



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Análisis, Estudio y Medición del efecto del “Crosstalk” en
Arreglos de Transductores Ultrasónicos.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Ingeniero Eléctrico Electrónico
(Área: Ingeniería Electrónica)

PRESENTA

Miguel López Jiménez



Director: M. C. Israel Sánchez Domínguez
Codirector: Dr. Pedro Acevedo Contla

México, D.F., Ciudad Universitaria, Marzo de 2012.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

“Querer es una gran cosa,...
porque la Actividad y el Trabajo proceden generalmente de la Voluntad,
y el Trabajo casi siempre va acompañado del éxito.
Trabajo, Voluntad y Éxito llenan la vida de un hombre.
La Voluntad abre las puertas del éxito, brillante y feliz;
el Trabajo transpone esas puertas,
y al final del viaje el éxito corona los esfuerzos realizados”.

Louis Pasteur.

Dedicatoria

A mis padres Miguel y Herminia por su apoyo y confianza incondicionales; a mi hermana Erika por haber crecido juntos y a mi pequeña sobrina Evelyn, para que éste trabajo le sirva de estímulo en el largo, pero satisfactorio camino de la formación académica que esta apunto de comenzar.

Miguel

AGRADECIMIENTOS

A Dios por poner en mi vida a personas maravillosas y por el regalo de la vida que recibo día a día.

A mis padres Miguel y Herminia por haberme enseñado a valorar la vida, por su apoyo y consejos que me ayudaron para poder terminar la carrera.

A mi hermana Erika porque juntos compartimos nuestra niñez y fuimos compañeros de juegos.

A mi sobrina Evelyn por dejarme ser su compañero de juegos y porque me enseña que la vida hay que vivirla con una sonrisa.

A mi alma mater la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por dejarme ser uno de sus estudiantes siendo parte de su historia, y por haber contribuido con mi formación como profesionista, agradezco el apoyo otorgado durante la carrera a través de su programa de becarios PRONABES-UNAM, que sin duda fue un gran estímulo para poder concluir mis estudios.

A todos mis profesores que a lo largo de mi carrera como estudiante contribuyeron con mi formación personal, cultural y académica.

A mis amigos de la facultad de ingeniería porque juntos compartimos el camino de una carrera muy exigente, porque solo nosotros sabemos el trabajo y esfuerzo que nos costó; pero que al final es muy gratificante poder terminarla.

A mis directores de tesis Israel Sánchez y Pedro Acevedo por haberme dado la oportunidad de trabajar con ellos, por la paciencia y consejos que me brindaron para poder realizar mi tesis.

Al Ing. Fernando Molina y al Sr. Víctor Díaz, del Instituto de Investigaciones en Materiales; por el apoyo en la construcción de la base del arreglo.

Al programa DGAPA proyecto PAPIIT IN113610.

A todas aquellas personas que confiaron en mí; resultaría muy difícil poder nombrar a cada una de ellas, pero sus consejos me fueron de gran utilidad, por lo que siempre estaré agradecido.

Índice

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	VII
OBJETIVOS:.....	VIII
ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	IX
I. CONCEPTOS BÁSICOS	1
I.1. TRANSDUCTOR.....	2
I.2. TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS	2
I.3. ARREGLOS DE TRANSDUCTORES.....	4
I.4. ELEMENTO ACTIVO	6
I.5. EL FENÓMENO DEL “CROSSTALK”	7
II. METODOLOGÍA Y DESARROLLO	9
II.1. SIMULACIÓN EN COMSOL MULTIPHYSICS.....	11
II.2. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN EN COMSOL	14
II.3. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA.....	15
II.3.1. <i>Cerámicas</i>	15
II.3.2. <i>Base</i>	16
II.3.3. <i>Construcción del Sistema de Medición</i>	17
II.3.4. <i>Mediciones Experimentales</i>	19
II.3.4.1. “Crosstalk” Eléctrico	19
II.3.4.2. “Crosstalk” Mecánico.....	22
II.4. PATRÓN DE RADIACIÓN	23
II.4.1. <i>Patrón de Radiación con Matlab</i>	24
II.4.2. <i>Patrón de Radiación con HP VEE 4.0</i>	25

III.	RESULTADOS.....	27
III.1.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN COMSOL	28
III.2.	MEDICIONES EXPERIMENTALES	31
III.2.1.	<i>Mediciones del “Crosstalk” eléctrico</i>	<i>31</i>
III.2.1.1.	“Crosstalk” eléctrico por configuración medido sobre la base de Cobre	31
III.2.1.1.1.	Configuración 1.....	32
III.2.1.1.2.	Configuración 2.....	35
III.2.1.1.3.	Configuración 3.....	38
III.2.1.1.4.	Configuración 4.....	41
III.2.1.1.5.	“Crosstalk” eléctrico total.....	44
III.2.2.	<i>Mediciones del “Crosstalk” Mecánico</i>	<i>45</i>
III.2.2.1.	“Crosstalk” Mecánico en Cobre	46
III.2.3.	<i>Comparación entre el “Crosstalk” Eléctrico y Mecánico en Cobre</i>	<i>50</i>
III.3.	PATRÓN DE RADIACIÓN	51
III.3.1.	<i>Patrón de Radiación obtenido en Matlab</i>	<i>51</i>
III.3.2.	<i>Patrón de Radiación usando el HP VEE</i>	<i>54</i>
IV.	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA.....	60
	APÉNDICES	63
A	CERÁMICA COMERCIAL PIEZOELÉCTRICA PIC 255.....	64
B	CONDUCTIVE EPOXY CW2460	69
C	PROPIEDADES ACÚSTICAS Y MECÁNICAS DEL COBRE	71
	ANEXOS.....	72
A	PROGRAMAS EN MATLAB PARA EL ANALISIS DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS DE LA SIMULACIÓN EN COMSOL	73
B	PROGRAMA EN MATLAB PARA EL ANALISIS DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS DE LAS MEDICIONES DEL “CROSSTALK” ELÉCTRICO EN LA BASE DE COBRE	76
C	PROGRAMA EN MATLAB PARA GENERAR EL CAMPO ACÚSTICO EN UN ARREGLO DE ELEMENTOS PIEZOELÉCTRICOS CON Y SIN LA PRESENCIA DEL “CROSSTALK”	79
D	PROGRAMA EN MATLAB PARA EL ANALISIS DE LAS GRÁFICAS OBTENIDAS DE LAS MEDICIONES DEL “CROSSTALK” MECÁNICO EN LA BASE DE COBRE.	81

Introducción

En la actualidad los transductores ultrasónicos utilizados en medicina juegan un papel fundamental dentro del diagnóstico, sin embargo su desempeño está en función de los elementos con los que se construyen y durante el proceso de construcción del transductor, se pueden presentar fenómenos que afecten el desempeño del mismo, como por ejemplo el fenómeno conocido como “Crosstalk”.

El “Crosstalk” es un problema que se presenta en los transductores matriciales piezoeléctricos, el cual consiste básicamente en la excitación de un elemento por elementos contiguos, afectando el desempeño de un transductor al grado que puede distorsionar el haz de radiación que genera el transductor o incluso generar interferencias en el haz emitido o atenuar al haz emitido. Éste fenómeno se presenta principalmente en matrices de fase (*array's*), debido a la gran proximidad entre los elementos así como a sus dimensiones, por su naturaleza puede ser mecánico o eléctrico.

Por eso es importante contar con una metodología que nos permita medir y cuantificar la magnitud del fenómeno, ya que de esta forma se podrá conocer de manera más clara cuanto y de qué magnitud puede afectar el “Crosstalk” a un transductor y así poder establecer técnicas para su disminución.

El interés del Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales y Automatización (DISCA) del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), y de varios grupos de investigación en el mundo es poder cuantificar este fenómeno para generar formas preventivas al momento de realizar la construcción de un transductor, o por lo menos saber de qué orden de magnitud es, para poder compensar el daño que provoca.

Objetivos:

- A partir de simulaciones previamente realizadas mediante el Método de Elementos Finitos (MEF), cuantificar el “Crosstalk” eléctrico que se produce en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas de 3x3 elementos; la cual puede ser escalada a arreglos de un mayor número de elementos o de configuraciones más complejas.
- Comprobar de manera experimental dichas mediciones, utilizando al Cobre como material para la construcción de una base de 2x3 elementos y cuatro cerámicas piezoeléctricas distribuidas en cuatro configuraciones, para medir en varios puntos sobre la base el “Crosstalk” eléctrico, considerando que eléctricamente hay varios factores que producen el “Crosstalk” en un arreglo.
- Medir de manera experimental el “Crosstalk” mecánico que se produce en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas de 2x3, la cual puede ser escalada a arreglos de mayor número de elementos o de configuraciones más complejas.
- Obtener el patrón de radiación que se genera en un arreglo de elementos piezoeléctricos, utilizando los simuladores Matlab y HP VEE del acrónimo *Hewlett Packard’s Visual Engineering Environment*.
- Comparar los resultados simulados contra los experimentales a fin de establecer los factores causantes que originan la existencia del “Crosstalk” y poder plantear formas preventivas a la hora de construir un transductor para minimizar la existencia del “Crosstalk”.

Estructura de la Tesis

El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro capítulos; en el capítulo uno se exponen temas que abarcan principios básicos de física sobre los transductores piezoeléctricos, los tipos de transductores y finalmente se presenta el fenómeno en estudio conocido como “Crosstalk”.

En el capítulo dos se detalla la metodología y el desarrollo que se siguió para poder cuantificar el fenómeno del “Crosstalk” eléctrico, primero a partir de simulaciones previamente realizadas y posteriormente en forma experimental, tanto en su naturaleza eléctrica como mecánica; terminando con la obtención del patrón de radiación desarrollado en Matlab y en el programa comercial HP VEE (*Hewlett Packard’s Visual Engineering Environment*).

En el capítulo tres se presenta los resultados obtenidos de la simulación en COMSOL MULTIPHYSICS el cual emplea el método de los elementos finitos, obteniendo un valor cuantitativo del “Crosstalk”. Se exponen las mediciones experimentales del “Crosstalk” eléctrico y mecánico medido sobre la base de Cobre, además de incluir el patrón de radiación generado por un arreglo, utilizando dos simuladores como son Matlab y HP VEE.

Dentro del capítulo cuatro se describen y discuten los principales resultados del trabajo, después de comparar los resultados simulados contra los resultados experimentales. Se resumen las principales aportaciones de la tesis y se presentan las posibles vías de investigación futura.

En la sección de apéndices se encuentra la hoja de datos de la cerámica piezoeléctrica empleada; del pegamento *Epoxy* y las propiedades acústicas y mecánicas del material utilizado como base.

En el último apartado corresponde a la sección de anexos, en donde se exponen y describen brevemente los programas que se desarrollaron a lo largo del trabajo para cuantificar el “Crosstalk” y para analizar los resultados experimentales.

Capítulo I

Conceptos Básicos

El desempeño de los transductores ultrasónicos está en función de los elementos con los que se construyen; sin embargo, durante el proceso de construcción del transductor, se pueden presentar fenómenos que afecten el desempeño del mismo, como el llamado “Crosstalk”, que es un problema que se presenta en los transductores matriciales piezoeléctricos.

Para poder entender cómo se genera este fenómeno y los efectos que causa en el desempeño de los transductores, se describirán en este capítulo conceptos acerca de los transductores matriciales, los elementos activos y su forma de vibración; para finalmente presentar el efecto del “Crosstalk” los factores por los cuales se hace presente en los transductores y los efectos que genera.

I.1. Transductor

Se denomina transductor a todo dispositivo o sistema que convierte una señal física de un tipo en una señal física de otro tipo; en un sistema electrónico, el transductor es el componente que convierte una señal física de entrada en una salida de tipo eléctrico, generalmente intensidad, voltaje o impedancia, de forma que sea una réplica lo más perfecta posible de la magnitud física, en la figura I.1.1 se presenta el diagrama del principio de operación de un transductor.

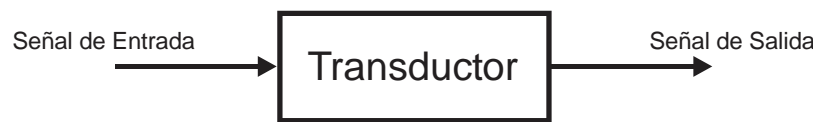


Figura I.1.1. Esquema con el proceso de operación de un transductor.

De esta definición se puede deducir la importancia que tienen los transductores en aplicaciones científicas y técnicas, ya que gracias a ellos es posible aplicar la electrónica a la medida de magnitudes de todo tipo; pero también la complejidad que implica su tratamiento, puesto que en la conversión de una magnitud en otra se utilizan los más variados fenómenos de la Física [1].

I.2. Transductores Ultrasónicos

En el año de 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron una característica inusual de ciertos materiales cristalinos: cuando los cristales son sometidos a una fuerza mecánica estos adquieren una polarización eléctrica. La tensión y la compresión generaron voltajes de polaridad opuesta y proporcionales a la fuerza aplicada. Posteriormente fue confirmada la relación inversa: si uno de estos cristales se expone a un campo eléctrico este genera una deformación en proporción a la fuerza del campo. Estos comportamientos fueron clasificados como efecto piezoeléctrico y efecto piezoeléctrico inverso, respectivamente, derivados de la palabra griega *piezein* que significa presionar o apretar [2].

Las ondas sonoras producidas por el experimento realizado por Jacques y Pierre Curie fueron de alta frecuencia; en el rango denominado como ultrasonido, el cual se define como un tren de ondas mecánicas -generalmente longitudinales-, originadas por la vibración de un cuerpo elástico y propagadas por un medio material, cuyo rango de frecuencias supera la del sonido audible por el humano, aproximadamente de 20 kHz.

La clasificación que existe de acuerdo al rango de frecuencias es el siguiente:

- Las frecuencias que se encuentran por debajo de los 20 Hz se denomina infrasonido.
- El sonido audible se encuentra entre 20Hz y 20kHz
- Las frecuencias superiores a 20kHz se denomina ultrasonido.

Entonces podemos decir que un transductor ultrasónico es un dispositivo que convierte energía eléctrica en mecánica en forma de ultrasonido y viceversa, cuando sus elementos piezoeléctricos son excitados por voltaje. En la figura I.2.1 se puede observar los elementos que conforma a un transductor ultrasónico simple [4].

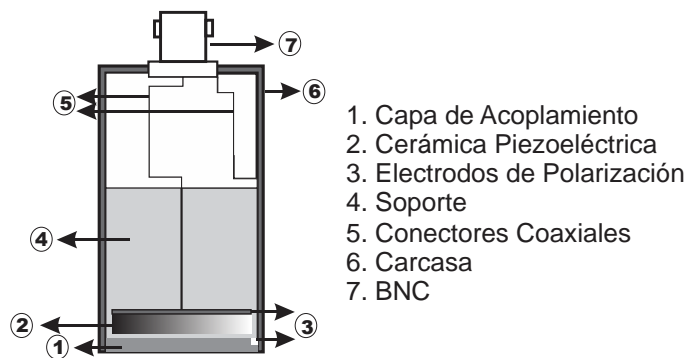


Figura I.2.1. Transductor Ultrasónico

Un sistema piezoeléctrico puede ser construido para prácticamente cualquier aplicación; sin embargo encajan para cuatro categorías generales: los generadores piezoeléctricos, sensores, actuadores piezoeléctricos y transductores, para nuestro caso este último es la aplicación que nos interesa.

I.3. Arreglos de Transductores

El transductor con un solo elemento piezoeléctrico no es la única configuración que se puede encontrar; dentro de la industria podemos encontrar arreglos con elementos piezoeléctricos distribuidos de distintas formas; a continuación se muestran algunas de las formas en que se pueden presentar los arreglos.

Los arreglos distribuidos de forma matricial se muestran en la figura I.3.1, en donde se observa la forma de distribución que se pueden presentar; de forma lineal y matricial en 2-D y 1.5-D [6], donde la distancia entre los elementos es un factor importante para colocar un gran número de elementos y la distancia entre ellos debe de ser mínima.

Este es el arreglo más común que se puede encontrar; es fácil su fabricación y montaje, pero requiere de un gran espacio horizontal dependiendo del número de elementos, el cual puede estar entre 16 y 256.

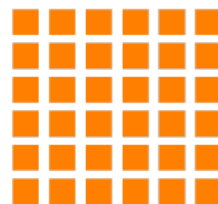
Arreglo lineal



a)

En esta configuración los elementos se distribuyen de forma matricial de $m \times n$ elementos y todos con las mismas dimensiones, la forma matricial ayuda a administrar el espacio en donde se va a colocar el arreglo.

Arreglo en 2D



b)

En la configuración en 1.5D los elementos están distribuidos en forma matricial de $m \times n$ elementos, sin embargo las dimensiones de las PZT son distintas de acuerdo a la fila en la que se encuentran generando una configuración en espejo.

Arreglo en 1.5D



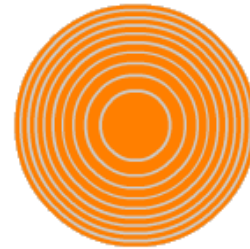
c)

Figura I.3.1. Arreglos matriciales a) Arreglo Lineal b) Arreglo en 2D y c) Arreglo en 1.5D

También podemos encontrar arreglos anulares y circulares; en la figura I.3.2 se muestra el arreglo anular y anular en 2D, además del arreglo circular [6].

Arreglo anular

En la configuración anular todos los elementos se encuentran distribuidos en forma concéntrica y con un número de n -elemento, estos son los que definirán el espacio que utilice el arreglo.



a)

Arreglo anular en 2D

También se tienen arreglos anulares en 2D, de $m \times n$ elementos y en donde las dimensiones varían de a cuerdo a la hilera a la que pertenece y el espacio que ocupará dependerá de las filas que tenga el arreglo anular.



b)

Arreglo circular

El arreglo circular es un arreglo lineal cerrado que forma una circunferencia, es de n -elementos todos con la misma longitud, que es la que determinará el espacio que ocupará. El ancho de cada elemento es distinto, de un lado es más estrecho para poder formar el arreglo en forma de círculo.



Figura I.3.2. a) Arreglo anular b) Arreglo anular en 2D y c) Arreglo circular.

I.4. Elemento Activo

En el siglo XX las cerámicas piezoeléctricas se basaron en óxidos metálicos y otros materiales fabricados por el hombre, permitiendo a los diseñadores emplear el efecto piezoeléctrico y el efecto piezoeléctrico inverso en nuevas aplicaciones. Estos materiales generalmente son físicamente fuertes y químicamente inertes, y son relativamente baratos de fabricar. La composición, la forma y dimensiones de una cerámica piezoeléctrica se puede adaptar para satisfacer las necesidades de un propósito específico.

Las cerámicas fabricadas a partir de formulaciones de Zircanato Titanato de Plomo (*PZT*) presentan una mayor sensibilidad a mayores temperaturas de operación, relativa a cerámica de otras composiciones. En la actualidad las cerámicas fabricadas de formulaciones *PZT* son los elementos que más se utilizan en el efecto piezoeléctrico [2].

A continuación se presenta en la figura 1.4.1 los modos de vibración de algunos tipos de cerámicas piezoeléctricas [7].

Axis	Polarization Direction	Applied Field: Voltage Output	Mode of Vibration: Displacement	Axis	Polarization Direction	Applied Field: Voltage Output	Mode of Vibration: Displacement
Plate			length or transverse (l or w) 	Rod			
Disc			radial (r) 	Ring			length (l) radial (r)
Ring			radial (r) 	Cylinder Wall Electrode			length (l) radial (r)
Bar			length (l) 	Plate Bender			

Figura I.4.1. Figura con los modos de vibración de algunas cerámicas piezoeléctricas.

De las cerámicas piezoeléctricas (*PZT*) nos interesa los modos de vibración que presentan, y en específico la vibración que se genera de forma lateral al instante de excitar el elemento, ya que esta vibración es la que provoca la manifestación del efecto conocido como “Crosstalk”.

I.5. El fenómeno del “Crosstalk”

En la actualidad los transductores ultrasónicos utilizados en medicina juegan un papel fundamental dentro del diagnóstico, su desempeño está en función de los elementos con los que se construyen. Sin embargo, durante el proceso de construcción del transductor se pueden presentar fenómenos que afecten el desempeño del mismo.

Debido a la deficiencia en el aislamiento tanto mecánico como eléctrico, se presenta el fenómeno conocido como “Crosstalk”, el cual se manifiesta principalmente en matrices de fase cuya principal característica es la gran proximidad entre los elementos, y el cual afecta el desempeño de los transductores. El “Crosstalk” produce una interacción no deseada entre los elementos piezoeléctricos de la matriz por su modo lateral de vibración, provocando radiaciones parásitas -de modo lateral- y su naturaleza puede ser mecánica o eléctrica.

El “Crosstalk” mecánico se produce principalmente de la vibración lateral de los elementos contiguos, originando la propagación de ondas acústicas a través del soporte de los elementos y del material con que se rellena la separación entre ellos.

El “Crosstalk” eléctrico se debe a la distancia existente entre las pistas del material conductor separadas por un dieléctrico, manifestándose a través del acoplamiento capacitivo entre elementos y las conexiones eléctricas así como de la emisión electromagnética.

Las dimensiones de los elementos, la posición de los mismos y hasta los modos de vibración de los materiales piezoeléctricos, son los factores que provocan el “Crosstalk” en un arreglo matricial; la figura I.5.1 ejemplifica el “Crosstalk” mecánico y eléctrico que se genera en un arreglo de elementos piezoeléctricos [4].

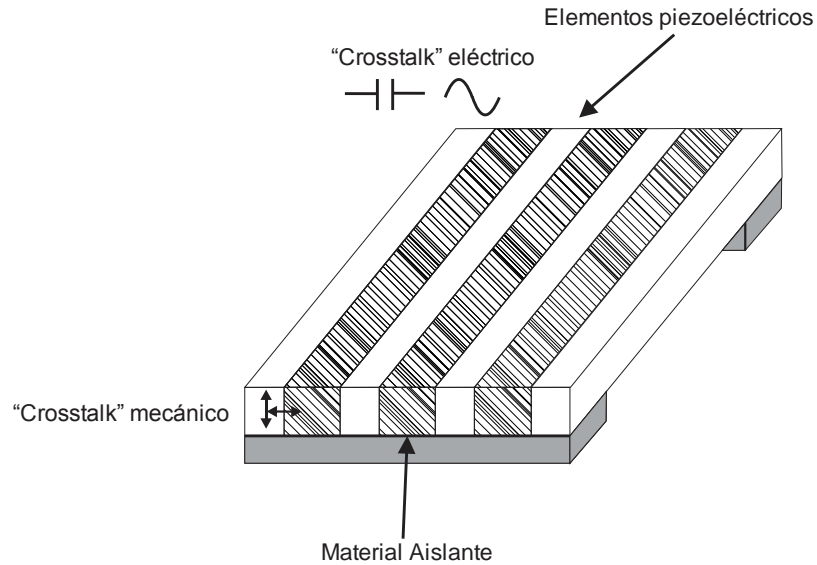


Figura I.5.1. Formas de interacción entre los elementos de un arreglo que contribuyen para el fenómeno del “Crosstalk” mecánico y eléctrico.

Capítulo II

Metodología y Desarrollo

En este capítulo se presenta la metodología que se siguió para cuantificar y analizar las mediciones del fenómeno del “Crosstalk” en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas. A continuación se describe cada uno de los puntos de la metodología que se siguieron para desarrollar el presente trabajo.

- I. Se inició el trabajo partiendo de una simulación previamente realizada en el paquete de simulación COMSOL el cual usa el Método de Elementos Finitos (MEF) [8], de la cual se obtuvieron gráficas del “Crosstalk” eléctrico que se genera en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas de 3x3 elementos.
- II. Con la obtención de estas gráficas se desarrolló un programa en Matlab para analizar los datos y obtener un valor cuantitativo del “Crosstalk” eléctrico generado en el arreglo, primero por cada gráfica y al final dar un valor total del “Crosstalk” en el arreglo.

- III. Se verificó de manera experimental la presencia del “Crosstalk” eléctrico y mecánico en un arreglo; para esto se construyó una base de 2x3 elementos, empleando como material al Cobre.

Posteriormente se obtuvo la respuesta en su modo lateral de vibración de las cuatro cerámicas empleadas; midiendo en diferentes puntos del arreglo y cambiando la posición de las cerámicas para formar cuatro configuraciones; con la obtención de las mediciones se desarrolló un programa en Matlab para analizar los resultados obtenidos.

Para obtener el patrón de radiación que se genera en un arreglo de 3x3 elementos se desarrolló un programa en Matlab que generó el patrón con y sin el efecto del “Crosstalk” basados en un trabajo en donde se simula el “Crosstalk” como un efecto capacitivo [9]. Adicionalmente de desarrollo una simulación empleando el paquete de simulación HP VEE, en donde se genera el patrón de radiación de un arreglo de 3x3 elementos, basados en un trabajo previo desarrollado por von Krüger [10].

- IV. Finalmente se compararon los resultados simulados contra los experimentales. Para ésto se desarrolló un programa en Matlab para analizar los datos, tanto experimentales como simulados, con y sin la presencia del “Crosstalk”, para poder determinar los factores causantes del fenómeno del “Crosstalk” en los arreglos que se estudiaron.

II.1. Simulación en COMSOL MULTIPHYSICS

A partir de una simulación previamente realizada en el Departamento de Ingeniería de Sistemas Computacionales y Automatización (DISCA) del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF), y a través de un paquete de simulación comercial COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 [8], se procedió a cuantificar el “Crosstalk” eléctrico que se genera en un arreglo de 3x3 elementos.

De la simulación se obtuvo el “Crosstalk” eléctrico que se genera en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas, en la figura II.1.1 se muestra los resultados obtenidos de la simulación y en donde se aprecia que el “Crosstalk” se manifiesta en diferentes intensidades.

