctrico cambiaba cuando variábamos su temperatura. En particular, nos concentramos en analizar cómo cambiaban los parámetros característicos de su curva: el factor de calidad Q , la transferencia en la resonancia, la frecuencia de resonancia y la frecuencia de antiresonancia. Observamos que estos parámetros cambiaban al variar la temperatura a la que se encuentra el material. Sin embargo, observamos que tanto el Q como la frecuencia de resonancia varían de manera contraria a lo que esperábamos considerando las referencias para piezoeléctricos cerámicos. Es decir, esperábamos que la frecuencia de resonancia disminuya al aumentar la temperatura, al igual que el Q , pero observamos lo contrario.

También logramos ver disparidades entre ambos sets de mediciones. En una primera instancia las frecuencias de resonancia se hallaban alrededor de los $3,1 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, mientras que para el segundo set de mediciones vimos que tuvo un corrimiento hacia frecuencias cercanas a $3,02 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$. Esto creemos que puede deberse a que, para finalizar el primer set de mediciones, colocamos el piezoeléctrico en nitrógeno líquido el cual se encuentra a una temperatura fuera del rango de trabajo dado por el fabricante. Creemos que el cambio tan abrupto de temperatura pudo haber modificado alguna característica del material relacionada con la frecuencia de resonancia, lo que explicaría por qué todas las mediciones del segundo set dan resonancias distintamente desplazadas de las primeras.

Las frecuencias de antiresonancia tenían, en el primer set, una tendencia de disminución al bajar la temperatura, pero sobre el segundo set de mediciones pareciera que estas frecuencias se mantienen aproximadamente constantes. Esto nuevamente puede llegar a ser una consecuencia del cambio abrupto de temperatura sobre el piezoeléctrico.

Finalmente, las mediciones tomadas para ambos sets reflejan un comportamiento que no se concuerda con resultados estudiados para piezoeléctricos cerámicos.

Bibliografía

- [1] Kenji Uchino. *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. Woodhead Publishing, 2012.
- [2] Richard B. Hetnarski. *Encyclopedia of Thermal Stresses*. Springer, 2014.

Apéndice

A. Primeras curvas de resonancia

En la Figura 10 se muestran las once mediciones realizadas para el primer set de mediciones, excluyendo la Figura 4. En el eje vertical izquierdo se corresponde la transferencia en función de la frecuencia, y en el eje derecho se ve la fase en función de la frecuencia. Cada una de las mediciones se identifica con su temperatura y color que se corresponde con los colores usados para las mediciones del primer set.