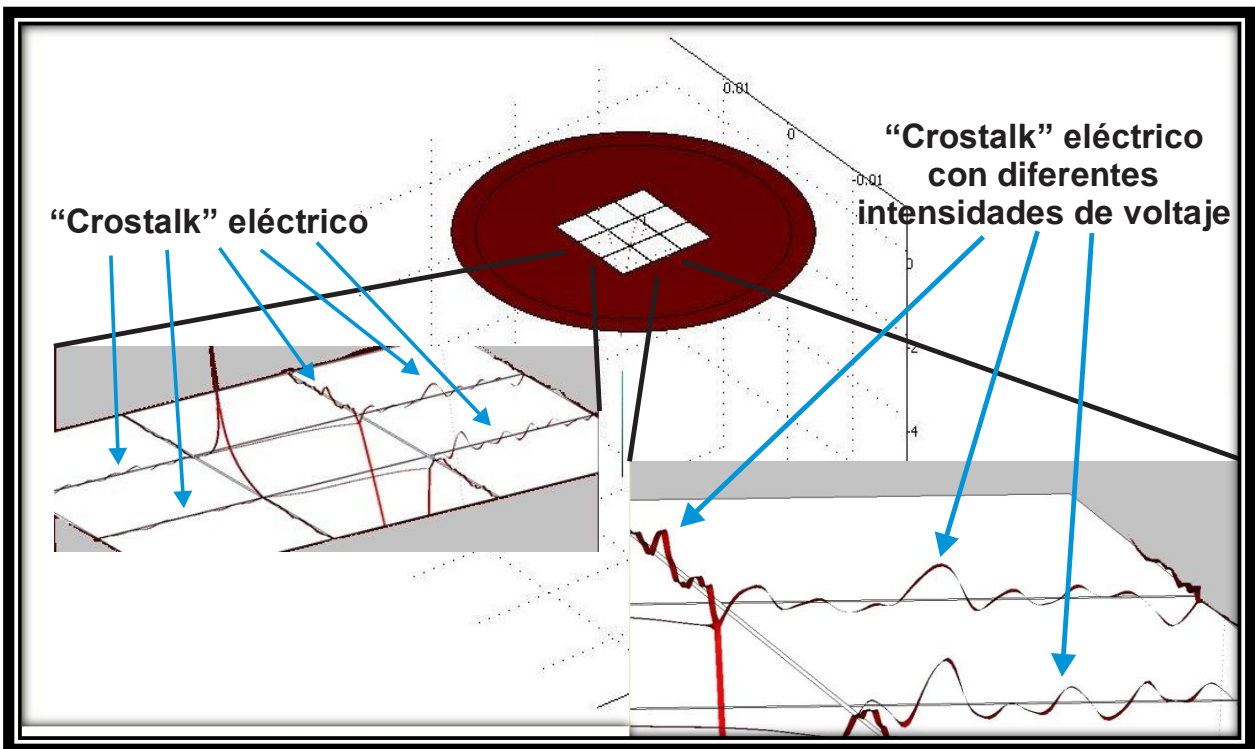


Figura II.1.1. Simulación de “Crosstalk” eléctrico en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas de 3x3 elementos.

Para obtener las gráficas en donde hay presencia de “Crosstalk” eléctrico en el arreglo, se seleccionó la opción *2D surface plot* del *toolbox Postprocessing*, como se muestra en la figura II.1.2.

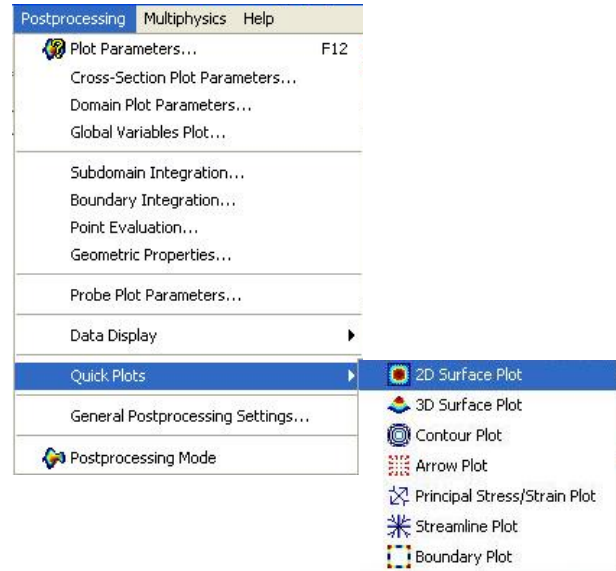


Figura II.1.2. Selección a 2D.

En la figura II.1.3 se muestra la simulación en una vista 2D. Con la opción *Line* se seleccionó la zona de interés en donde hay presencia del “Crosstalk”; se identificaron 8 zonas en donde se presenta el fenómeno.

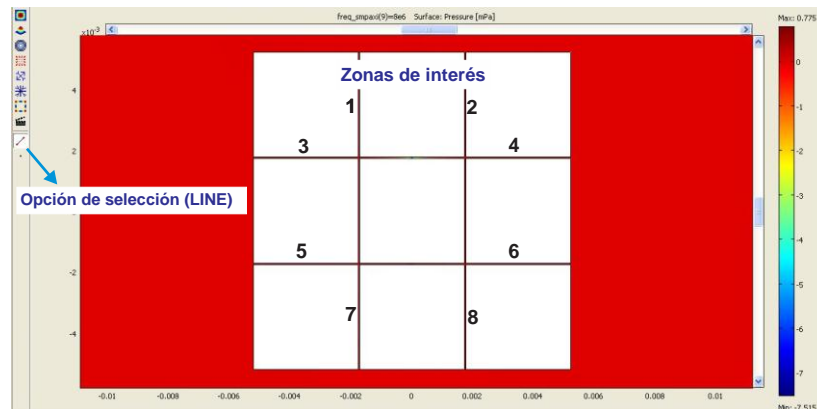


Figura II.1.3. Zonas en donde hay presencia de “Crosstalk”.

Al seleccionar alguna de las zonas en donde hay presencia del “Crosstalk” se selecciona la opción *Cross-Section Plot Parameters* dentro del *toolbox Postprocessing* y en la pestaña *Line/Extrusion* se selecciona *Electric Potential* para visualizar la gráfica de Potencial Eléctrico que se genera en esa zona debido al fenómeno del “Crosstalk”, la forma de selección se muestra en la figura II.1.4.

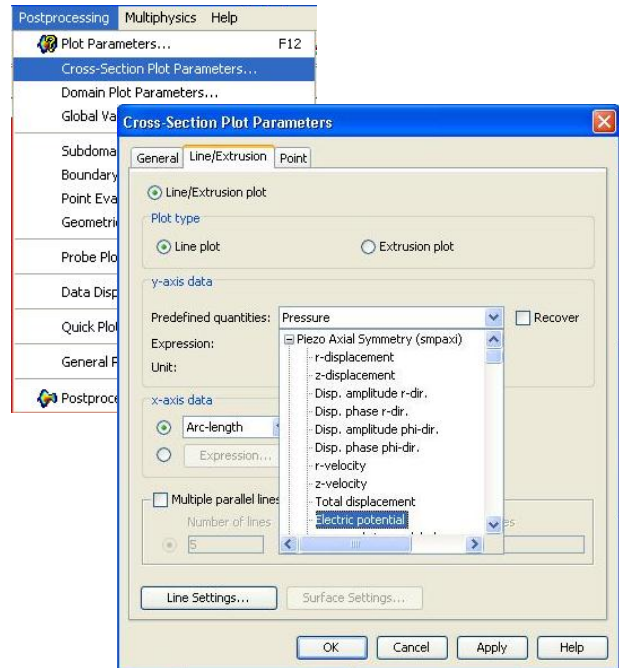


Figura II.1.4. Selección de Potencial Eléctrico.

Con ésto se visualiza la gráfica de Potencial Eléctrico de la sección seleccionada que representa el “Crosstalk” eléctrico que se genera entre los elementos; se adquirieron ocho gráficas similares y con la opción de ASCII se exportó cada una para posteriormente ser analizadas en Matlab. En la figura II.1.5 se muestra la ventana de una de las gráficas del “Crosstalk” así como la selección para exportarla.

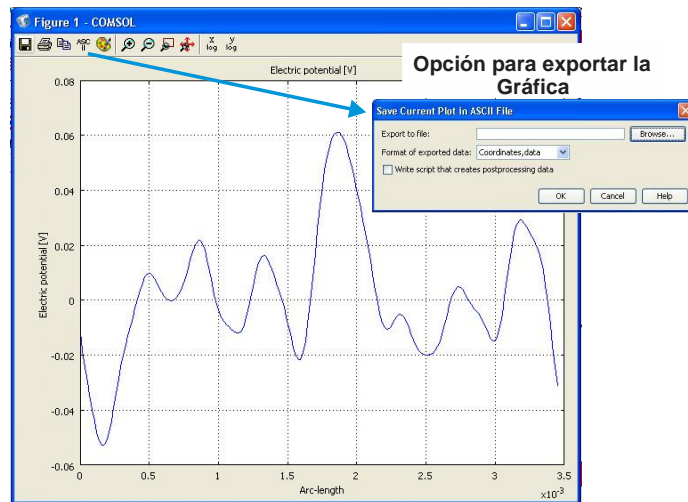


Figura II.1.5. Gráfica equivalente al “Crosstalk” eléctrico.

II.2. Análisis de los datos obtenidos de la simulación en Comsol

Con la adquisición de las 8 gráficas se desarrolló un programa en Matlab para cuantificar el valor del “Crosstalk” en cada par de elementos del arreglo y finalmente dar un valor del “Crosstalk” eléctrico total en el arreglo.

Se importaron los datos obtenidos de la simulación en COMSOL a Matlab y cada gráfica se analizó por semi-ciclos obteniendo valores pico-pico que al final son sumados para dar un valor de potencial eléctrico para cada gráfica y al final un valor del “Crosstalk” total del arreglo.

En la tabla II.2.1 se presenta la parte del código que implementa el análisis en semi-ciclos, se ejecuta en un ciclo for que realiza el barrido para todos los puntos adquiridos, el primer par de if's anidados se encarga de localizar los picos máximos positivos y el segundo par de if's determina los picos mínimos negativos para después dar los valores pico-pico y al final realizar la suma total.

Tabla II.2.1. Código en Matlab que cuantifica el valor del “Crosstalk” en el arreglo.

```

for i=1:length(TY)
    if TY(i)<0
        if TY(i+1)>0

            while TY(i+j)>0

                mp=max(mp,TY(i+j)); %obtiene el max-max
            end

        end

        if TY(i)>0
            if TY(i+1)<0

                while TY(i+j)<0

                    mp=min(mp,TY(i+j)); %obtiene eel min-min
                end

            end

        end
    end
end

```


II.3. Implementación Física.

Para construir el sistema de medición se siguieron una serie de procesos, a continuación se describe cada uno de ellos empezando con la selección de las cerámicas piezoeléctricas y su acondicionamiento para poder excitarlas. Posteriormente se presenta las características con que fue construida la base, así como su representación física, siguiendo con la construcción del sistema con el cual se adquirieron las mediciones del “Crosstalk” y finalmente se presenta la forma en que se midió el “Cosstalk” eléctrico y después el “Crosstalk” mecánico.

II.3.1. Cerámicas

La cerámica seleccionada para realizar las mediciones fue la PIC255 (ver Apéndice A) del fabricante *PI ceramic*, con una frecuencia de trabajo a 8MHz, cuadrada de 4mm y con un espesor de 0.22mm, en la figura II.3.1.1 se muestran las dimensiones de una de las cerámicas utilizadas así como su representación física.

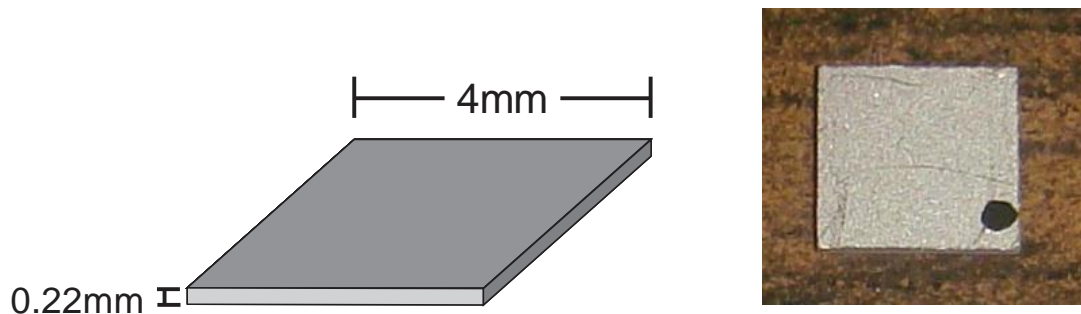


Figura II.3.1.1. Dimensiones y cerámica real empleada.

Se utilizaron 4 cerámicas con las mismas características anteriormente descritas. Para poder excitarlas se soldaron dos cables para cada cerámica procurando que los puntos de soldadura fueran lo más fino posible; cada cable fue soldado en cada una de las caras de las cerámicas y sobre el mismo costado para garantizar la mayor área de trabajo de la cerámica; en la figura II.3.1.2 se representa el área de trabajo después de soldar los electrodos y la construcción real para una de las cerámicas.

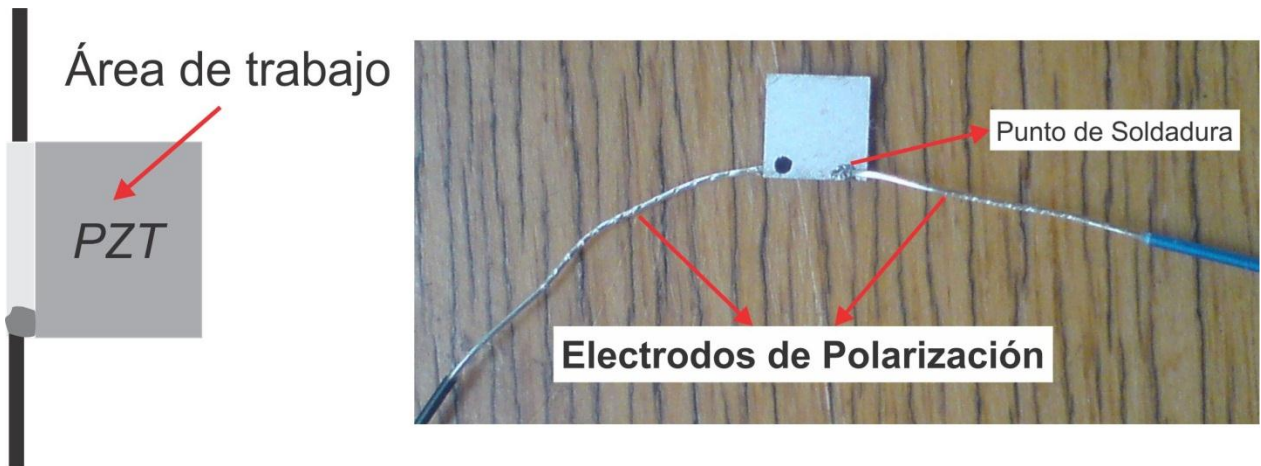


Figura II.3.1.2. Cerámica Piezoeléctrica con sus electrodos.

II.3.2. Base

Para realizar la parte experimental se fabricó una base empleando como material al Cobre. Las dimensiones con las que fue construida la base se aprecian en el siguiente diagrama en donde se observa que el arreglo es de 2x3 elementos.

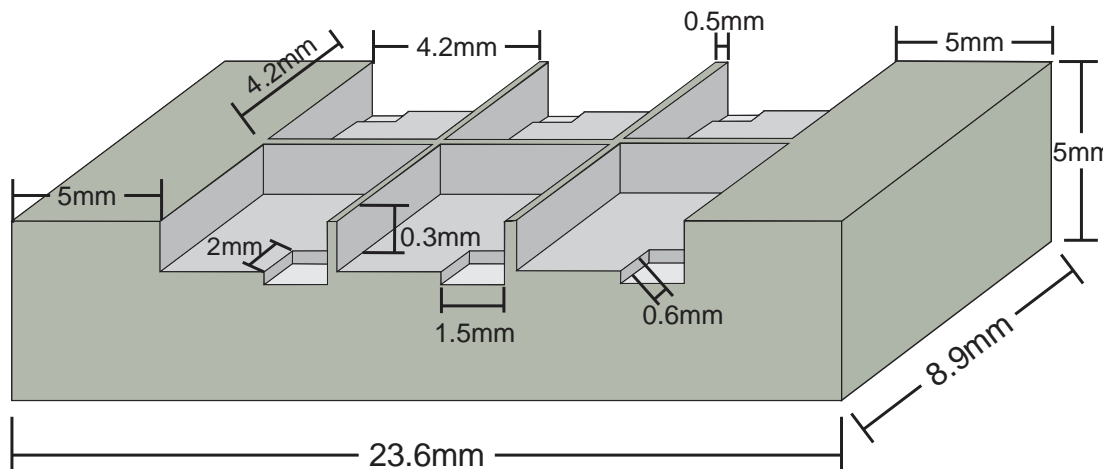


Figura II.3.2.1. Dimensiones de construcción de la base.

La representación física de la base se muestra en la figura II.3.2.2. En la parte de resultados se comprobará si el material es un factor que influya en la propagación del “Crosstalk”.

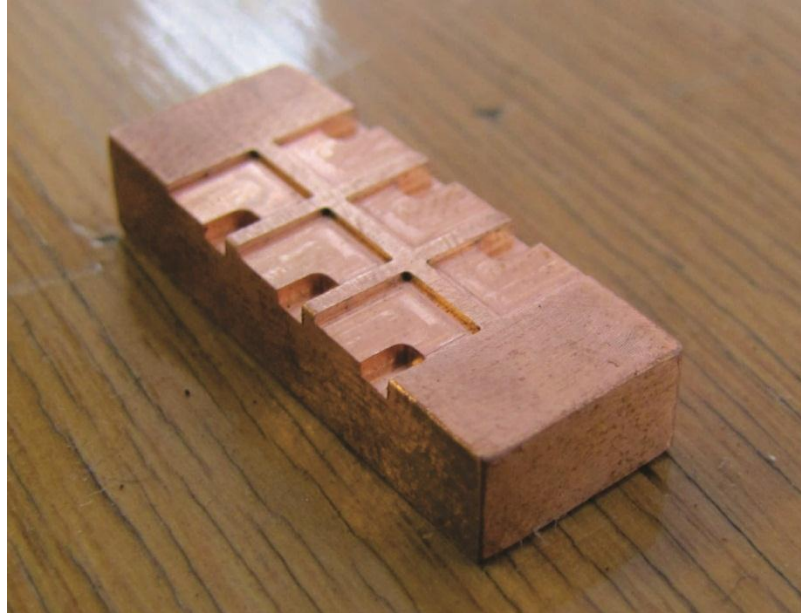


Figura II.3.2.2. Base construida para medir el “Crosstalk” eléctrico.

II.3.3. Construcción del Sistema de Medición

Una vez que las cuatro cerámicas tienen soldados sus electrodos se procedió a ensamblar el sistema de medición. Para excitar las cerámicas el electrodo positivo se conecta al pulser y los electrodos negativos se fijaron en un punto en común -parte trasera de la base de Cobre-, para poder fijar los electrodos negativos se utilizó *Conductive Epoxy CW2460* (ver Apéndice B), el cual es un pegamento a base de sustrato de plata que al endurecer garantiza la conductividad.

En el siguiente esquema se muestra el *Conductive Epoxy CW2460* así como el pegado de los electrodos en la base de Cobre.

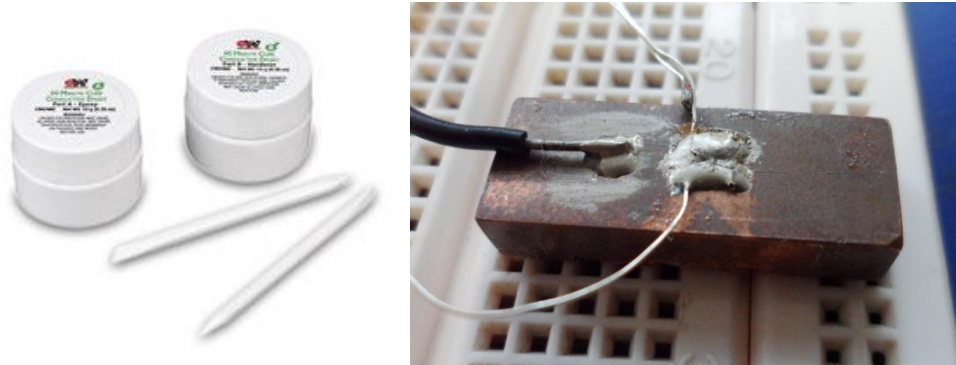


Figura II.3.3.1. *Conductive Epoxy CW2460* y el pegado final de los electrodos negativos.

El sistema de medición se concluyó montando la base en una placa *protoboard*; fijando los electrodos positivos en la placa para evitar desplazamientos no deseados en la base y en las cerámicas; dejando conexiones para el pulser y el osciloscopio.

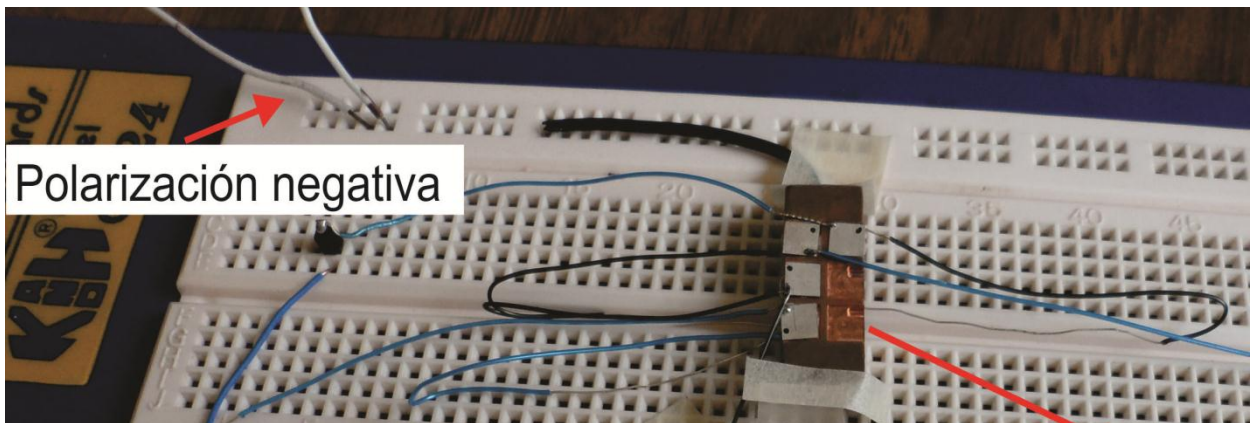


Figura II.3.3.2. Sistema para realizar las mediciones de “Crosstalk” eléctrico.

II.3.4. Mediciones Experimentales

Debido a que la naturaleza del “Crosstalk” es tanto eléctrica como mecánica se describe a continuación la forma en que se realizaron las mediciones para el “Crosstalk” eléctrico y posteriormente para el “Crosstalk” mecánico.

II.3.4.1. “Crosstalk” Eléctrico

Debido a que las cuatro cerámicas son insuficientes para poder montar el arreglo de 2x3 elementos, fueron utilizadas cuatro configuraciones para observar si influye la posición de las cerámicas en la propagación del “Crosstalk”. En la figura II.3.4.1.1 se encuentran representadas las cuatro configuraciones empleadas en las base para medir el “Crosstalk” eléctrico.

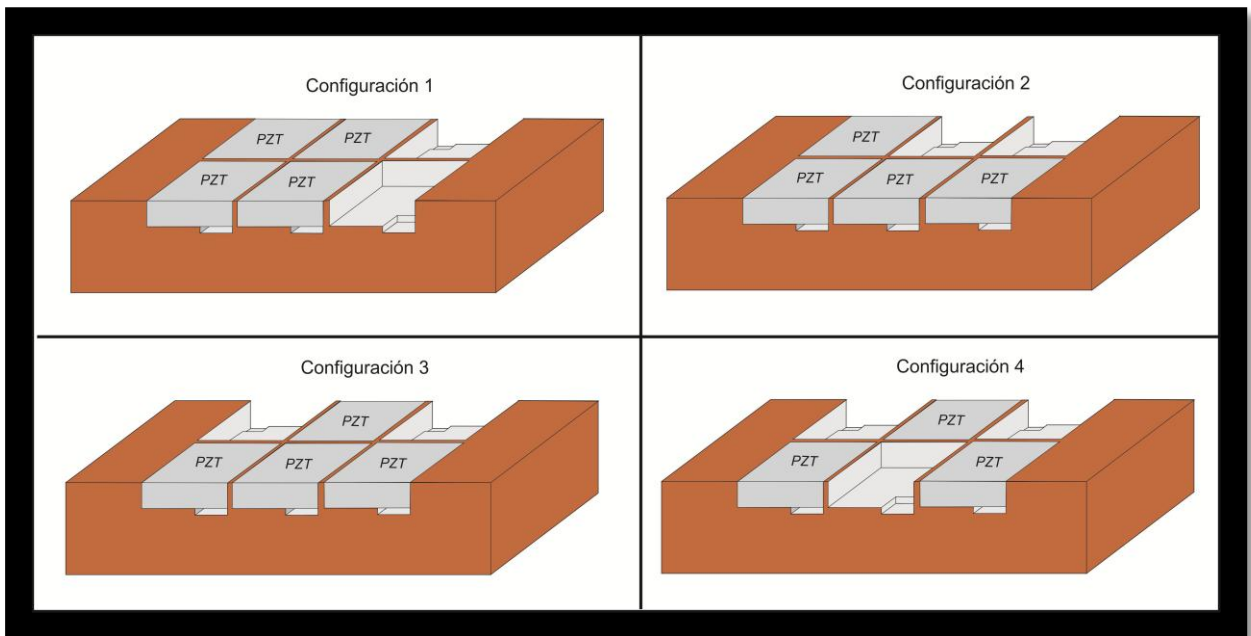


Figura II.3.4.1.1. Configuraciones empleadas para realizar las mediciones.

En la figura II.3.4.1.2 se muestran las cuatro configuraciones establecidas en la base de Cobre.

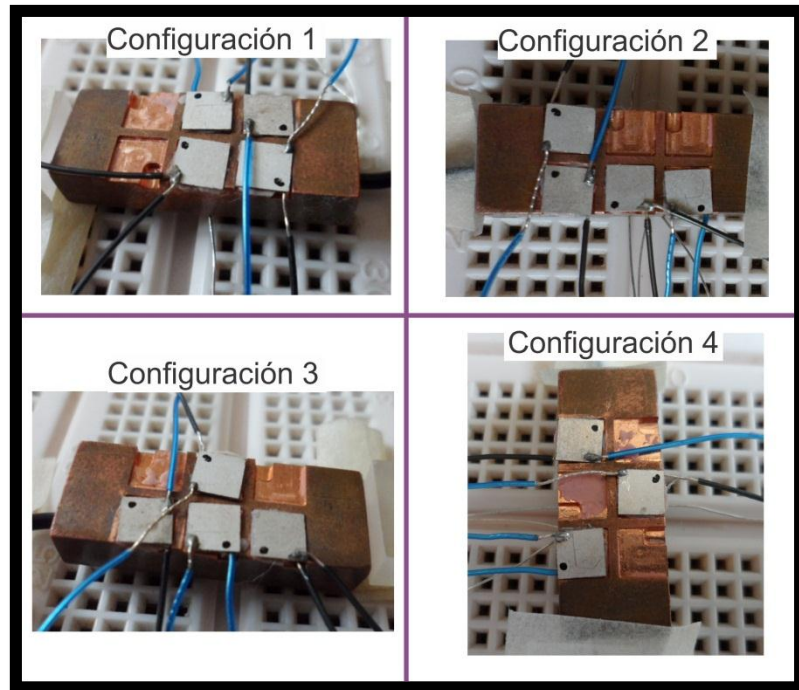


Figura II.3.4.1.2. Configuraciones en la base.

Una vez colocadas las cerámicas en la base, se aplicó un pulso eléctrico a cada una de las PZT's, empleando un PULSER, procediendo después a realizar la medición con un osciloscopio digital Tektronics (modelo DPO3000), en donde se cuantificó las vibraciones laterales que se producen entre las PZT's vecinas. En la figura II.3.4.1.3 se presenta el diagrama de cómo se realizaron las mediciones experimentales del "Crosstalk" eléctrico [11].

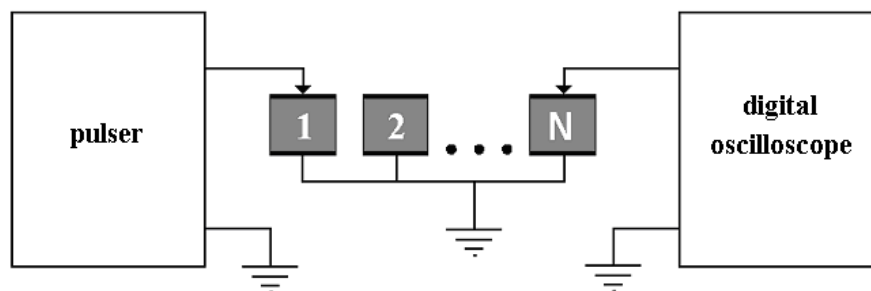


Figura II.3.4.1.3. Diagrama para la medición del "Crosstalk" eléctrico

Cuando el sistema de medición estuvo correctamente conectado y las cerámicas excitadas, se tomaron las mediciones del “Crosstalk”. Para la configuración 1 se consideraron 6 puntos de medición y para las configuraciones 2, 3 y 4 se consideraron 7 puntos, en la figura II.3.4.1.4 se encuentra la representación de los puntos en donde se tomaron las medidas.

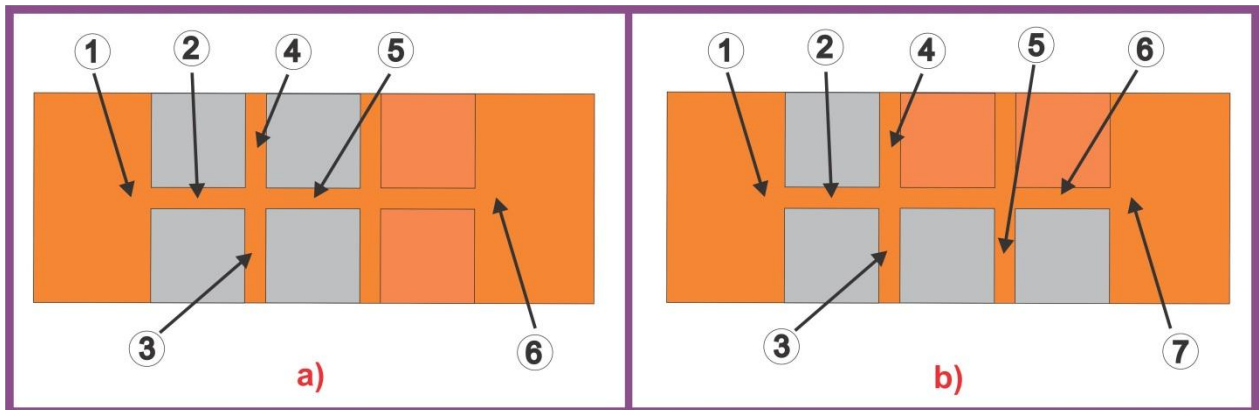


Figura II.3.4.1.4. Puntos en los que se tomaron las mediciones del “Crosstalk” eléctrico
 a) Puntos para la configuración 1, b) Puntos para las configuraciones 2, 3 y 4.

En la figura II.3.4.1.5 se muestra el esquema del sistema de medición completo, en donde se visualiza la placa protoboard, el pulser y el osciloscopio digital mostrando una de las señales del “Crosstalk” que se adquirió.

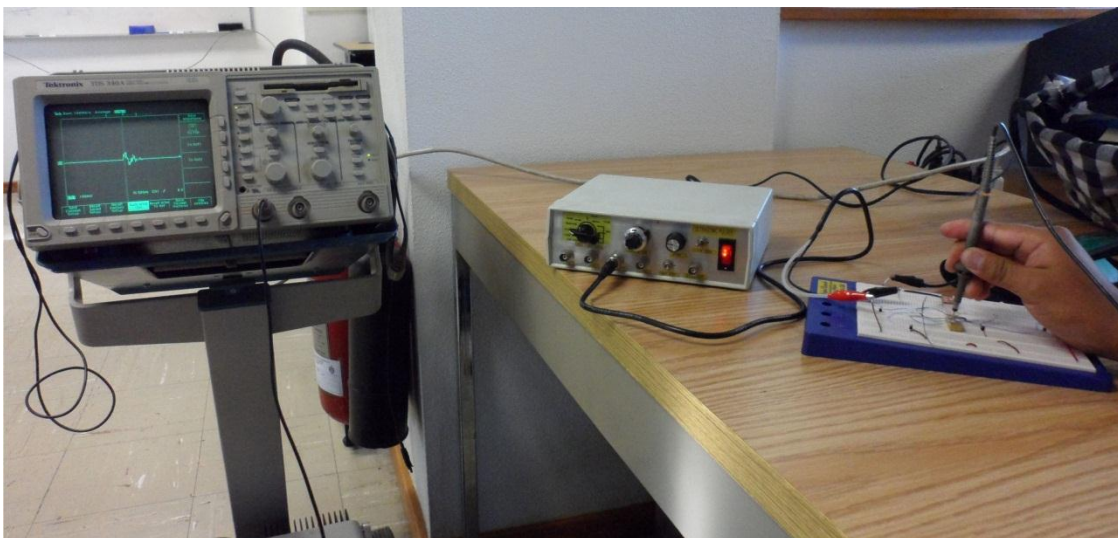


Figura II.3.4.1.5. Sistema de medición completo.

II.3.4.2. “Crosstalk” Mecánico

Para medir el “Crosstalk” mecánico se utilizó la configuración 2; todas las cerámicas fueron excitadas con el pulser; posteriormente se midió con el osciloscopio digital las vibraciones que se generan en las caras de la base debido a la forma de vibración lateral que producen las cerámicas piezoeléctricas, en la figura II.3.4.2.1 se muestran las fotos de la configuración 2 en las que se midió el “Crosstalk” mecánico.

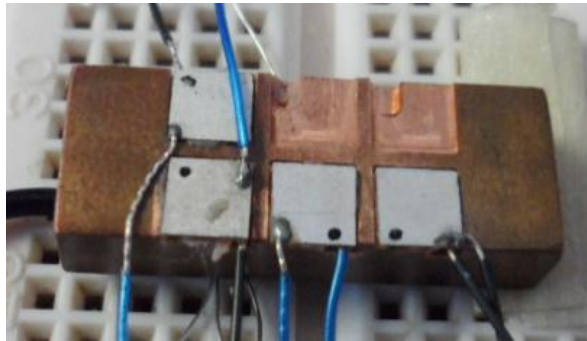


Figura II.3.4.2.1 Configuración empleada en la base de Cobre para medir el “Crosstalk” mecánico.

Fueron seleccionados once puntos de medición sobre las caras laterales de la base; cinco de los once puntos se encuentran en la cara donde se localizan tres de las cuatro cerámicas, están por debajo de cada cerámica y entre cada PZT, también se tomaron medidas sobre las cavidades en donde no hay PZT’s, de donde se desea observar la propagación del “Crosstalk” en la parte de la base en donde no hay una continuidad, en la figura II.3.4.2.2 se observan los puntos en donde fueron adquiridas la mediciones del “Crosstalk” mecánico.

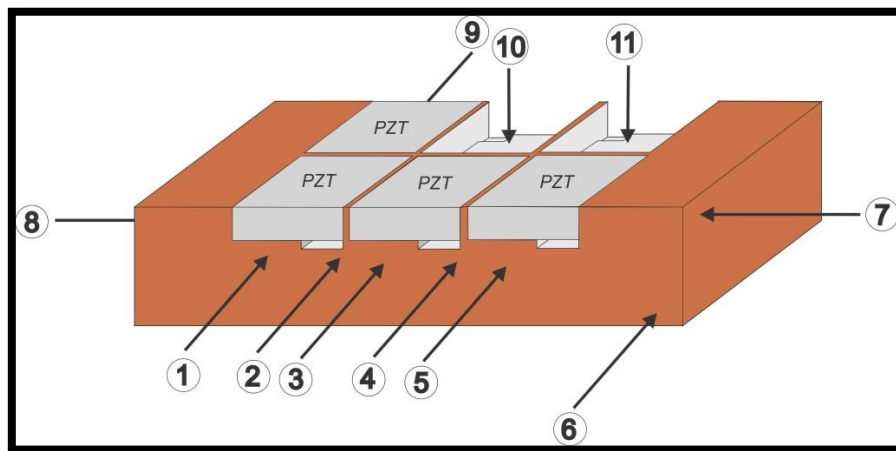


Figura II.3.4.2.2. Puntos de medición para el “Crosstalk” mecánico.

En la figura II.3.4.2.3 se presenta la foto del sistema de medición donde se observa el pulser, osciloscopio y protoboard; además se visualiza una de las mediciones del “Crosstalk” mecánico adquiridas sobre la base.

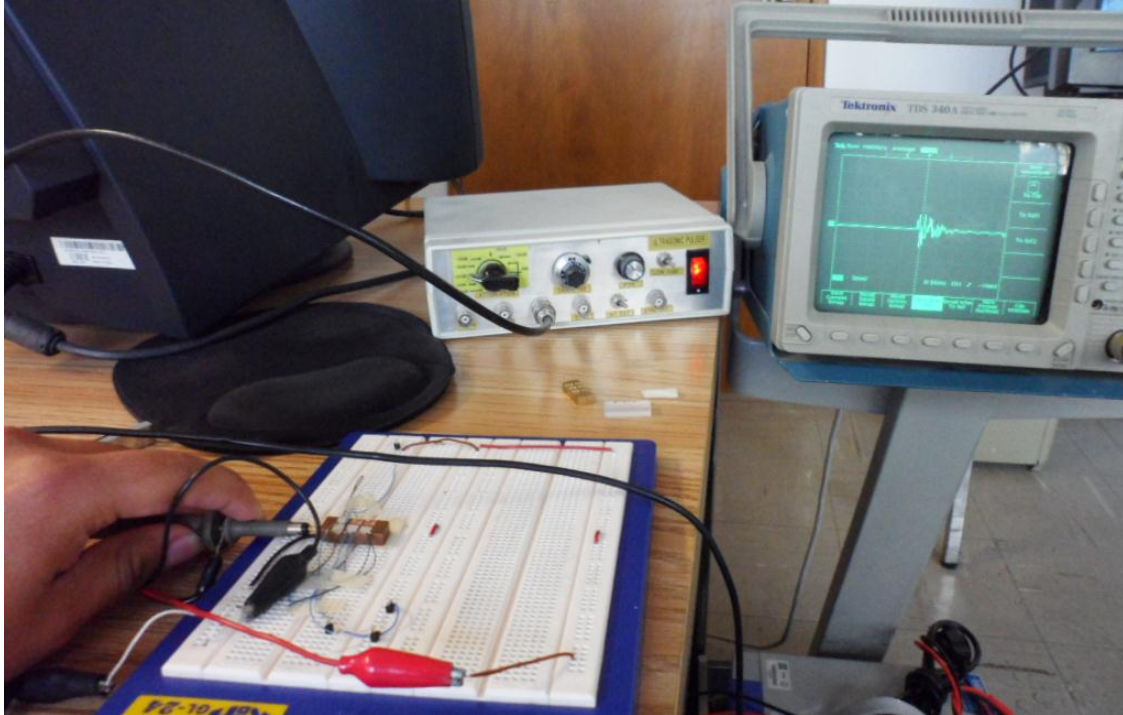


Figura II.3.4.2.3. Sistema de medición para el “Crosstalk” mecánico.

II.4. Patrón de Radiación

La obtención del patrón de radiación en un arreglo de 3x3 elementos se desarrolló de dos maneras, la primera fue a través de un programa en Matlab y se basó en un trabajo previo en donde se simula el efecto del “Crosstalk” como un efecto capacitivo [11] y la segunda fue desarrollando una simulación en HP VEE en donde se simula el efecto del “Crosstalk” basados en un trabajo previo realizado por von Krüger [10]. En ambos casos se presentan los patrones de radiación en forma ideal cuando el “Crosstalk” es nulo y cuando hay presencia de “Crosstalk”.

II.4.1. Patrón de Radiación con Matlab

Tomando como referencia el trabajo realizado por Aghzout y Gómez [10], en donde estudian el efecto del “Crosstalk” que se genera entre pistas de interconexión de alta densidad de integración, y en donde simulan el fenómeno del “Crosstalk” entre pistas como un efecto capacitivo.

Basados en dicho trabajo se desarrolló un programa en Matlab que genera de forma ideal el campo acústico de un arreglo de 3x3; introduciendo en 5 de los 9 elementos un valor que representa el efecto capacitivo y que simula el efecto del “Crosstalk” para generar su campo acústico.

En la tabla II.4.1.1 se muestra la parte del código que genera el campo acústico, los resultados se almacenan en una matriz para después visualizarse en una gráfica.

Tabla II.4.1.1. Código en Matlab que genera el campo Acústico de un arreglo de 3x3.

```

for nLoop1 = 1:x
  for nLoop2 = 1:y
    for nLoop3 = 1:m
      for nLoop4 = 1:n
        r = sqrt((Ex(nLoop1) - TN1(nLoop3,nLoop4))^2 + Ey(nLoop2)^2);
        CUS1(nLoop1, nLoop2) = CUS1(nLoop1, nLoop2) + cos(-k*r)/r;
      end
    end
  end
end

```

II.4.2. Patrón de Radiación con HP VEE 4.0

Se desarrolló una simulación con ayuda del programa HP VEE 4.0 en el que se representa el fenómeno del “Crosstalk” basado en un trabajo previo desarrollado por von Krüger [11] y posteriormente por Sánchez [12]; esta simulación representa el patrón de radiación que se origina cuando existe “Crosstalk” en un arreglo de cerámicas piezoeléctricas.

En la simulación se consideraron factores que influyen en la generación de “Crosstalk” como son: las dimensiones de las cerámicas, la separación que existe entre cada una, la frecuencia de trabajo, el número de elementos y un factor que representa el “Crosstalk” para saber los efectos que genera en el patrón de radiación de acuerdo a su intensidad. En la figura II.4.2.1 se muestra la simulación con el caso ideal en el que el valor del “Crosstalk” es nulo y el patrón de radiación no presenta atenuación ni desfaseamiento.

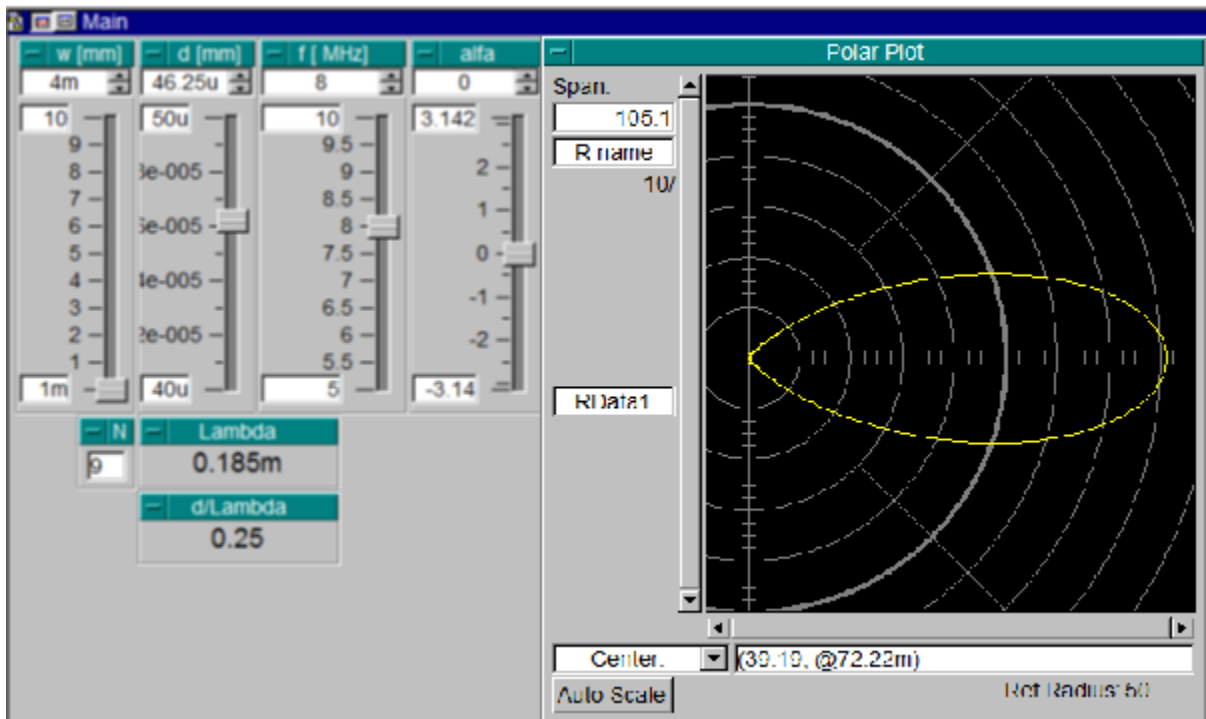


Figura II.4.2.1. Simulación del patrón de radiación generado por un arreglo en HP VEE 4.0.

De la figura II.4.2.1 se identifican los siguientes datos:

Símbolo	Representación
w	Dimensión de la cerámica, (cuadrada de 4mm).
d	Distancia entre las cerámicas.
f	Frecuencia de trabajo.
N	Número de elementos.
Lambda	$= \frac{c}{f}$ donde c = Velocidad en el medio de propagación f = Frecuencia de trabajo
alfa	Factor del "Crosstalk"

De las mediciones experimentales y de las simulaciones se consideraron los criterios para determinar los factores que originan el "Crosstalk" en los arreglos estudiados.

Capítulo III

Resultados

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones y del proceso de experimentación.

- I. Primero se presentan las gráficas del “Crosstalk” eléctrico obtenidas de la simulación en COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 [8], así como los valores cuantitativos del “Crosstalk” obtenidos con Matlab en donde se analiza cada gráfica.
- II. En segundo caso se exponen los resultados obtenidos en la parte experimental, después de desarrollar y ejecutar el programa en Matlab, en donde se presentan y se analizan los resultados obtenidos de las mediciones tomadas en la base de Cobre y con las cuatro configuraciones; tanto para el “Crosstalk” eléctrico como para el “Crosstalk” mecánico.
- III. Los resultados obtenidos del programa desarrollado en Matlab y de la simulación realizada en HP VEE, para obtener el patrón de radiación de un arreglo de 3x3 elementos, se muestran para los casos en los que hay presencia del “Crosstalk” y para los casos ideales.

III.1. Resultados de la Simulación en COMSOL

De la simulación en COMSOL MULTIPHYSICS 3.5 [8], se presentan las gráficas en donde hay presencia de “Crosstalk” que es en la zona entre las caras laterales de dos cerámicas piezoeléctricas y en donde se aprecia que el “Crosstalk” eléctrico se manifiesta en diferentes intensidades.

En la siguiente figura se muestran las ocho gráficas obtenidas de la simulación.

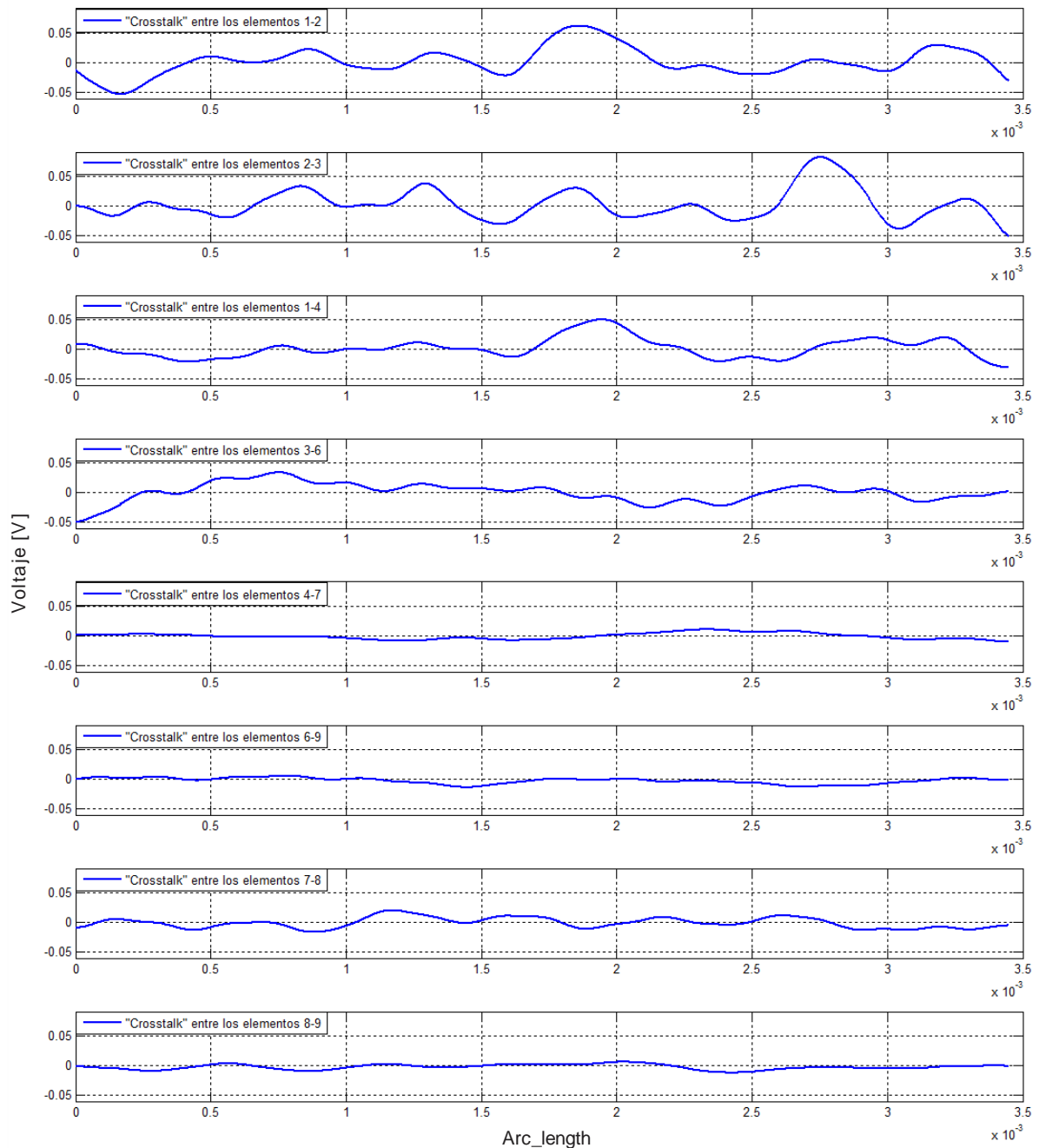


Figura III.1.1 Gráficas del “Crosstalk” eléctrico obtenidas de la simulación en Comsol [8].

En la figura III.1.2 se muestran en 2-D las gráficas del “Crosstalk” exportadas de la simulación en COMSOL.

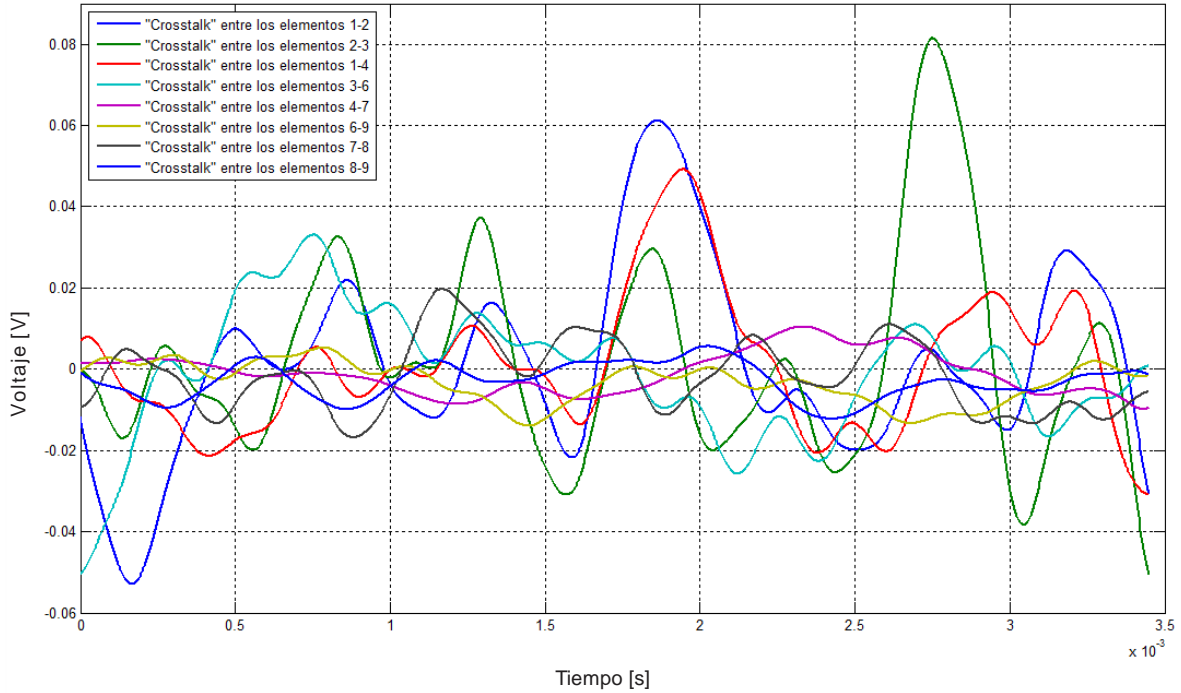


Figura III.1.2 Gráfica en 2-D con el “Crosstalk” exportado de COMSOL.

En la figura III.1.3 se muestran en 3-D las gráficas del “Crosstalk” exportadas de la simulación en COMSOL.