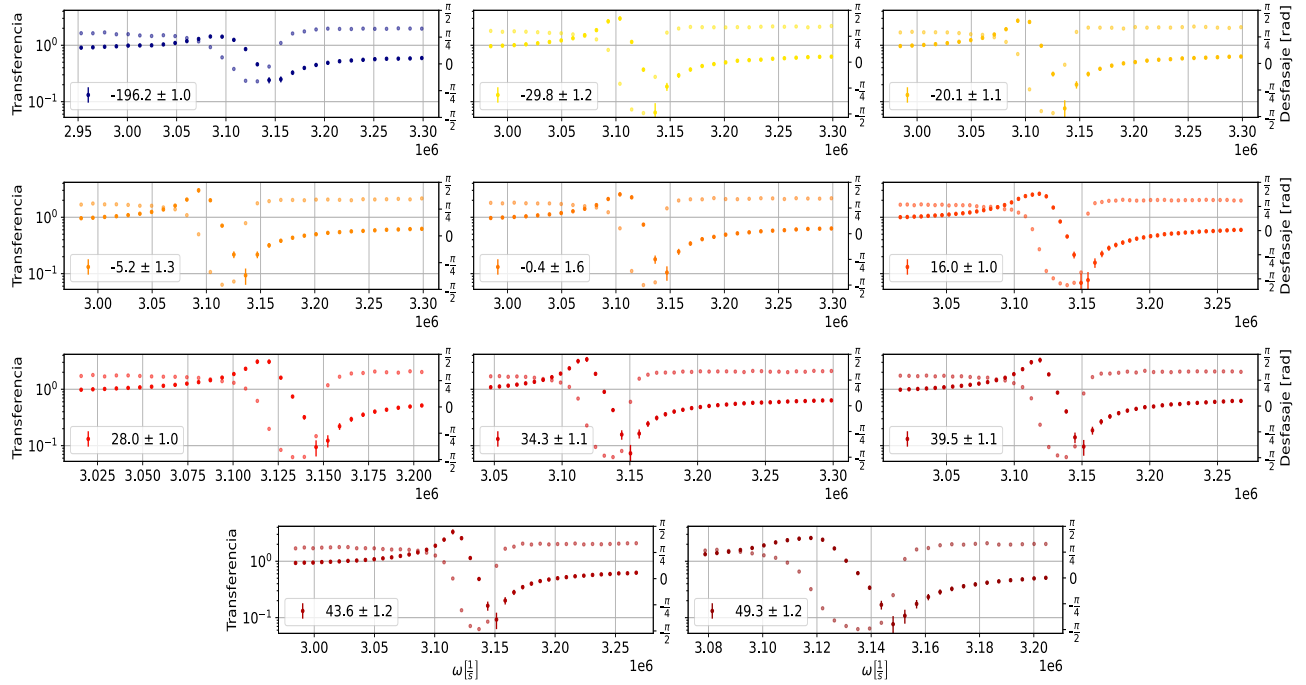


Figura 10: Se muestra para cada temperatura su transferencia en función de la frecuencia (eje lateral izquierdo) y su fase en función de la frecuencia (eje lateral derecho). En cada una se muestra su temperatura con su error correspondiente.

B. Segundas curvas de resonancia

En la Figura 11 se muestran diez mediciones realizadas para el segundo set de mediciones, excluyendo la Figura 7. En el eje vertical izquierdo se corresponde la transferencia en función de la frecuencia, y en el eje derecho se ve la fase en función de la frecuencia. Cada una de las mediciones se identifica con su temperatura y color que se corresponde con los colores usados para las mediciones del primer set.

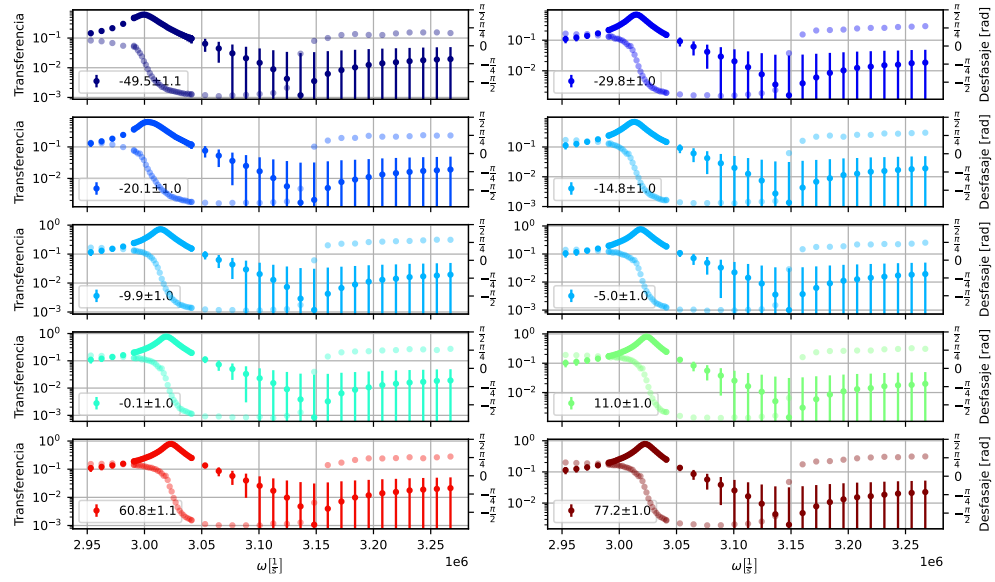


Figura 11: Se muestra para cada temperatura su transferencia en función de la frecuencia (eje lateral izquierdo) y su fase en función de la frecuencia (eje lateral derecho). En cada una se muestra su temperatura con su error correspondiente.