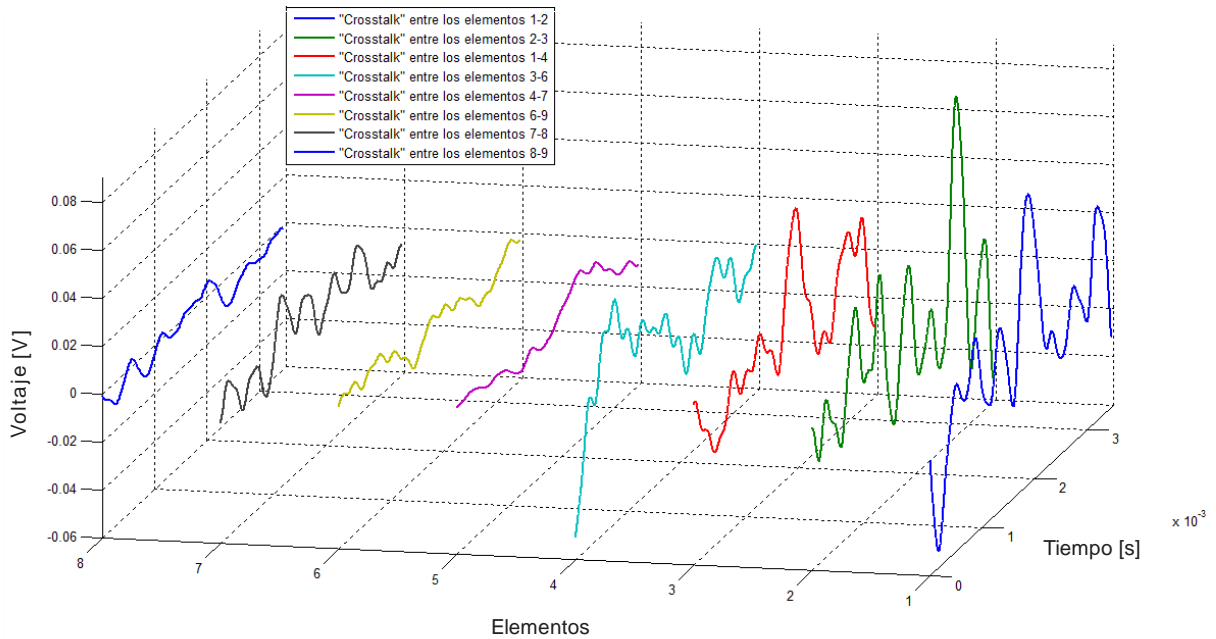


Figura III.1.3 Gráfica en 3-D con el “Crosstalk” exportado de COMSOL.

Después de ejecutar el programa desarrollado en Matlab -previamente detallado en el capítulo II sección II.2- para cuantificar el “Crosstalk” eléctrico que se genera en el arreglo simulado en COMSOL de 3x3 elementos; se obtuvo que el “Crosstalk” total en el arreglo es de 1.1244 [V] equivalente al 9.3% del voltaje total aplicado en la simulación.

En la tabla III.1 se muestran las magnitudes de “Crosstalk” eléctrico entre elementos y la contribución total.

Tabla III.1. Magnitud del “Crosstalk” eléctrico en cada zona de interés.

Elementos	Magnitud del “Crosstalk” [V]
1-2	0.2433
2-3	0.3877
1-4	0.1802
3-6	0.0985
4-7	0.0289
6-9	0.0476
7-8	0.1022
8-9	0.036
Contribución del “Crosstalk” eléctrico total	1.1244

III.2. Mediciones Experimentales

Se presenta a continuación los resultados de la parte experimental para la base de Cobre y para las cuatro configuraciones utilizadas; tanto para el “Crosstalk” eléctrico como para el mecánico.

Las gráficas mostradas son resultado del programa desarrollado en Matlab después de haber adquirido las mediciones del “Crosstalk” eléctrico y mecánico, el cual sirvió para visualizar los datos recabados con ayuda del osciloscopio y guardados en un disquete.

III.2.1. Mediciones del “Crosstalk” eléctrico

El desarrollo para realizar las mediciones del “Crosstalk” eléctrico se describió en el capítulo II en la sección II.3.4.1; la configuración del osciloscopio digital para tomar las mediciones del “Crosstalk” fue usando una escala de 100 [mV] y con una resolución de 500 [ns]; para las mediciones de la respuesta de oscilación de las cerámicas se empleó una escala de 1 [V] y una resolución de 500 [ns]; estas mismas escalas fueron utilizadas para las cuatro configuraciones.

III.2.1.1. “Crosstalk” eléctrico por configuración medido sobre la base de Cobre

En esta sección se presentan las mediciones del “Crosstalk” eléctrico tomadas sobre la base de Cobre usando las cuatro configuraciones. Los datos obtenidos se muestran en diferentes gráficas y en diferentes perspectivas con el fin de que las mediciones y las comparaciones con la respuesta de oscilación de la cerámica se puedan apreciar de manera clara.

III.2.1.1.1. Configuración 1

Las seis mediciones del “Crosstalk” eléctrico tomadas en la base de Cobre usando la configuración 1, se muestran de manera individual en la figura III.2.1.1.1.

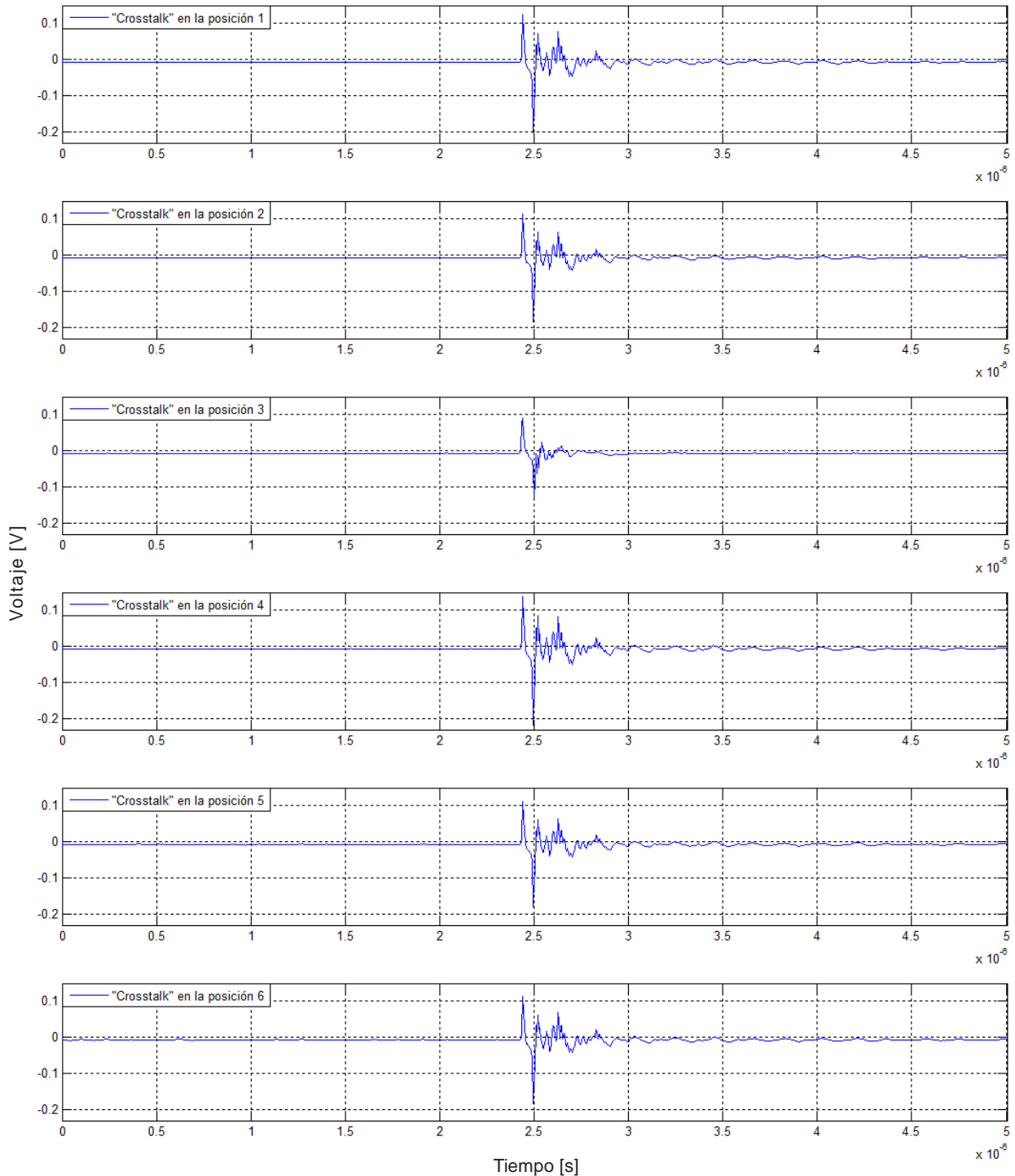


Figura III.2.1.1.1.1. Mediciones del “Crosstalk” eléctrico en Cobre usando la configuración 1.

En la figura III.2.1.1.1.2 se muestra en 2-D las seis mediciones del “Crosstalk”.

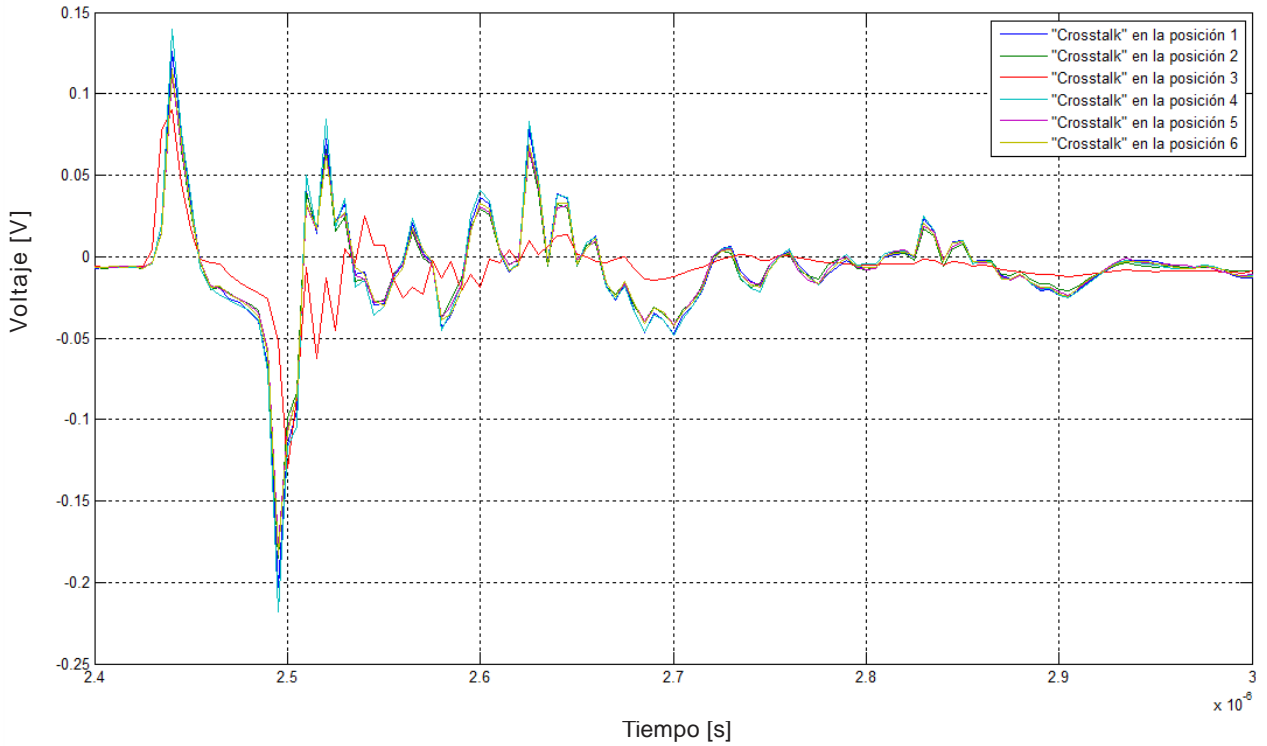


Figura III.2.1.1.1.2. Gráfica en 2-D del “Crosstalk” en la configuración 1.

La representación en 3-D de las seis mediciones del “Crosstalk”, se encuentran en la figura III.2.1.1.1.3.

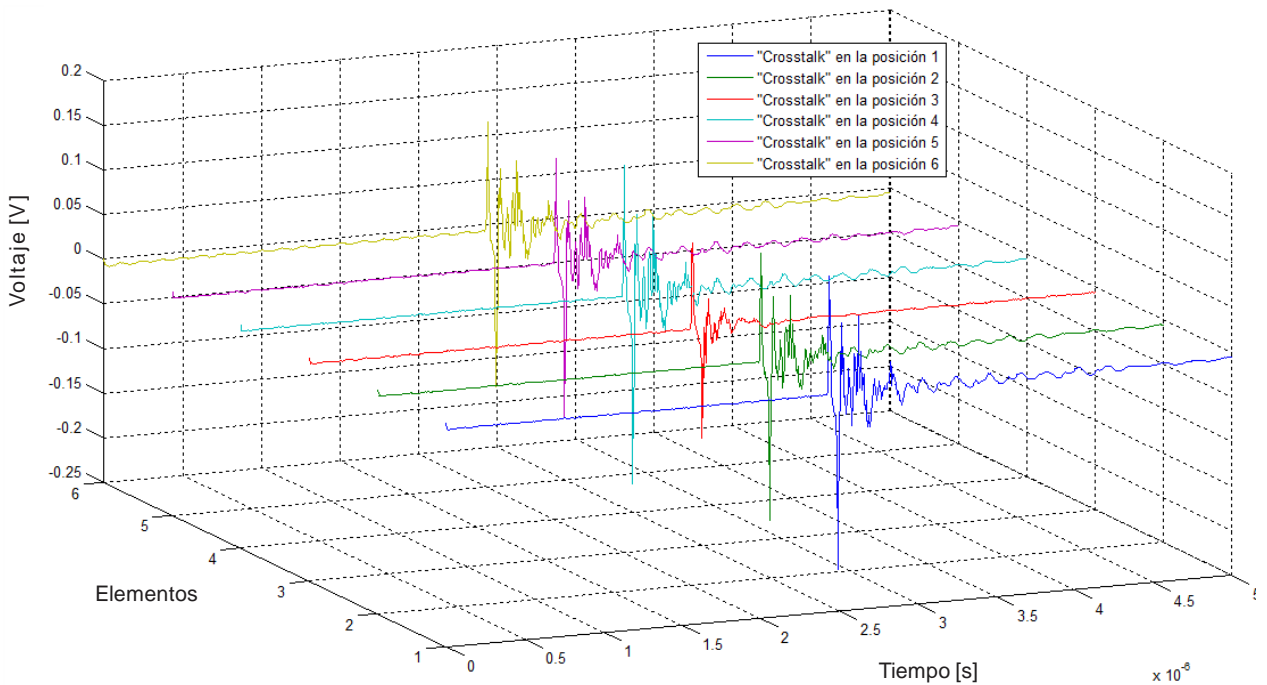


Figura III.2.1.1.1.3. Gráfica en 3-D del “Crosstalk” en la configuración 1.

En la figura III.2.1.1.1.4 se representa en 3-D la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y de las seis mediciones del “Crosstalk”.

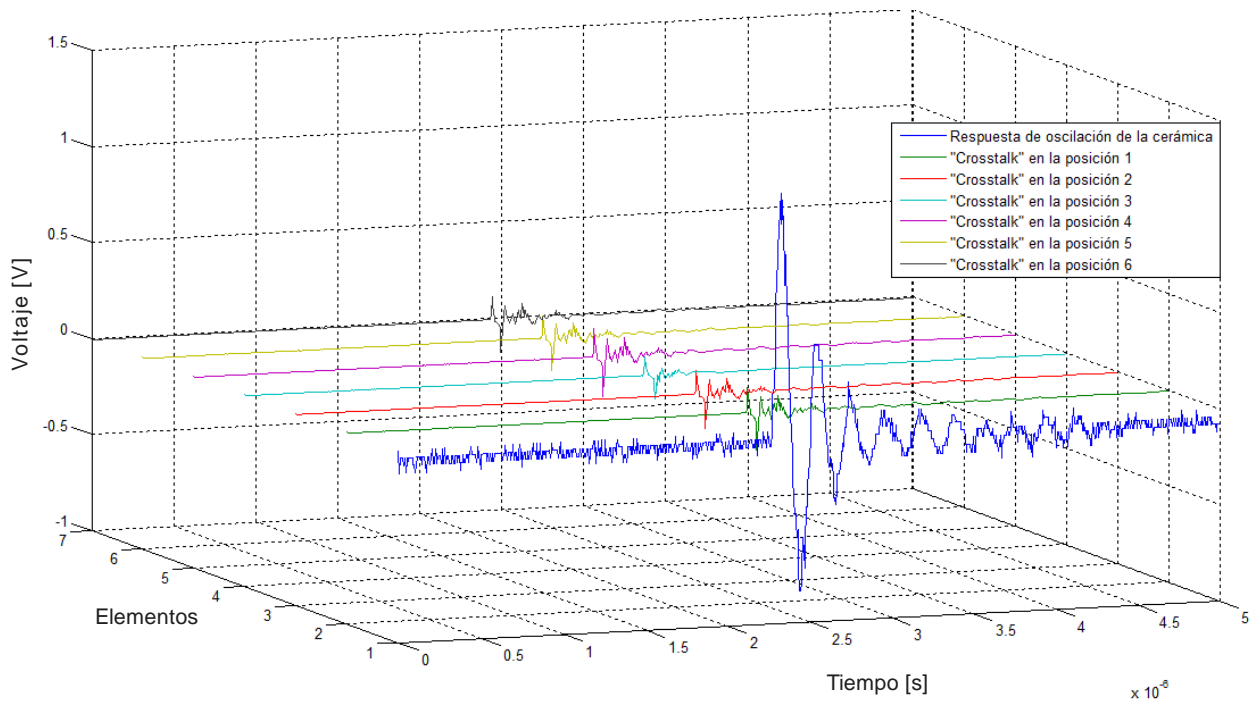


Figura III.2.1.1.1.4. Gráfica en 3-D de la respuesta de una cerámica y las mediciones del “Crosstalk”.

En la figura III.2.1.1.1.5 se representa en 2-D el pulso de oscilación de una cerámica y del “Crosstalk” total que se genera usando la configuración 1.

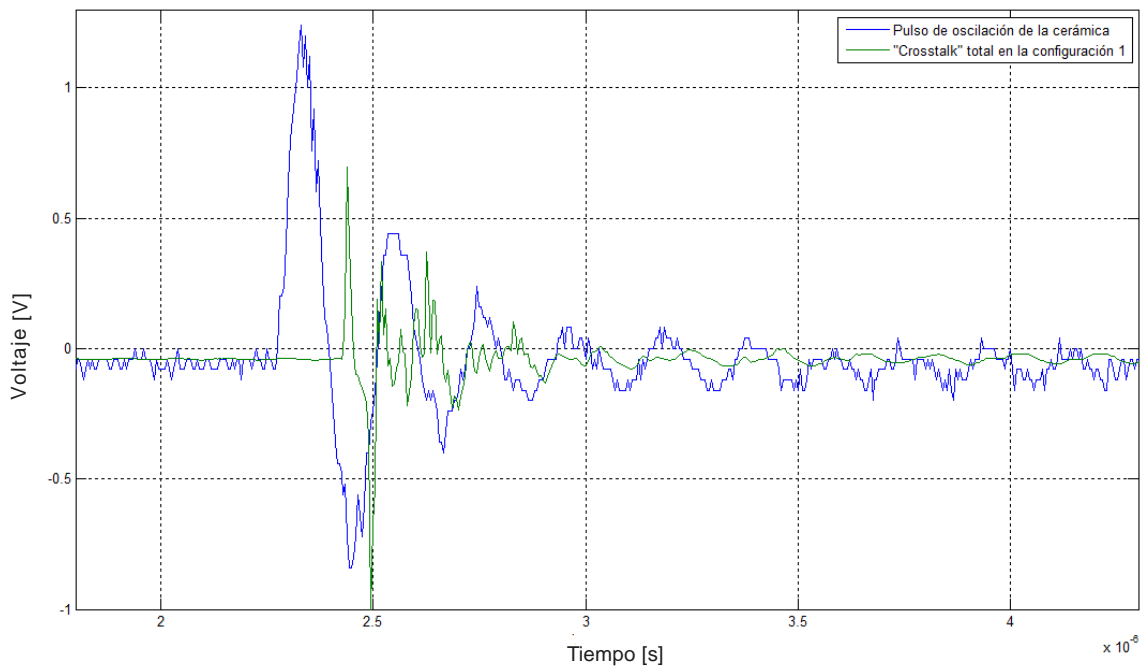


Figura III.2.1.1.1.5. Pulso de la cerámica y el “Crosstalk” total.

III.2.1.1.2. Configuración 2

Para la configuración 2 en Cobre se tomaron siete mediciones sobre la base, en la figura III.2.1.1.2.1 se muestran todas las mediciones del “Crosstalk” en forma individual.

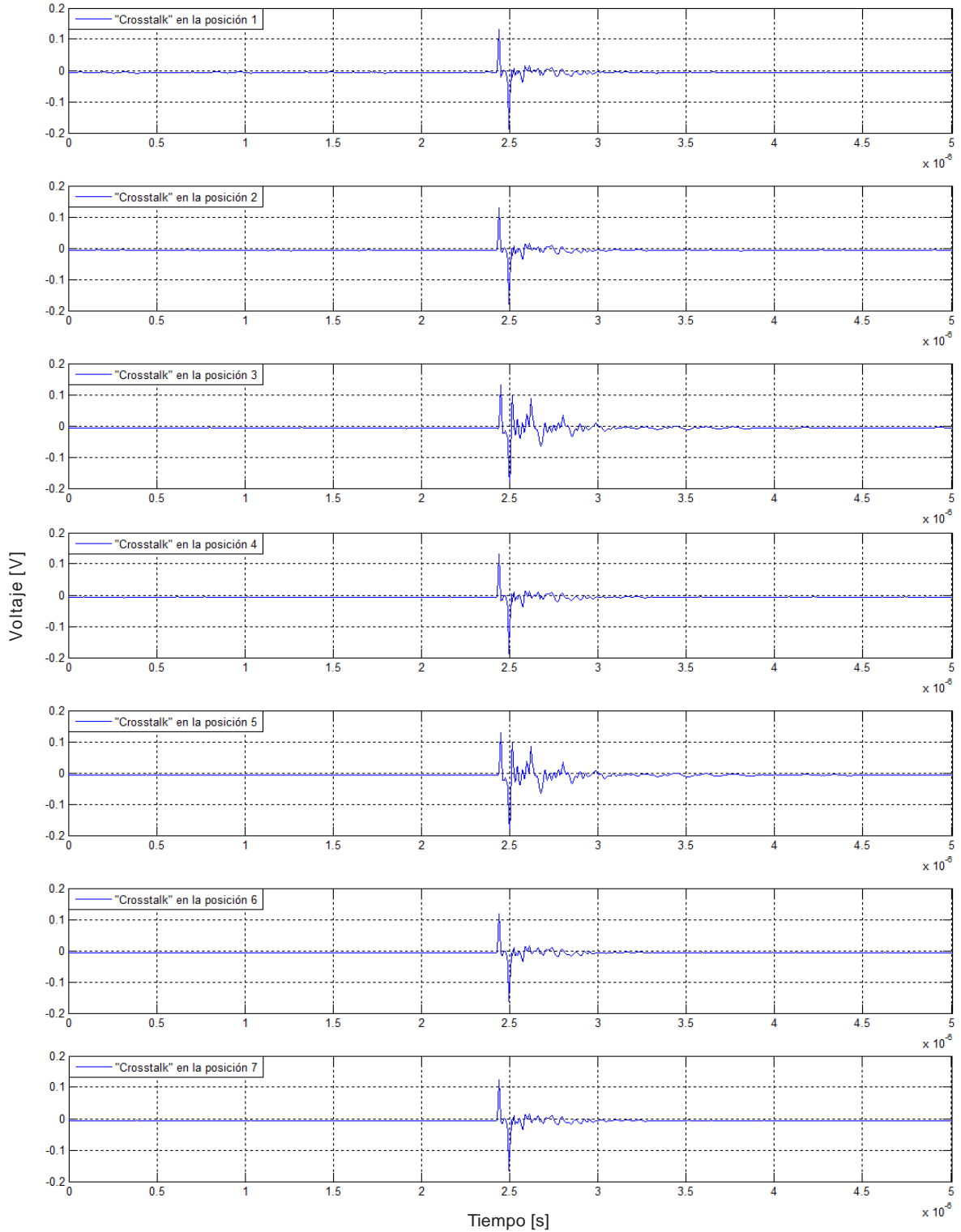


Figura III.2.1.1.2.1. Mediciones del “Crosstalk” eléctrico en Cobre usando la configuración 2.

La representación en 2-D de las mediciones del “Crosstalk” eléctrico, se muestran en la figura III.2.1.1.2.2.

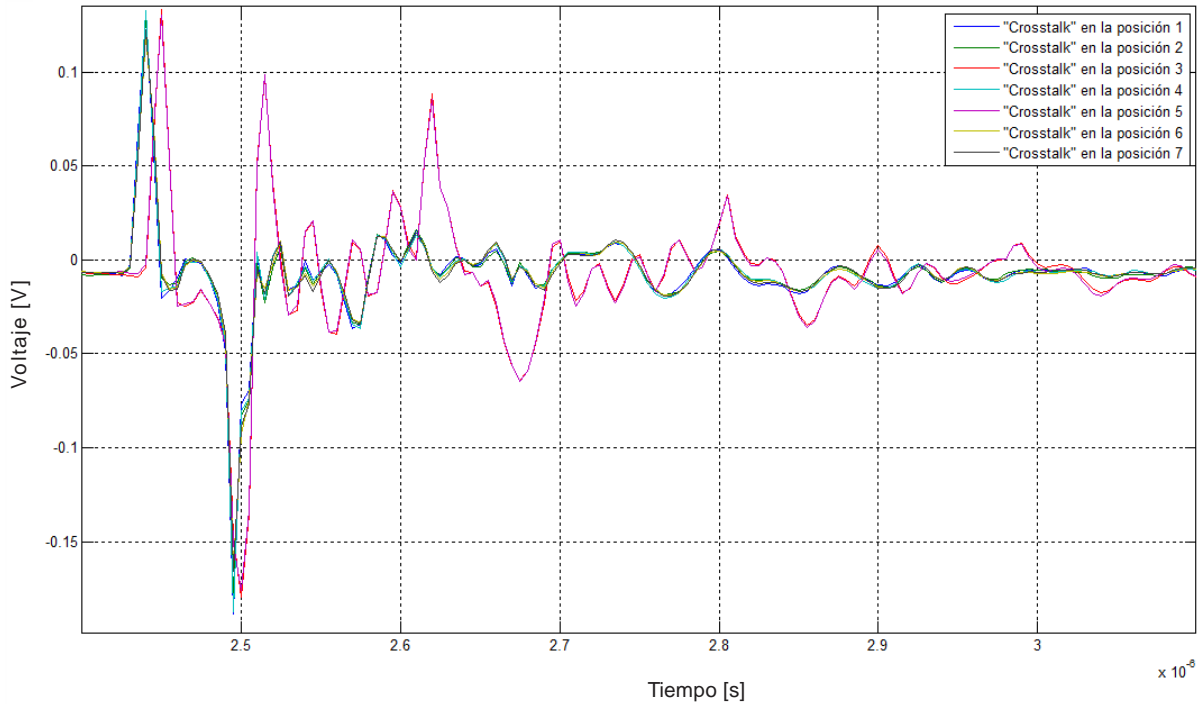


Figura III.2.1.1.2.2. Gráfica en 2-D de las mediciones del “Crosstalk” eléctrico en Cobre usando la configuración 2.

En la figura III.2.1.1.2.3 se muestra en 3-D las mediciones del “Crosstalk”.

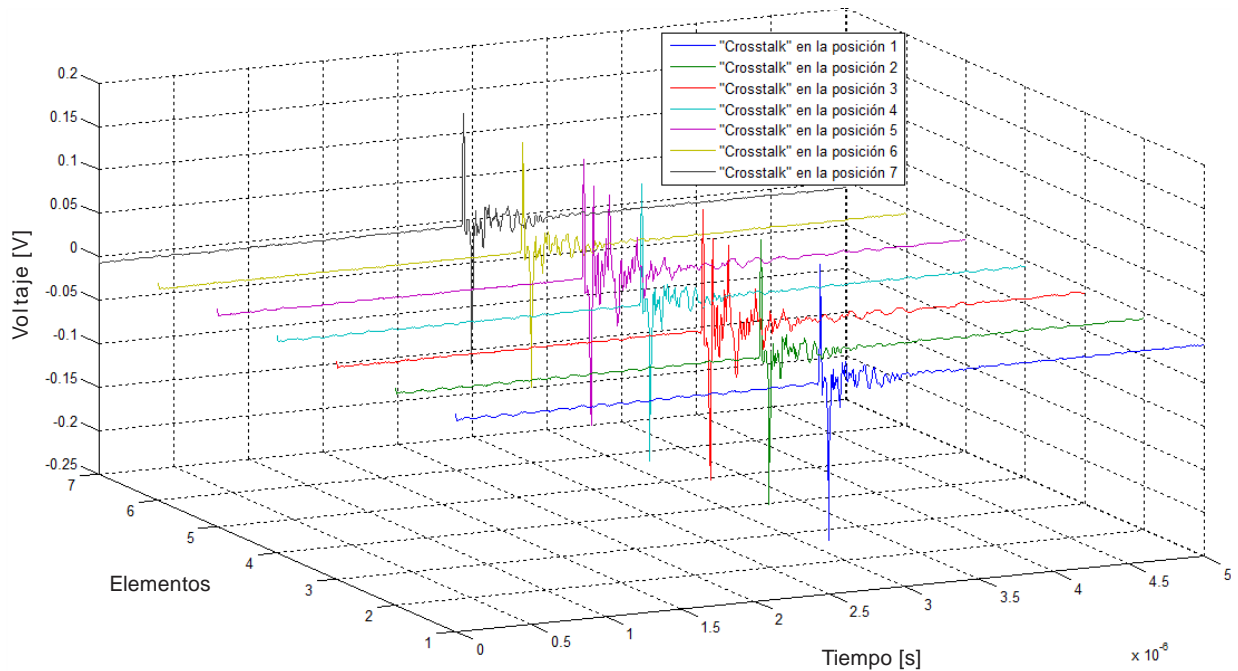


Figura III.2.1.1.2.3. Gráfica en 3-D de las mediciones del “Crosstalk” eléctrico en Cobre usando la configuración 2.

En la figura III.2.1.1.2.4 se representa en 3-D la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y las siete mediciones del “Crosstalk”.

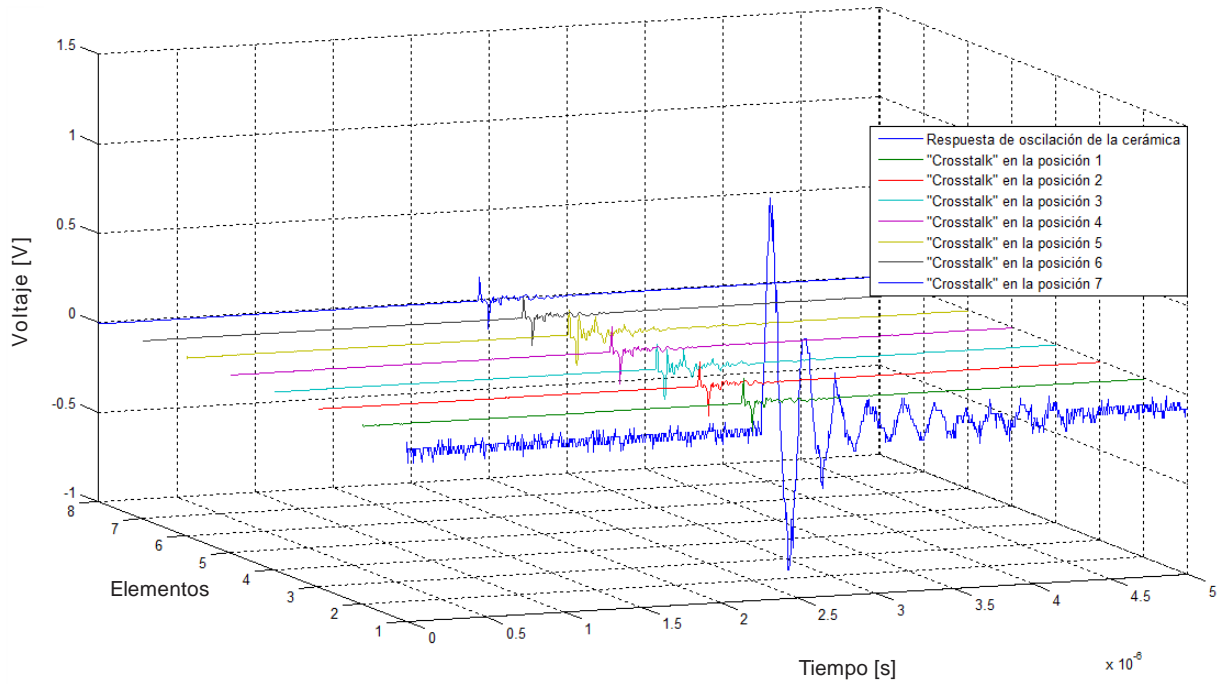


Figura III.2.1.1.2.4. Gráfica en 3-D de la respuesta de oscilación de una PZT y del “Crosstalk”.

En la figura III.2.1.1.2.5 se representa en 2-D la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y el “Crosstalk” total generado en la configuración 2.

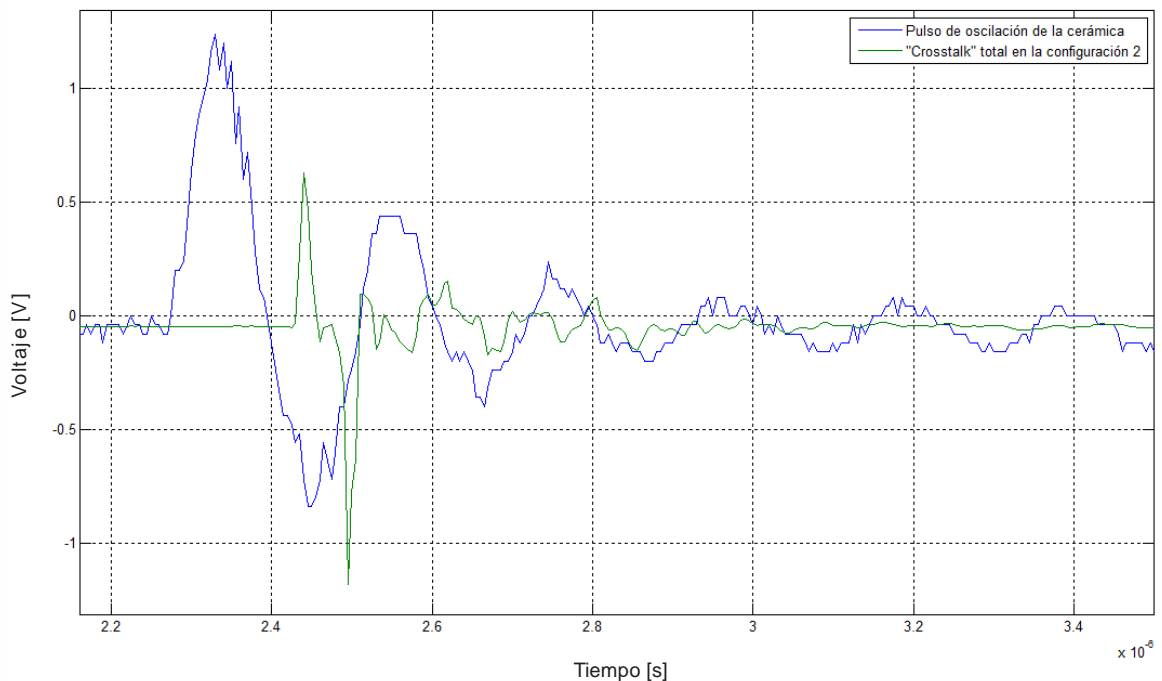


Figura III.2.1.1.2.5. Gráfica con la respuesta de una PZT y el “Cosstalk” total.

III.2.1.1.3. Configuración 3

En la figura III.2.1.1.3.1 se muestran las siete mediciones tomadas sobre la base de Cobre usando la configuración 3.

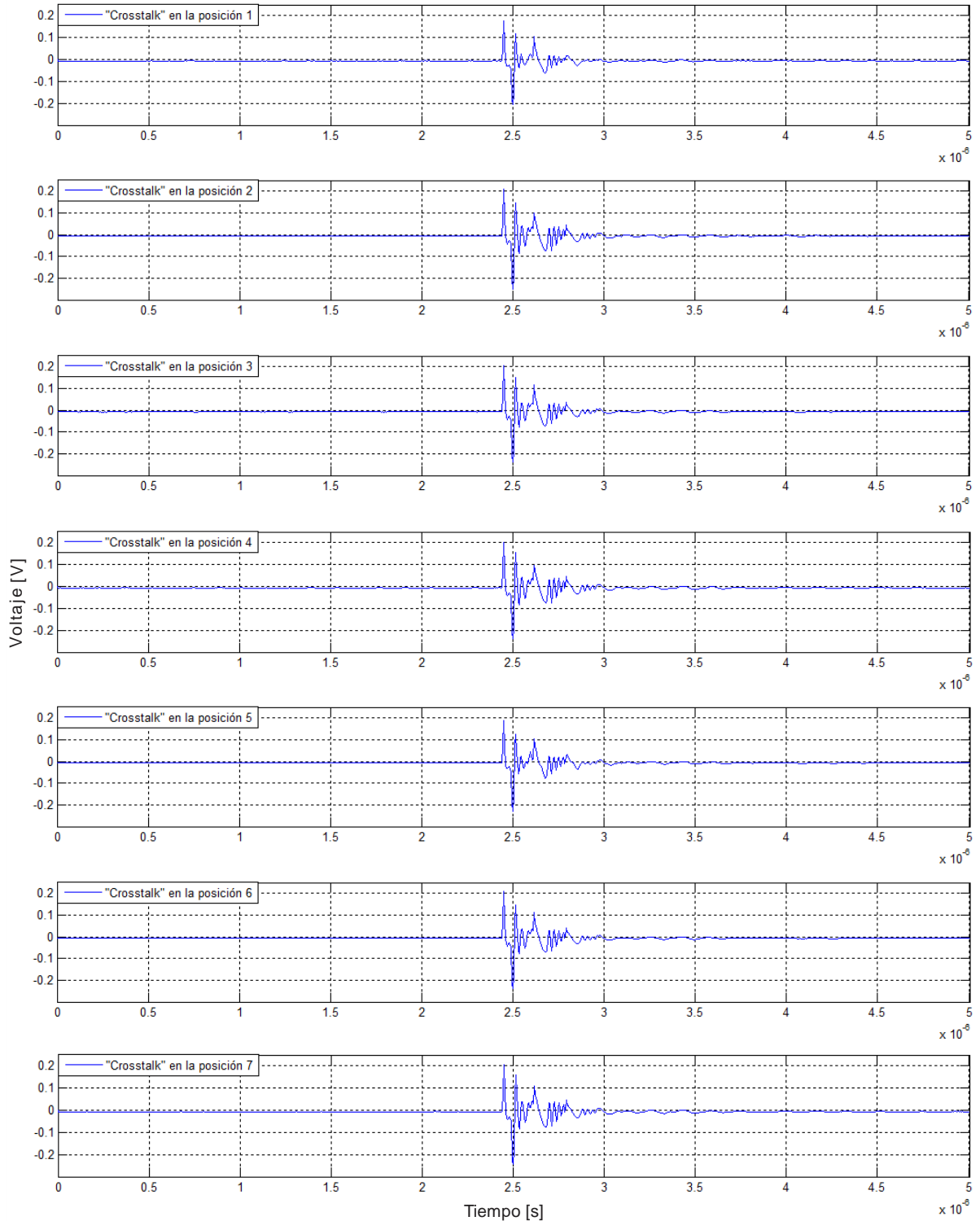


Figura III.2.1.1.3.1. Mediciones del “Crosstalk” eléctrico en Cobre empleando la configuración 3.

En la figura III.2.1.1.3.2 se muestra en 2-D todas las mediciones del “Crosstalk” eléctrico.

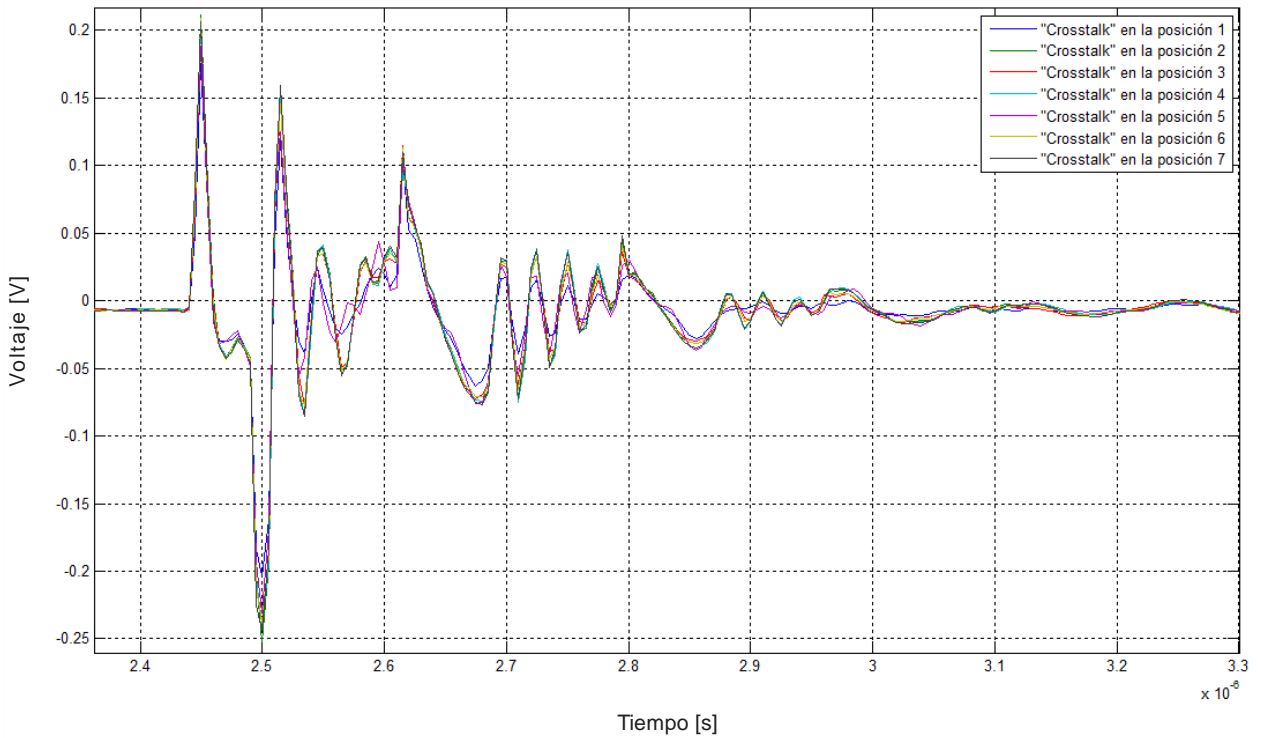


Figura III.2.1.1.3.2. Gráfica en 2-D con las siete mediciones del “Crosstalk”.

En la figura III.2.1.1.3.3 se muestra en 3-D las siete mediciones del “Crosstalk”.

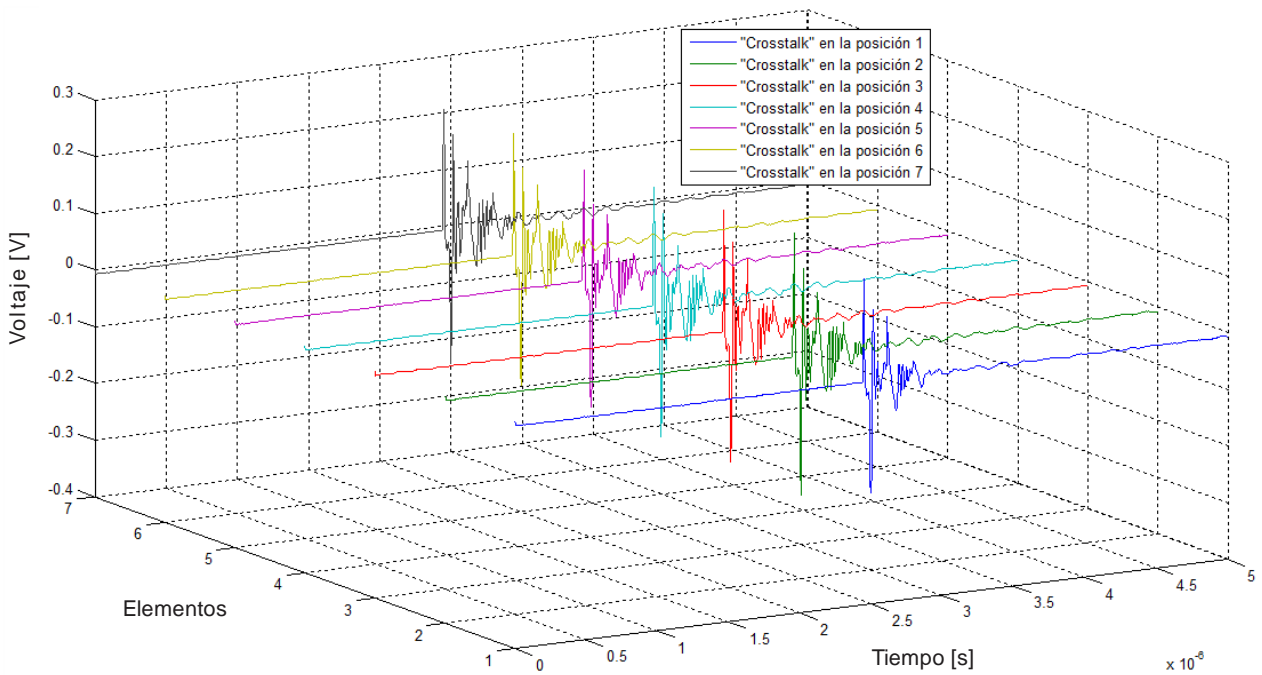


Figura III.2.1.1.3.3. Gráfica en 2-D con las siete mediciones del “Crosstalk”.

En la figura III.2.1.1.3.4 se presenta en 3-D la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y las mediciones del “Crosstalk” eléctrico.

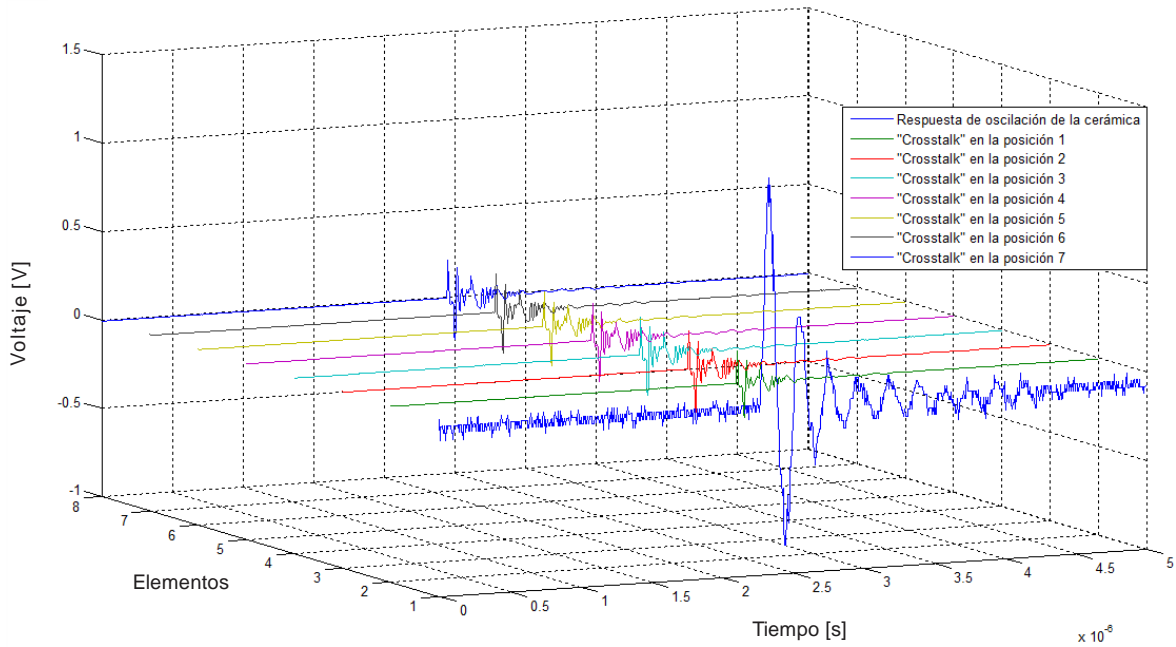


Figura III.2.1.1.3.4. Gráfica en 3-D con la respuesta de oscilación de una de las PZT's y del “Crosstalk”

La comparación entre la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y el “Crosstalk” total obtenido en la configuración 3 para la base de Cobre se presentan en la figura III.2.1.1.3.5.

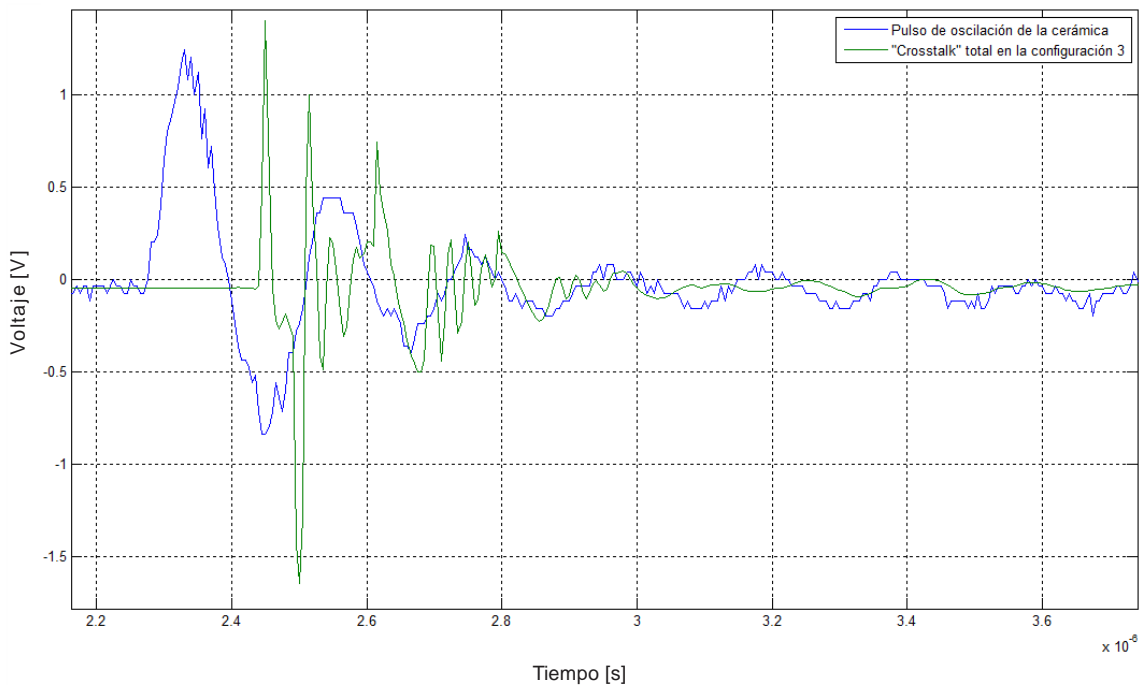


Figura III.2.1.1.3.5. Gráfica en 2-D con la respuesta de oscilación de una PZT y del “Crosstalk” total.

III.2.1.1.4. Configuración 4

Las mediciones del “Crosstalk” adquiridas en Cobre usando la configuración 4 se presentan en la figura III.2.1.1.4.1 de manera individual.

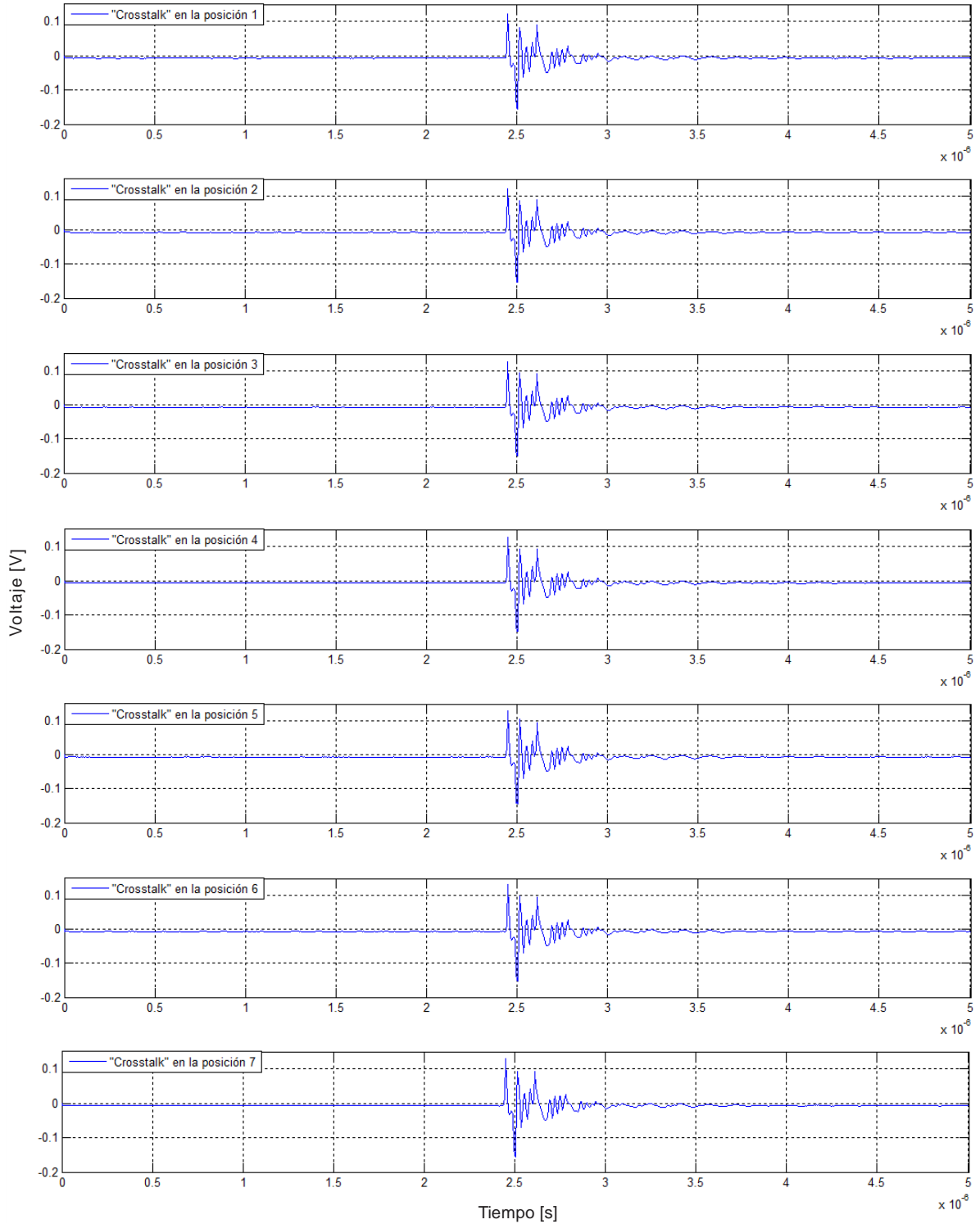


Figura III.2.1.1.4.1. Mediciones del “Crosstalk” eléctrico medido en Cobre usando la configuración 4.

Las mediciones del “Crosstalk” eléctrico se presentan en 2-D en la figura III.2.1.1.4.2.

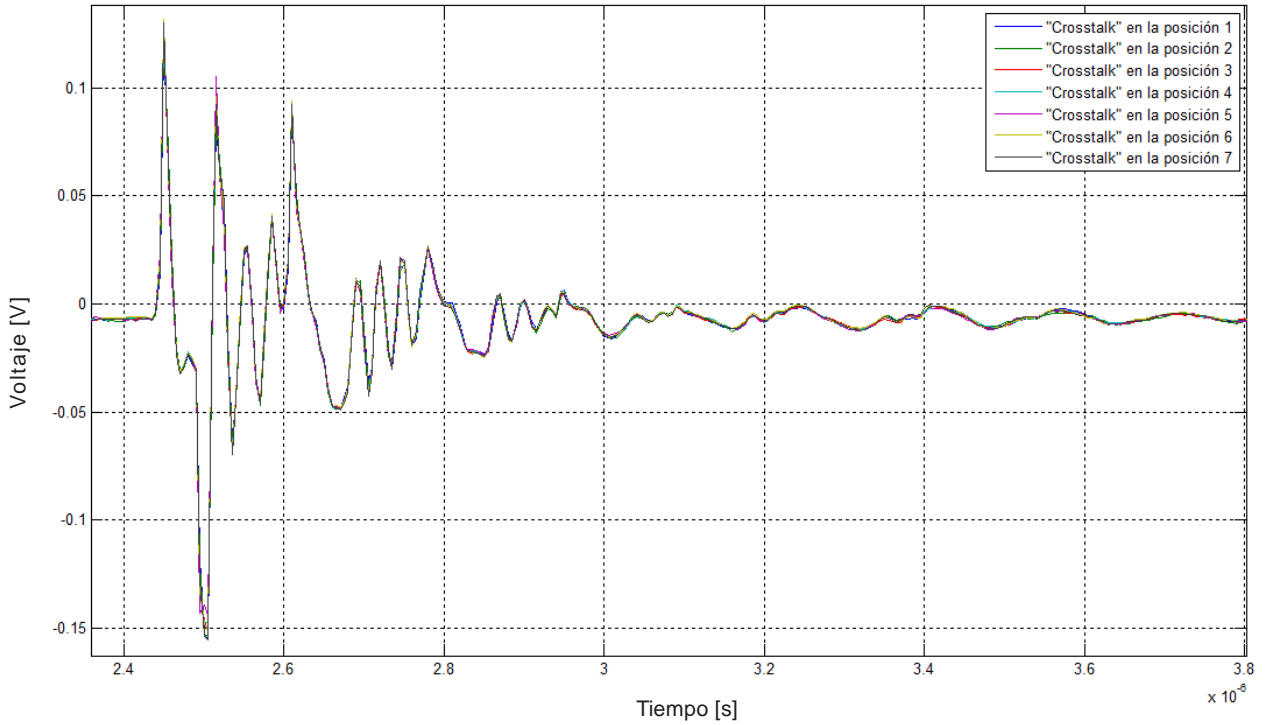


Figura III.2.1.1.4.2. Gráfica en 2-D con las mediciones del “Crosstalk”.

En la figura III.2.1.1.4.3 se muestran en 3-D las siete mediciones del “Crosstalk”.

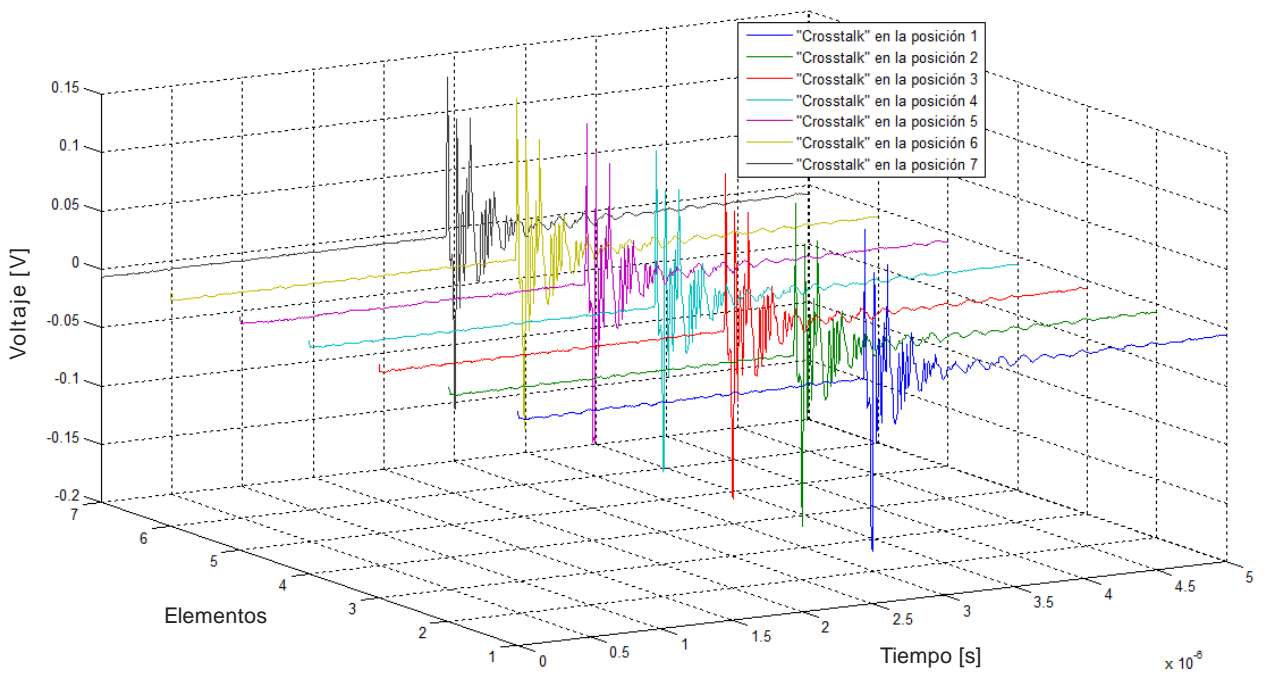


Figura III.2.1.1.4.3. Gráfica en 3-D con todas las mediciones del “Crosstalk”.

La respuesta de oscilación de una cerámica y las siete mediciones del “Crosstalk” se presentan en 3-D en la figura III.2.1.1.4.4.

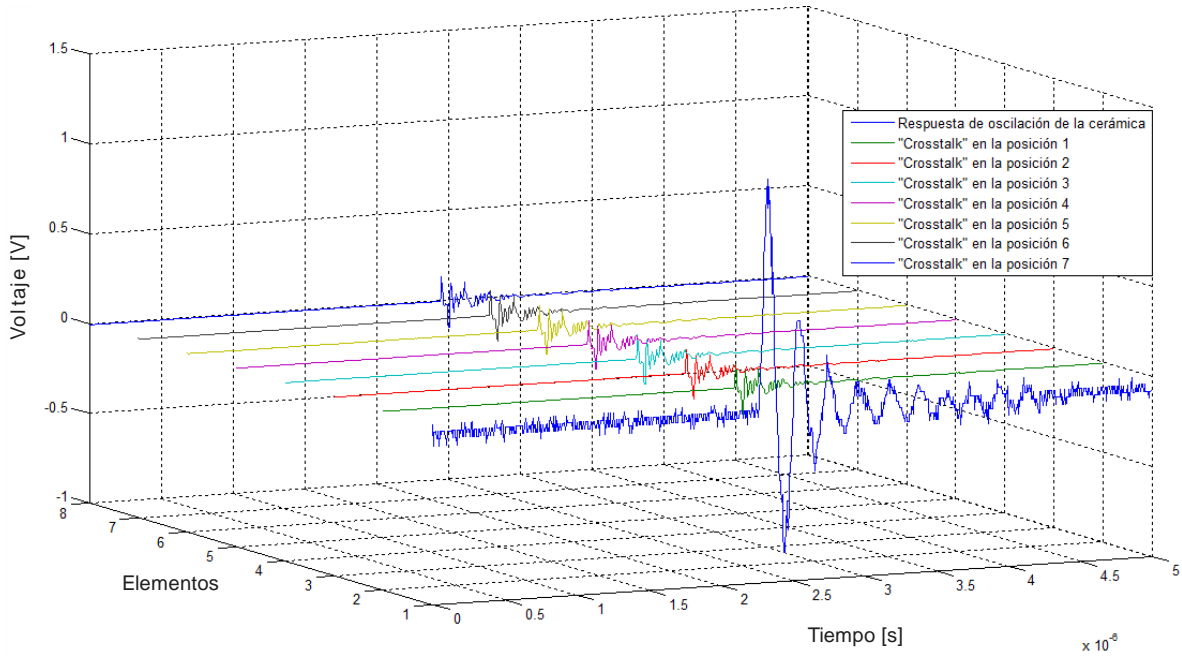


Figura III.2.1.1.4.4. Gráfica en 3-D de la respuesta de oscilación de una PZT y las mediciones del “Crosstalk”.

En la figura III.2.1.1.4.5 se muestra en 2-D la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y el “Crosstalk” total en Cobre usando la configuración 4.

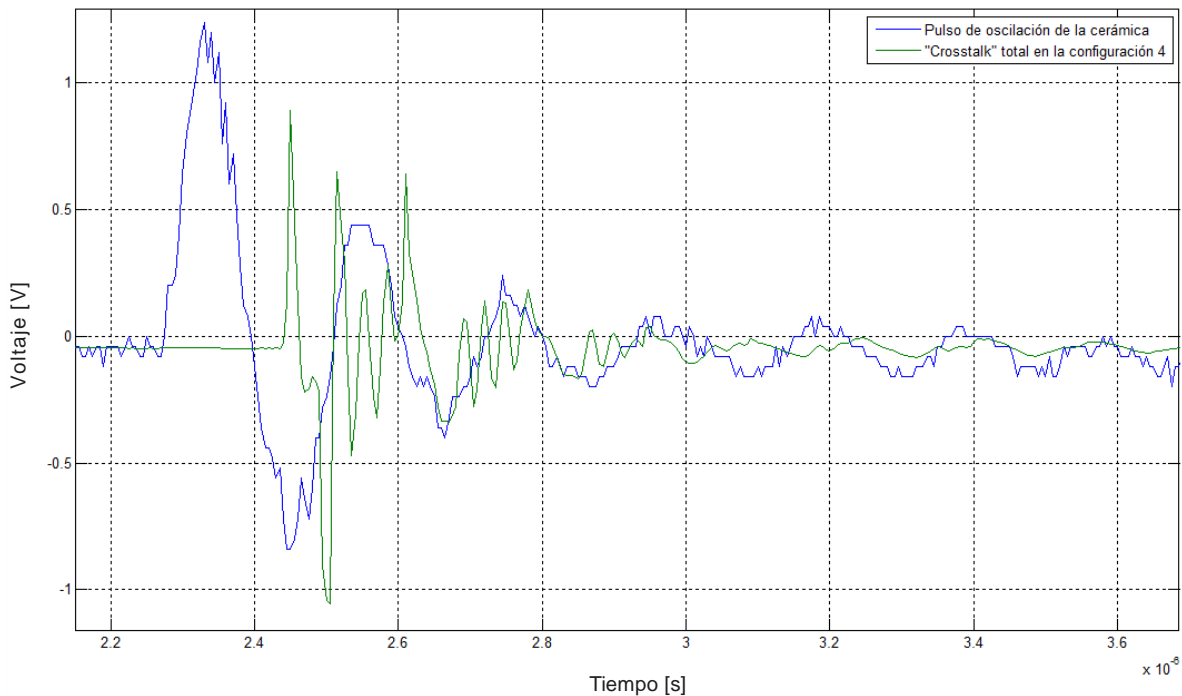


Figura III.2.1.1.4.5. Gráfica en 2-D de la respuesta de una PZT y del “Crosstalk” total en la configuración 4.

III.2.1.1.5. “Crosstalk” eléctrico total

La contribución total del “Crosstalk” eléctrico considerando las cuatro configuraciones medidas en la base de Cobre se presenta en la figura III.2.1.1.5.1; y en donde se observa que el “Crosstalk” es de una mayor magnitud que la respuesta de oscilación de la cerámica.

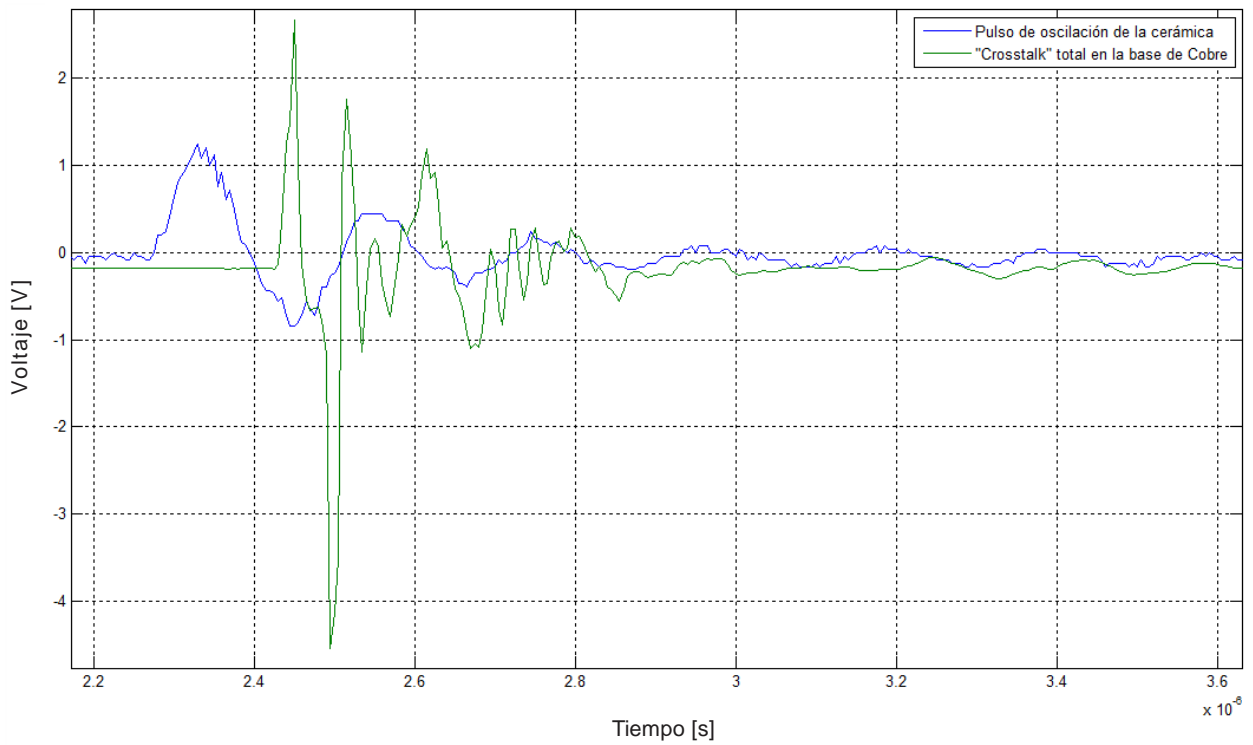


Figura III.2.1.1.5.1. Gráfica con la respuesta de oscilación de una de la PZT y el “Crosstalk” total en las 4 configuraciones.

En la figura III.2.1.1.5.2 se presenta la contribución del “Crosstalk” eléctrico para las configuraciones 1, 2 y 4; se consideraron solo estas tres configuraciones porque de acuerdo a la posición de las cerámicas en la configuración 1 y 2 se puede formar el arreglo de 2x3 elementos y en la configuración 4 se tiene propagación del “Crosstalk” en forma diagonal.

De la gráfica se observa que la amplitud del “Crosstalk” es idéntica a la amplitud del pulso de oscilación de la cerámica en el pico positivo.

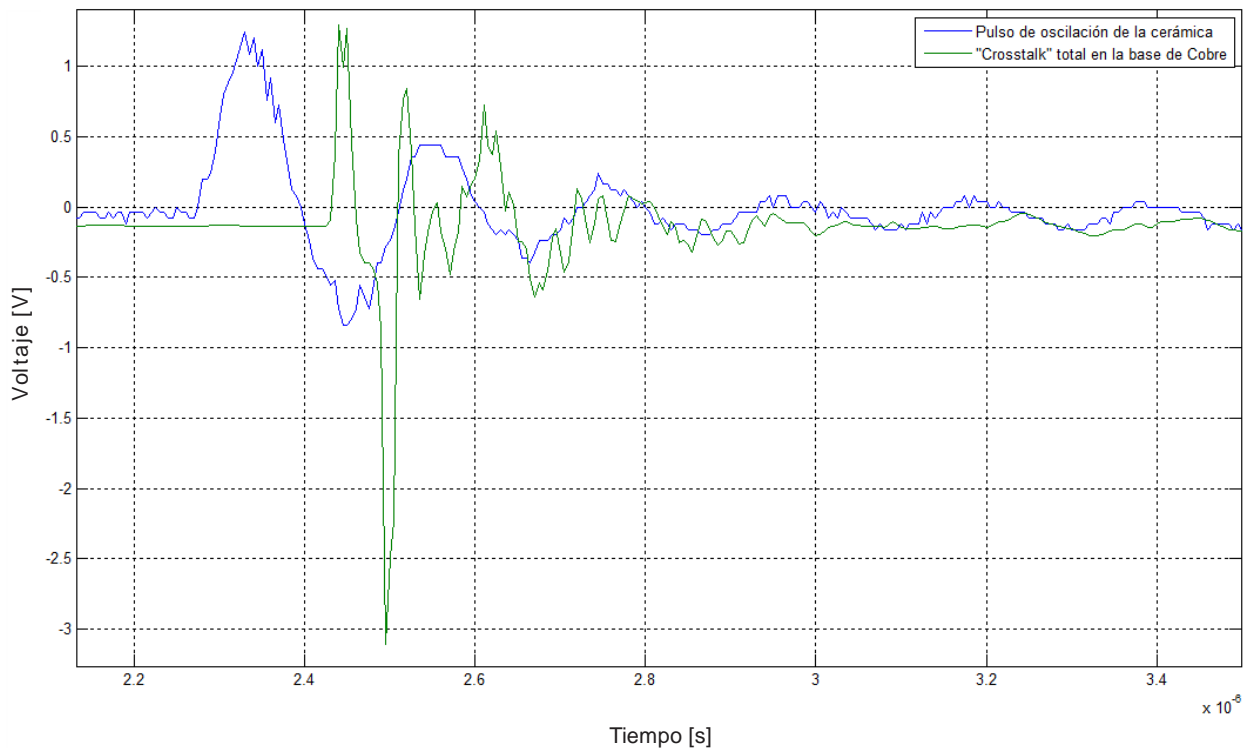


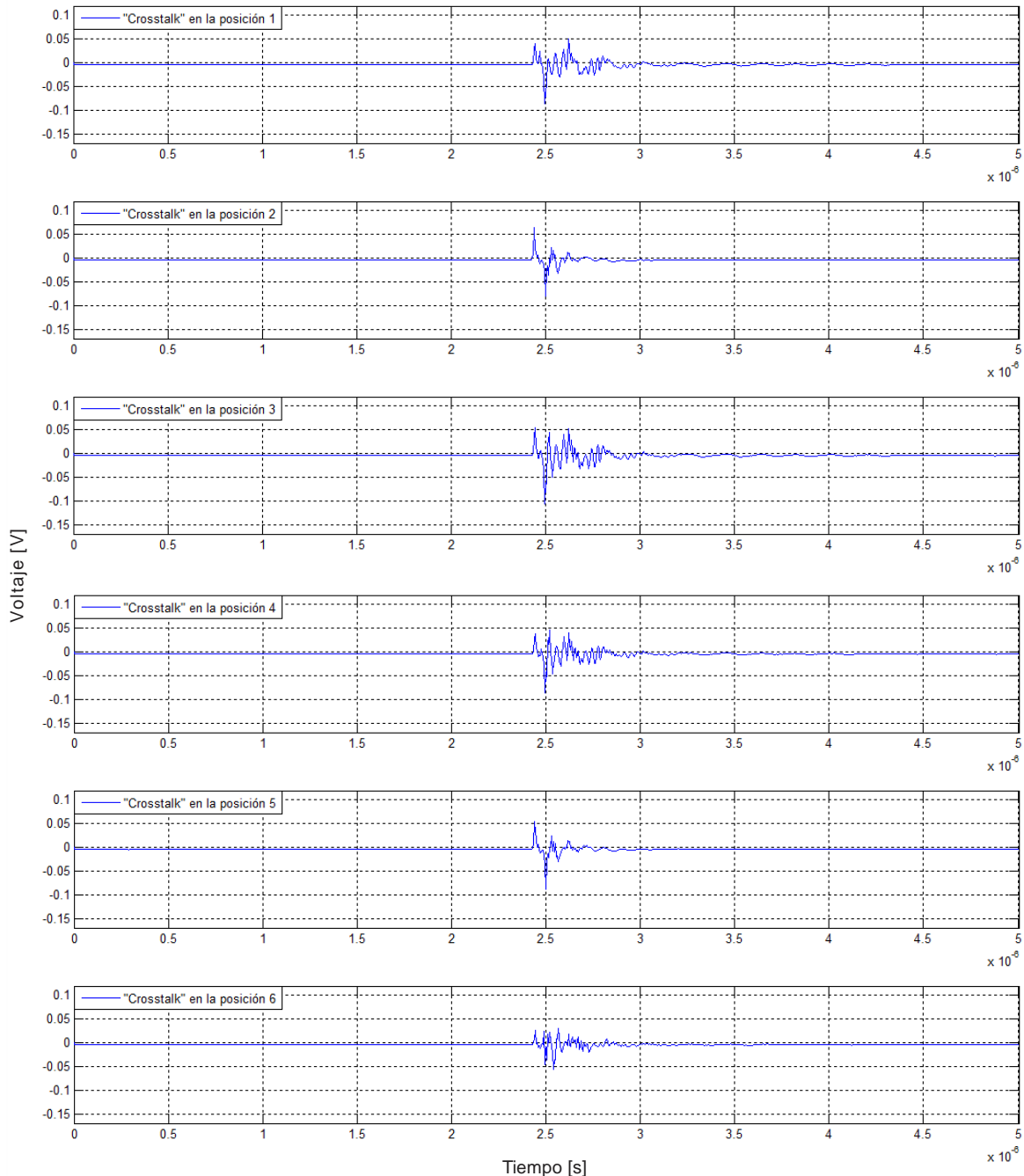
Figura III.2.1.1.5.2. Gráfica de la contribución del “Crosstalk” eléctrico para las configuraciones 1, 2 y 3.

III.2.2. Mediciones del “Crosstalk” Mecánico

Para adquirir las mediciones del “Crosstalk” mecánico se configuró el osciloscopio digital a una escala de 100 [mV] y con una resolución de 500 [ns]; para las mediciones de la respuesta de oscilación de las cerámicas se empleó una escala de 1 [V] y una resolución de 500 [ns].

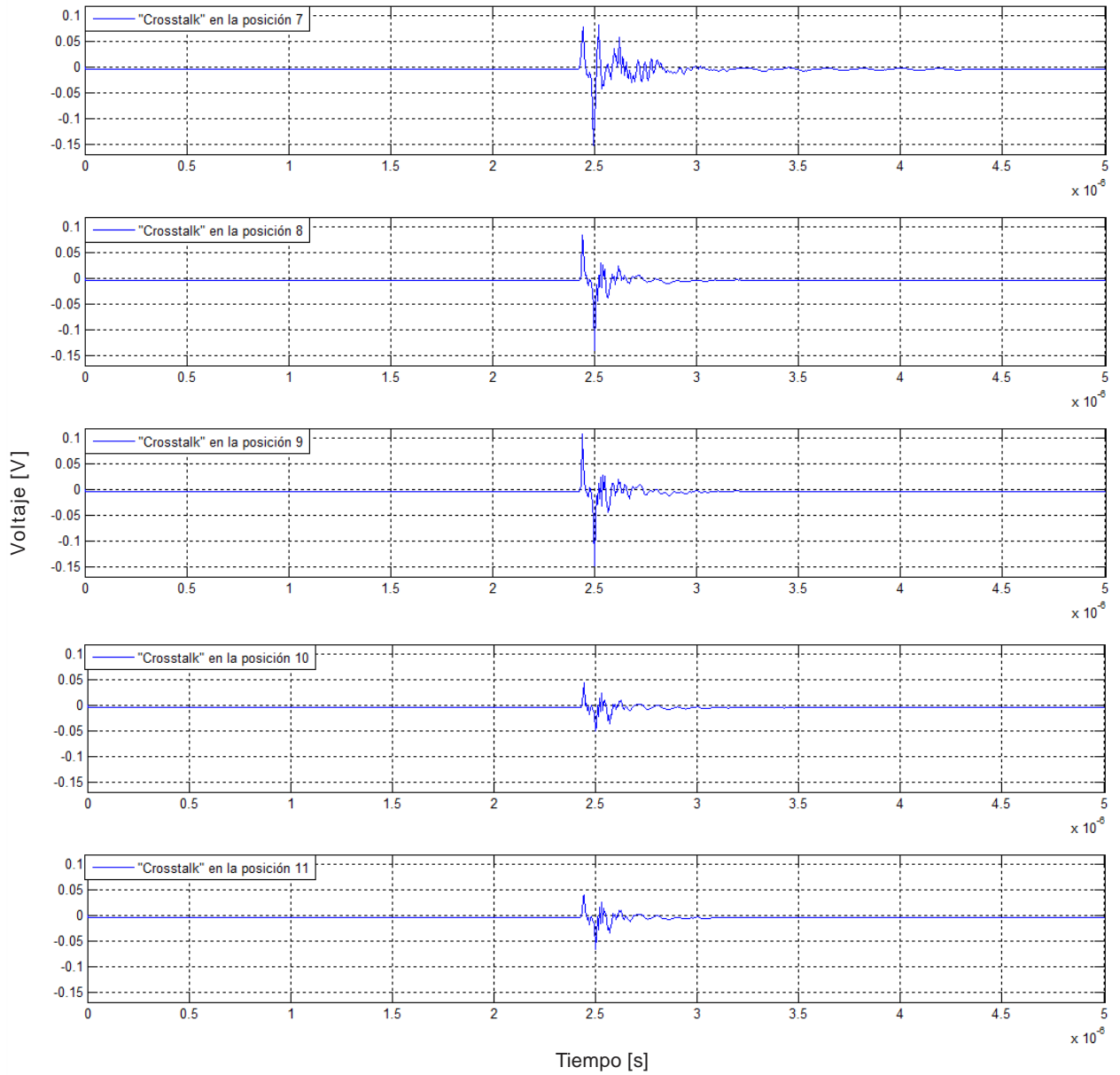
III.2.2.1. “Crosstalk” Mecánico en Cobre

En esta sección se presentan las mediciones del “Crosstalk” mecánico medidas sobre la base de Cobre; las gráficas se muestran en 2-D y 3-D para que se aprecien de forma clara las comparaciones que tiene entre sí y con respecto a la respuesta de oscilación de la cerámica. En la figura III.2.2.1.a se muestra seis de las once mediciones del “Crosstalk” mecánico.



En la figura III.2.2.1.a Seis de las once mediciones del “Crosstalk” mecánico tomadas sobre la base de Cobre.

En la figura III.2.2.1.1.b se muestra las restantes cinco mediciones del “Crosstalk” mecánico, tomadas sobre la base de Cobre.



En la figura III.2.2.1.1.b. Mediciones del “Crosstalk” mecánico.

En la figura III.2.2.1.2 se muestra en 2-D las once mediciones del “Crosstalk” mecánico.

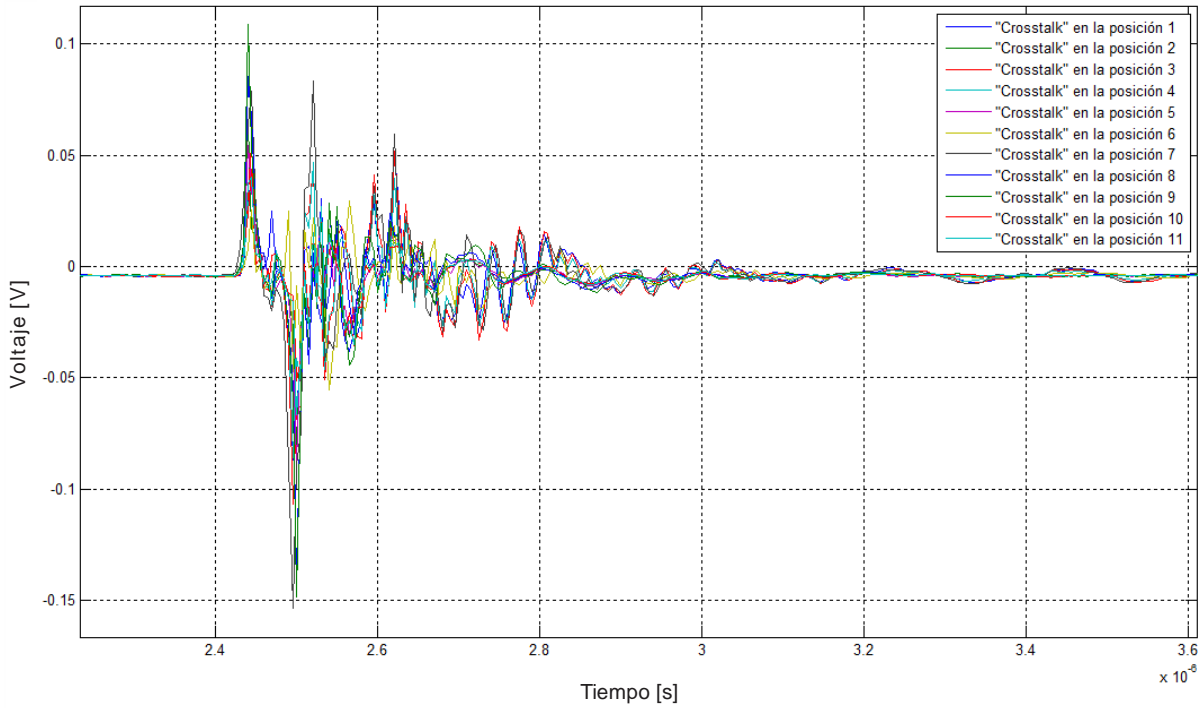


Figura III.2.2.1.2. Gráfica en 2-D con las once mediciones del “Crosstalk” mecánico.

Las mediciones del “Crosstalk” mecánico se presentan en 3-D en la figura III.2.2.1.3.

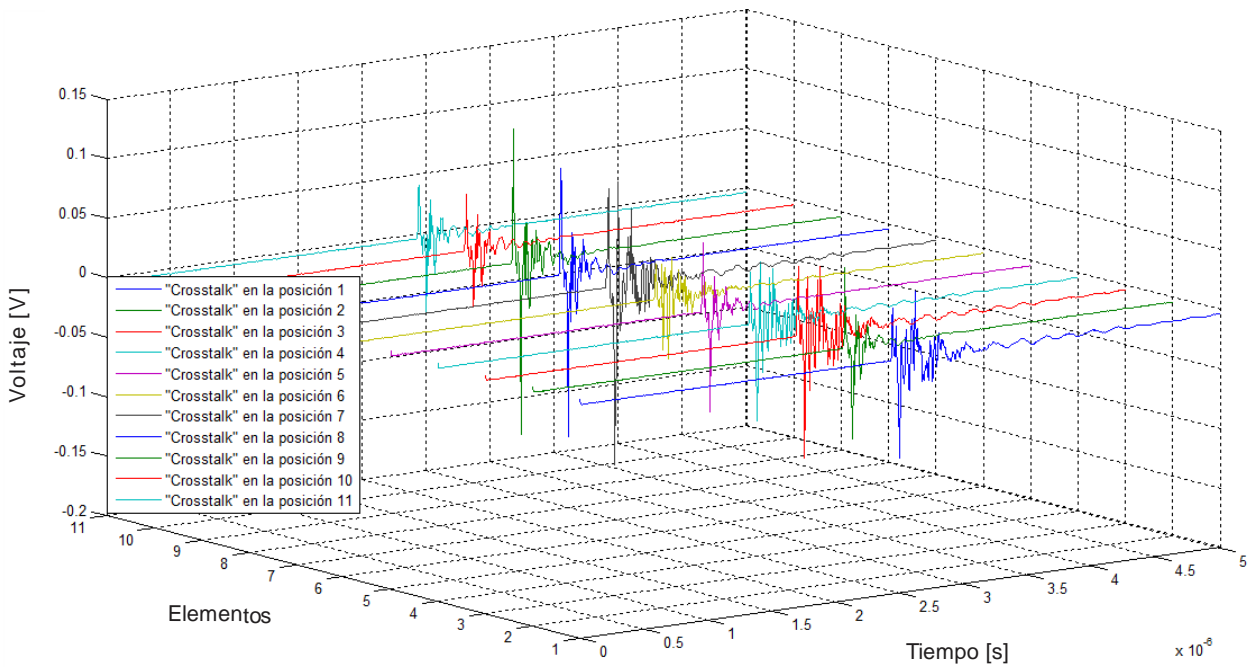


Figura III.2.2.1.3. Gráfica en 3-D con las once mediciones del “Crosstalk”.

La comparación entre la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y las once mediciones del “Crosstalk” mecánico, se presenta en la figura III.2.2.1.4.

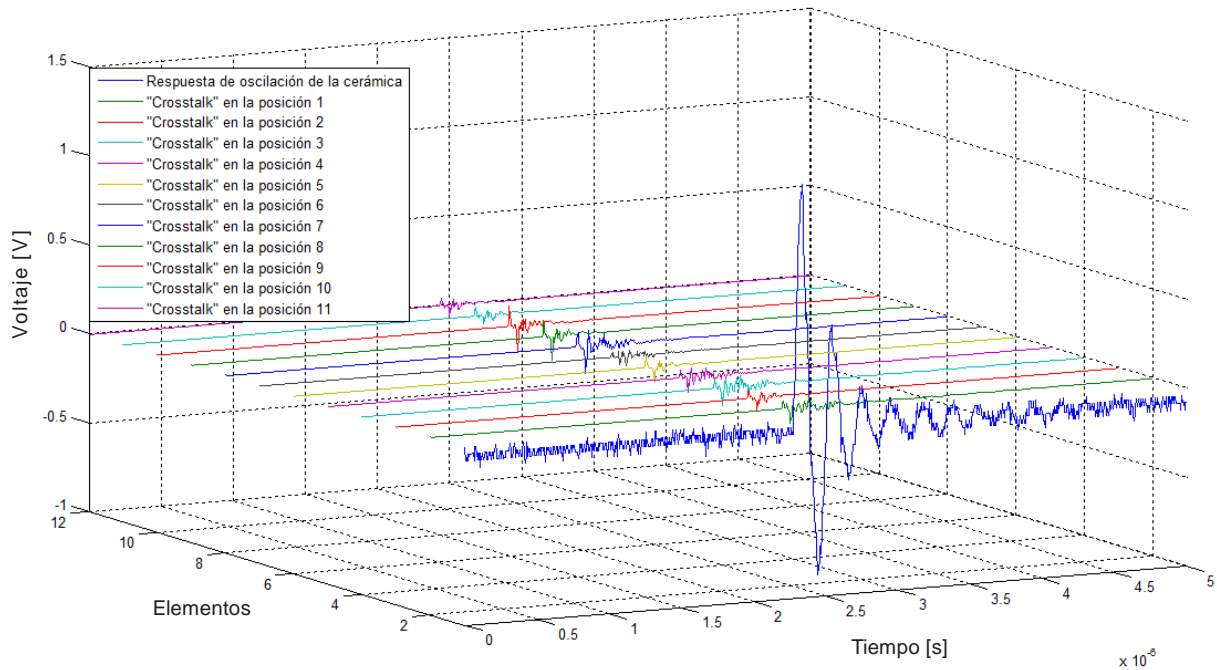


Figura III.2.2.1.4. Gráfica en 3-D con la respuesta de una PZT con las mediciones del “Crosstalk”.

En la figura III.2.2.1.5 se muestra el “Crosstalk” mecánico total medido sobre la base de Cobre y la respuesta de oscilación de una de las cerámicas.

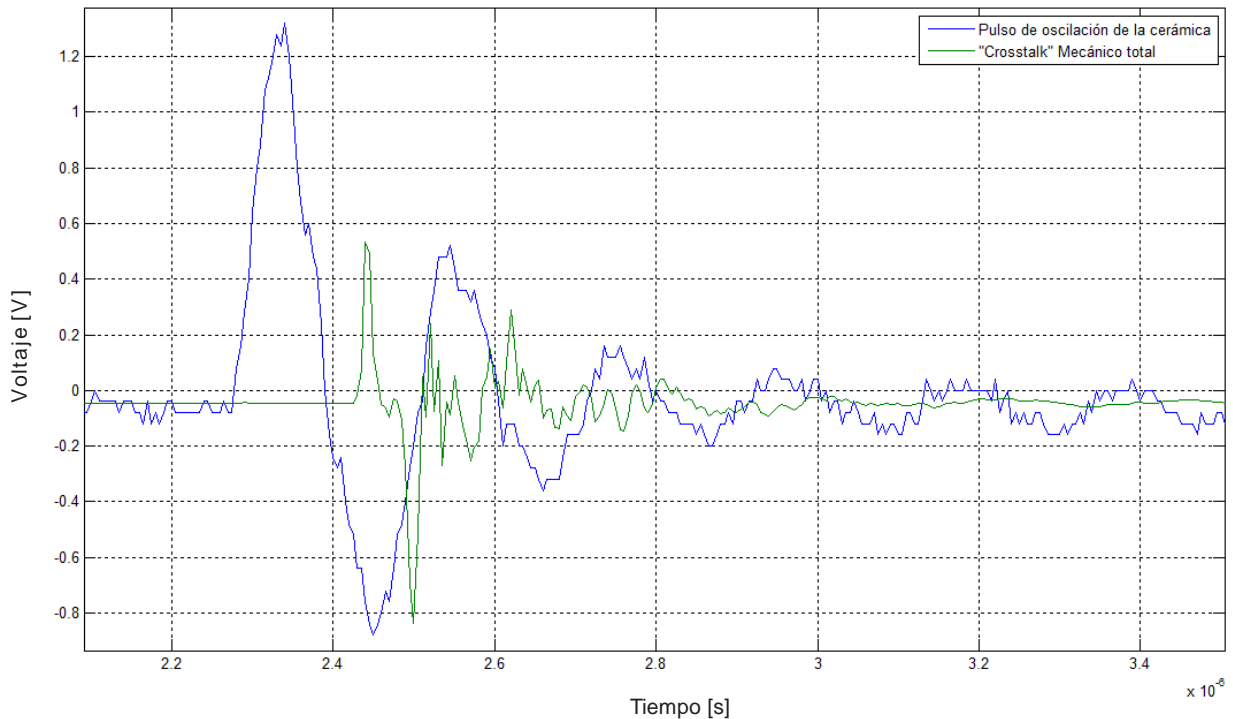


Figura III.2.2.1.5. Gráfica en 2-D con la comparación de la respuesta de una PZT contra el “Crosstalk” total.

III.2.3. Comparación entre el “Crosstalk” Eléctrico y Mecánico en Cobre

En esta sección se presentan el “Crosstalk” eléctrico y mecánico que se midió sobre la base de Cobre empleando la configuración 2; en la figura III.2.3.1 se muestra en 2-D el “Crosstalk” eléctrico y mecánico.

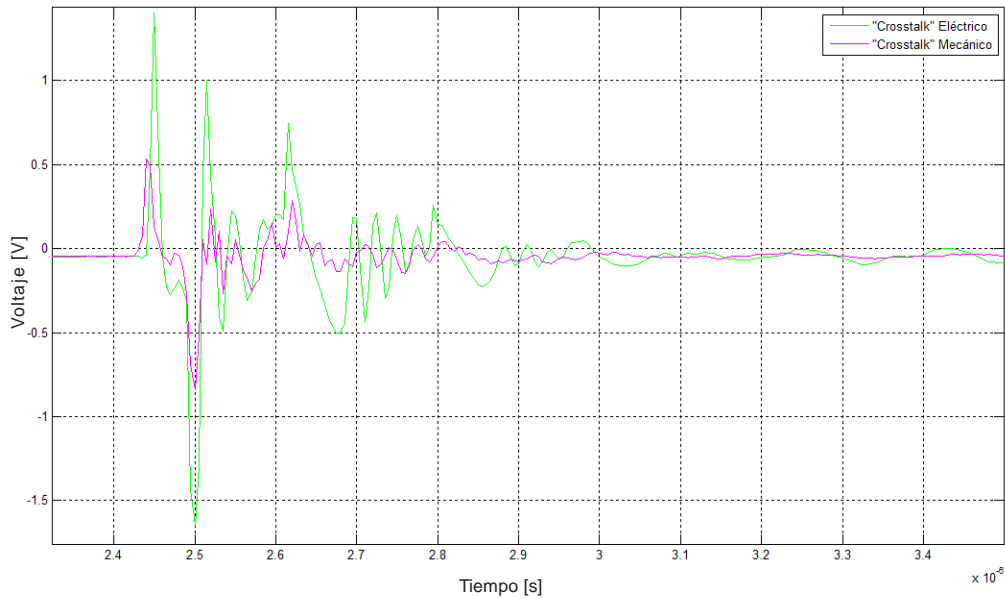


Figura III.2.3.1. Gráfica del “Crosstalk” eléctrico y mecánico en Cobre.

En la figura III.2.3.2 se muestra la respuesta de oscilación de una cerámica contra el “Crosstalk” total obtenido de la sumatoria del “Crosstalk” eléctrico y del “Crosstalk” mecánico, medido en Cobre.

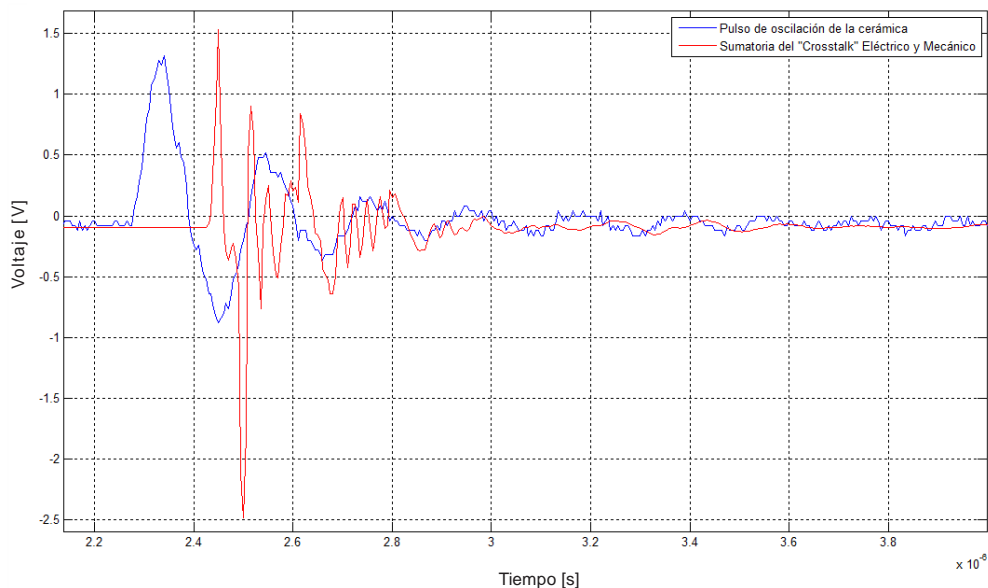


Figura III.2.3.2. Gráfica con la respuesta de una PZT contra el “Crosstalk” total.

III.3. Patrón de Radiación

El patrón de radiación se obtuvo de dos maneras, las cuales fueron descritas en la sección II.4 del capítulo anterior.

Primero se presenta los resultados obtenidos de la simulación realizada a través de Matlab y posteriormente los resultados de la simulación en HP VEE.

III.3.1. Patrón de Radiación obtenido en Matlab

El programa despliega gráficas en donde muestra el campo acústico generado de forma ideal y una adicional con el efecto del “Crosstalk”; después se procedió a empalmar ambas gráficas para poder compararlas. En la figura III.3.1.1 se muestran ambas gráficas en 2-D en donde la gráfica de color rojo es la generada de forma ideal y en azul con el efecto del “Crosstalk”.

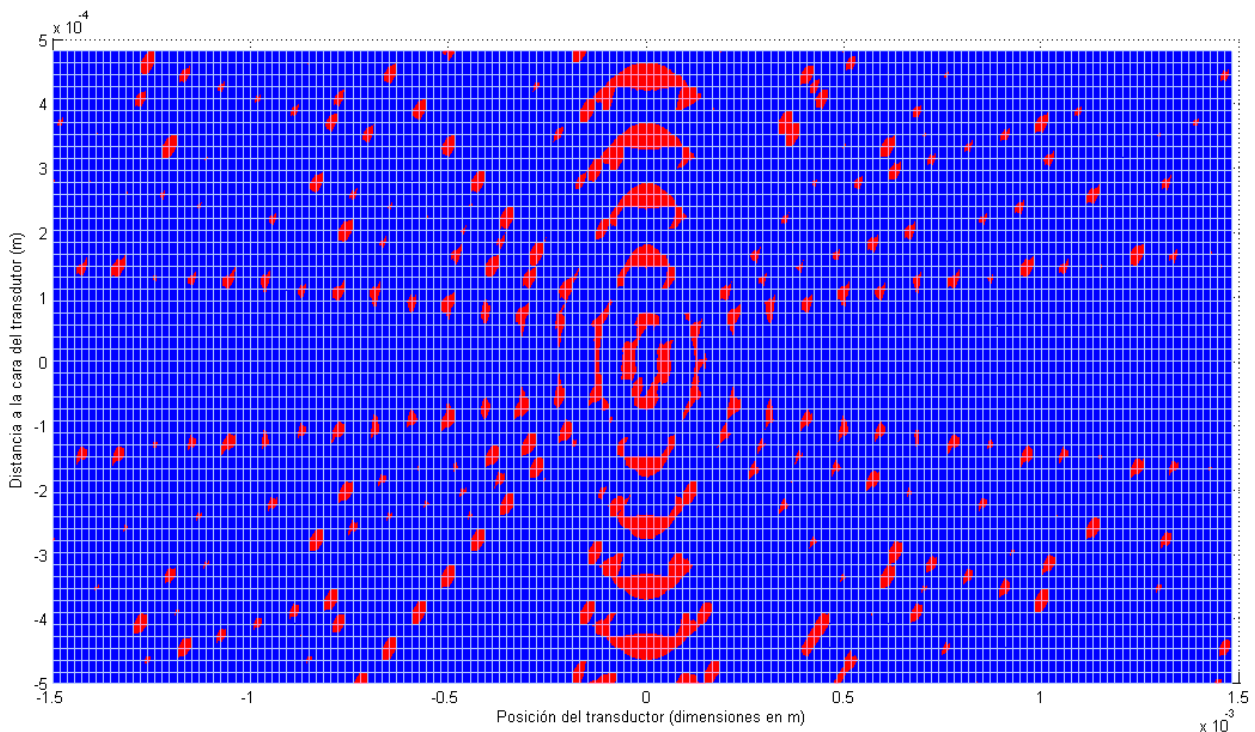
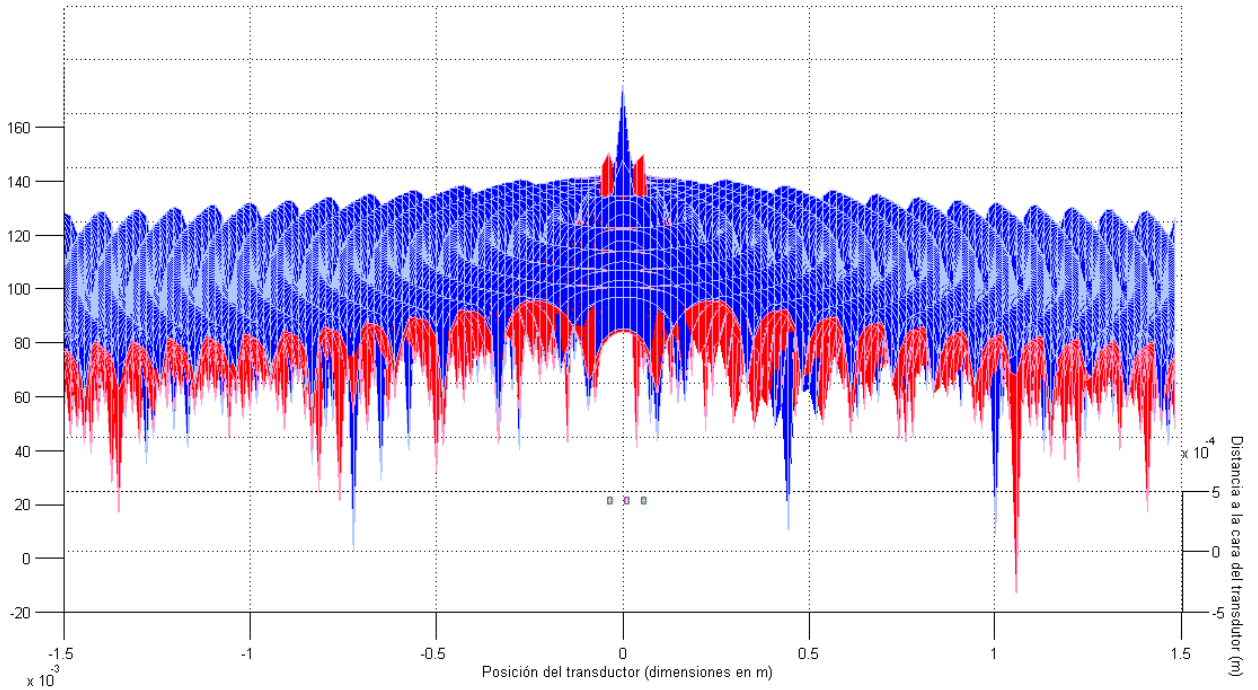


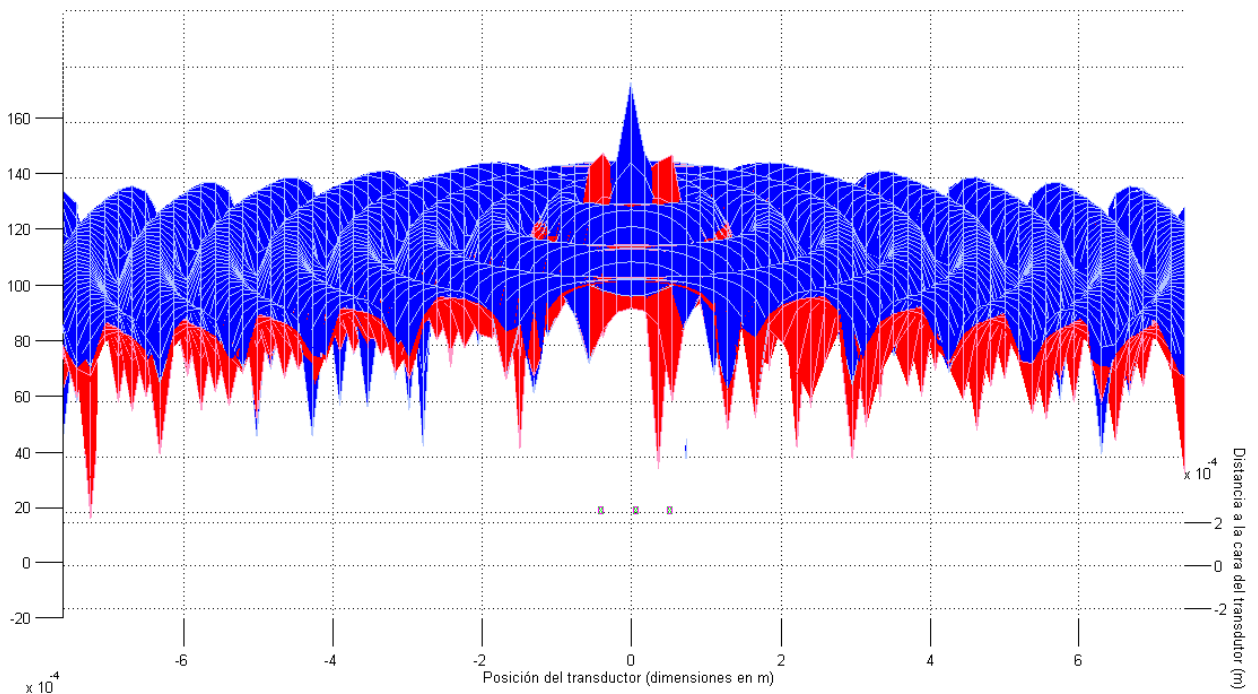
Figura III.3.1.1 Gráfica en 2-D en forma ideal y con “Crosstalk”.

En la figura III.3.1.2 se muestran ambas gráficas rotadas para poder apreciar el pico generado y en donde se observa que la gráfica con “Crosstalk” envuelve casi en su totalidad a la ideal.



En la figura III.3.1.2 Gráfica rotada en 3-D.

La figura III.3.1.3 se hace un zoom para poder apreciar mejor el pico.



La figura III.3.1.3. Zoom de la gráfica donde muestra el pico generado.

En la figura III.3.1.4 se muestra la gráfica rotada.

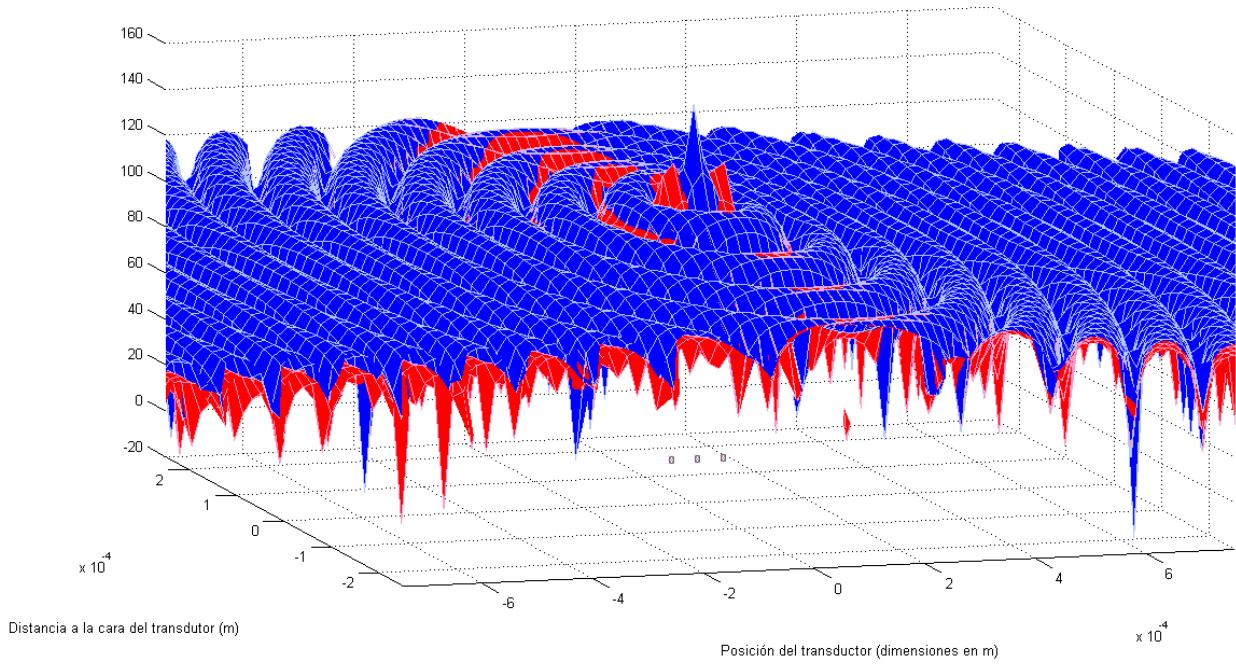


Figura III.3.1.4 Gráfica rotada de forma lateral.

Finalmente se presenta la figura III.3.1.5 en 2-D, donde se observa la envolvente de ambas gráficas; se puede apreciar que la gráfica del “Crosstalk” es mayor a la del caso ideal.

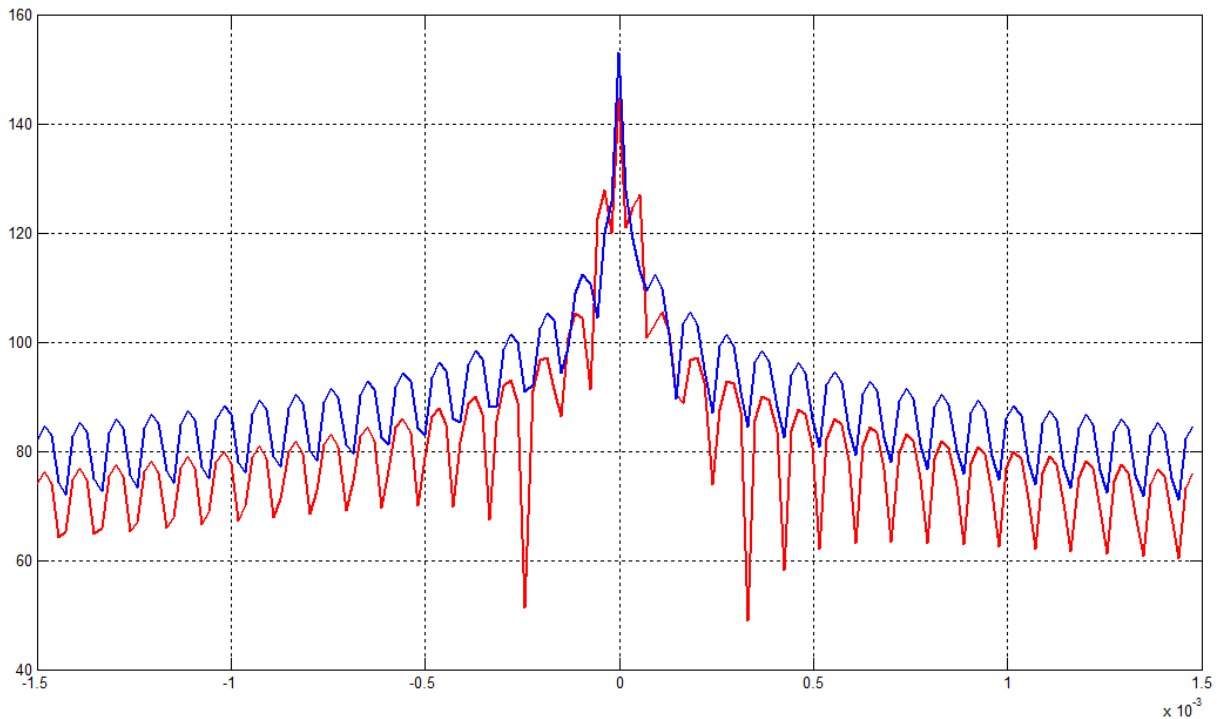


Figura III.3.1.5. Gráfica con las envolventes de ambas figuras.

III.3.2. Patrón de Radiación usando el HP VEE

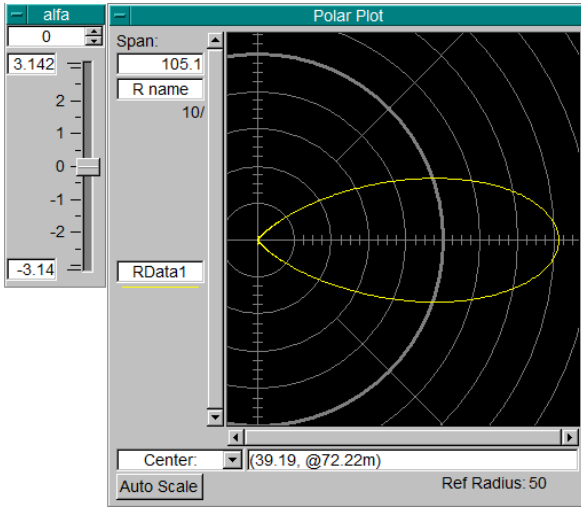
El fenómeno del “Crosstalk” que se presenta en arreglos de transductores piezoeléctricos, es un efecto que se manifiesta debido a diferentes factores, en la simulación realizada en HP VEE4.0 se puede observar que a pesar de que el “Crosstalk” es un factor inherente a los transductores matriciales, también influyen factores que modifican el patrón de radiación como son:

- Dimensiones de las cerámicas
- Distancia entre los elementos
- Frecuencia de trabajo

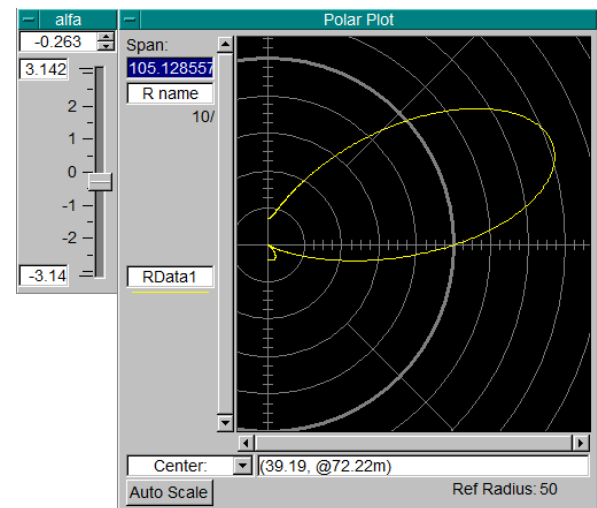
Los cuales van a afectar la respuesta del arreglo; a continuación se presentan las figuras de la simulación, en donde se ejemplifica que cuando son modificados cualesquiera de estos parámetros el patrón de radiación se ve afectado en cuanto a fase o magnitud, e inclusive en algunos casos se modifican tanto la fase como la magnitud.

En la figura III.3.2.1 se muestran cuatro gráficas en donde encontramos que en el inciso a) representa el caso ideal, cuando el valor del “Crosstalk” es nulo.

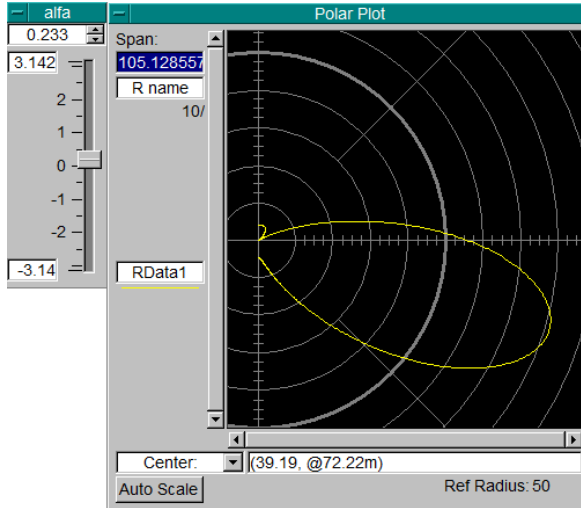
En los siguientes tres incisos (b, c y d) se observa como se ve afectado el patrón de radiación de acuerdo a el valor del “Crosstalk” que se tenga; además se aprecia la aparición de un pequeño lóbulo secundario, además de que en el inciso d) también se observa que se alteró la amplitud del lóbulo principal.



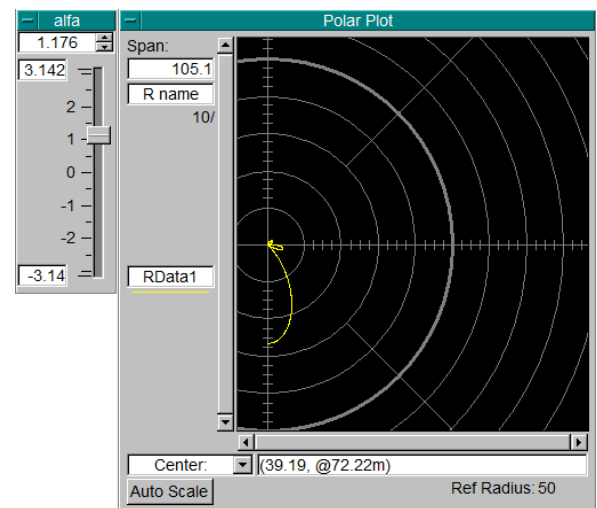
a)



b)



c)

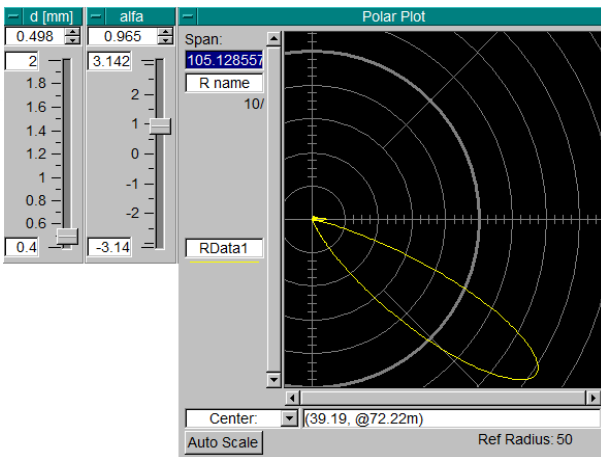


d)

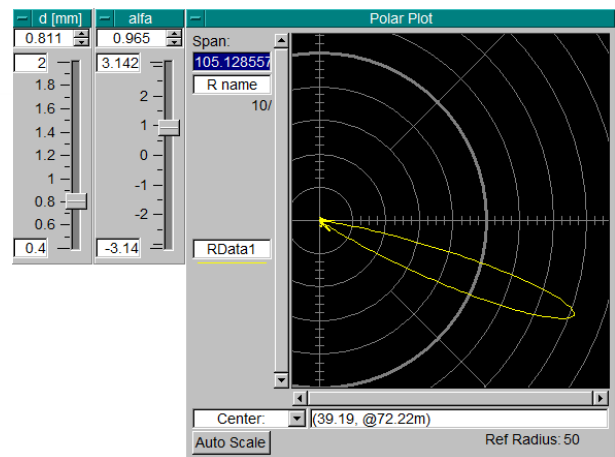
Figura III.3.2.1 Gráficas del patrón de radiación a) Caso ideal b), c) y d) Patrón de radiación con diferentes intensidades de “Crosstalk”.

En la figura III.3.2.2 se presentan cuatro gráficas en donde el parámetro que fue variable es la distancia de separación entre los elementos, igual que en caso anterior el valor del “Crosstalk” tiene un valor constante.

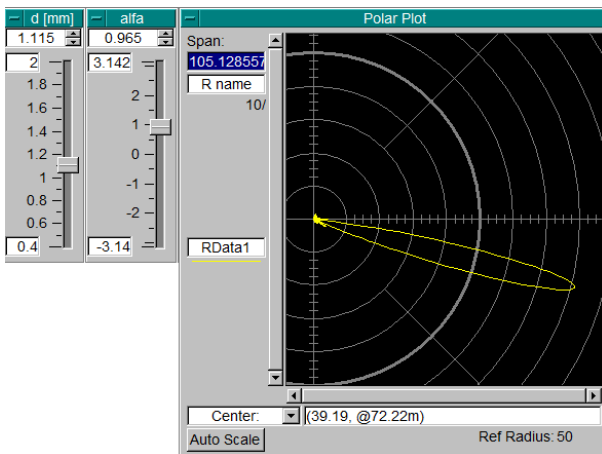
En los cuatro casos la amplitud no presenta una modificación pero sí hay desfase, también se puede observar que existe un estrechamiento en el lóbulo principal y en el inciso d) se presenta la aparición de un lóbulo secundario.



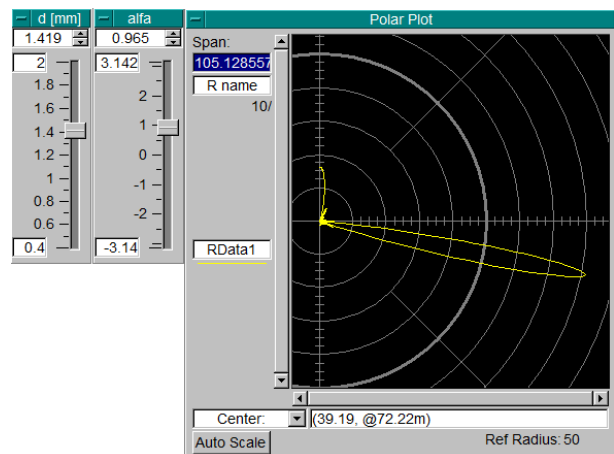
a)



b)



c)



d)

Figura III.3.2.2. Gráficas del patrón de radiación en donde el parámetro de la separación entre elementos fue variable.

Capítulo IV

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo podemos concluir que:

El “Crosstalk” eléctrico obtenido de la simulación en COMSOL se manifiesta en diferentes intensidades y con diferentes fases; del análisis de cada gráfica se obtuvo un valor cuantitativo del “Crosstalk” total que se generó en el arreglo de 3x3 elementos, el cual resultó ser de una magnitud de 1.1244 [V]; que de acuerdo al voltaje aplicado al arreglo representa el 9.3%. Este porcentaje nos dice que el “Crosstalk” es de una magnitud significativa por lo que se tiene que considerar para conocer los efectos que pueda tener sobre el haz de radiación principal.

De las mediciones experimentales adquiridas sobre la base de Cobre, se comprobó la existencia del “Crosstalk” eléctrico; las señales tomadas en los distintos puntos de medición demuestran ser entre ellas de una magnitud y fase similar; al comparar el “Crosstalk” con la respuesta de oscilación de la cerámica se observa un considerable desfase, además de que el “Crosstalk” total es de una mayor magnitud que de la respuesta de la cerámica.

De las mediciones experimentales en Cobre en donde fue posible medir el “Crosstalk” eléctrico de forma significativa, podemos determinar que tanto la posición de las cerámicas así como el material utilizado para la base influye en la presencia, amplitud y desfase del “Crosstalk” eléctrico.

Para las mediciones del “Crosstalk” mecánico sobre la base de Cobre, la presencia del “Crosstalk” fue verificada, las gráficas generadas con Matlab muestran que las señales presentan una amplitud y fase similares entre sí. El “Crosstalk” mecánico total obtenido del arreglo presenta un desfase y una amplitud menor cuando se le compara con la respuesta de oscilación de la cerámica.

Al comparar el “Crosstalk” eléctrico y el “Crosstalk” mecánico, para la base de Cobre, se observan contrastes en cuanto a las magnitudes; el “Crosstalk” eléctrico es mayor que el mecánico; para ambas señales presentan desfase cuando se comparan contra la respuesta de oscilación de la cerámica.

En función de lo observado en las mediciones del “Crosstalk” mecánico, la selección del material que se utilizará como base; tomando en cuenta sus propiedades mecánicas ocasionará diferentes intensidades del “Crosstalk” mecánico.

En la simulación de Matlab, donde se obtiene el patrón de radiación que genera un arreglo, se observa que el efecto del “Crosstalk” modifica el campo acústico haciéndolo más estrecho.

En los resultados obtenidos de la simulación en HP VEE muestran que el efecto del “Crosstalk” puede modificar el patrón de radiación generado por el arreglo, además de las variaciones que pueden tener factores como son:

- Frecuencia de Trabajo
- Dimensiones de los elementos
- Distancia entre los elementos

También pueden modificar el patrón de radiación.

Por último es importante señalar que para diseñar un transductor matricial hay que considerar que la variación que presenten cualquiera de los siguientes factores:

- El material con el que se construirá la base
- Frecuencia de Trabajo
- Dimensiones de los elementos
- Distancia entre los elementos

Pueden generar diferentes intensidades de “Crosstalk” el cual afectara el desempeño del transductor.

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo, se pueden proponer trabajos futuros como son: identificar los tipos de materiales de acuerdo a sus propiedades acústicas, que se pueden emplear como base para poder minimizar el fenómeno del “Crosstalk”; usar cerámicas piezoeléctricas con diferente frecuencia de resonancia y por ende con diferentes dimensiones, con las que se podrá observar si existen variaciones en el “Crosstalk”.

Bibliografía

- [1] GRANDA, Miguel; Mercedes. *Instrumentación electrónica: Transductores y acondicionamiento de señales*. Santander Universidad de Cantabria, 2010.
- [2] APC international, Ltd. *Piezoelectricity*. Disponible en web en: <<http://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>>.
- [3] *Bases físicas del ultrasonido*. Disponible en web en: <<http://www.gonzalodiaz.net/ultrasonido/ultrasonidos/ultrasonido.shtml>>
- [4] SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel; LÓPEZ JIMÉNEZ, Miguel; ACEVEDO CONTLA, Pedro. *Análisis al fenómeno del "Crosstalk" eléctrico en arreglos de transductores ultrasónicos*. 2st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences ICIAS 2011, Puebla, Puebla, México, ISBN 978-607-02-2298-6.
- [5] APC international, Ltd. *Application of piezoelectric ceramics*. Disponible en web en: <<http://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/applications.html>>
- [6] Olympus. *Inside a Phased Array Transducer*. Disponible en web en: <<http://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/transducers/inside/>>
- [7] APC international, Ltd. *Modes of Vibration for Piezoelectric Elements*. Disponible en web en: <<http://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/vibration.html>>
- [8] ANTÚNEZ GONZÁLEZ, René. *Diseño y caracterización mediante el método de los elementos finitos de un transductor ultrasónico para aplicaciones médicas*. Tesis de Licenciatura, UNAM, México D.F., 2011.

- [9] AGHZOUT, Otman; GÓMEZ DÉNIZ, Luis. *Crosstalk en líneas de interconexión para una tecnología CMOS de 0.18 μ m*. Dpto. Ingeniería Electrónica y Automática Universidad de Las Palmas de G. C., Las Palmas 35017, Spain.
- [10] VON KRÜGER, Marco Antônio. *Doppler Ultrasound Tracking Instrument Blood for Monitoring Flow*. Thesis of Doctor of Philosophy, University of Leicester, October 2000.
- [11] SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel; VON KRÜGER, Marco Antônio. *Metodología para la evaluación del "Crosstalk" en Transductores matriciales*. XVIII Congreso Brasileño de Ingeniería Biomédica. Sao Jose dos Campos, SP, Brasil, 2002, pp. 224 - 227.
- [12] SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel. *Metodología para la evaluación del "Crosstalk" en Transductores Ultrasónicos Matriciales*. MSc. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro 2003.
- [13] SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel; ACEVEDO CONTLA, Pedro; LÓPEZ JIMÉNEZ, Miguel. *Construcción y caracterización de un arreglo ultrasónico utilizando diferentes materiales como backing, para evaluar el "Crosstalk"*. IV International Conference on Surfaces, Materials and Vacuum 2011, Puerto Vallarta, Jalisco, México, Proceeding CD.
- [14] CERTON, Dominique; et ál. *Investigation of Cross-Coupling in 1-3 Piezocomposite Array*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 48, No. 1, January 2001, pp. 85 - 92.
- [15] ROH, Yongrae; KHURI-YSKUB, Butrus T. *Finite Element Analisis of Underwater Capacitor Microms chined Ultrasonic Transducers*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 49, No. 3, March 2002, pp. 293 - 298.
- [16] QI, Wenkang; CAO Wenwu. *Finite Element Study 1-D Array Transducer Desing*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 47, No. 4, July 2000, pp. 949 - 955.
- [17] RAYAS-SÁNCHEZ, José Ernesto. *A frequency-domain Approach to Interconnect Crosstalk Simulation and Minimization*. Departament of Electronics, Systems and Informatics. ITESO University.

- [18] GUESS, J. F.; OAKLEY, C. G.; MORGAN, R. D. Cross-talk Paths in Array Transducers. IEEE Ultrasonics Symposium, 1995, pp. 1279 - 1282.
- [19] SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel; VON KRÜGER, Marco Antônio; MORENO, E. *Simulación del Cross-talk aplicado para los CMUT's, basado en resultados experimentales realizados con array de transductores piezoeléctricos*. XX CBED, 2006, pp. 1336 - 1339.
- [20] LAMBERTI, Nicola. *Radiation Pattern Distortion Caused by Interelement Coupling in Linear Array Transducers*. IEEE Ultrasonics Symposium, 1999, pp. 1071 - 1075.
- [21] SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel; ACEVEDO CONTLA, Pedro; FUENTES, Martín. *The use of a novel acoustic matching material in the construction of an ultrasonic Doppler transducer for medical application*. IEEE catalog, Lima, Peru, March 2010, pp. 3 - 7.
- [22] FELIX, Nicolas; et ál. *Experimental Investagation of Cross-Coupling and its Influence on the Elementary Radiation Pattern in 1D Ultrasound Arrays*. IEEE Ultrasonics Symposium, 1999.
- [23] LEE, Wonseok; ROH, Yongrae. *Optimal desing of a piezoelectric 2D array transducer to minimize the coss talk between active elements*. IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2009, pp. 2738 - 2741.
- [24] ACEVEDO CONTLA, Pedro; SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ, Israel; ZAMORA VÁSQUEZ, Amado. *Improvement desing and construction of an ultrasonic transducer applied to blood flow measurement*. 1^{et} International Congress on Instrumentation and Applied Sciences, ICIAS, Cancun Quintana Roo, México, Octubre 26 al 29 de 2010, Paginas 1-7 sección scientific, memorias en CD, ISBN 978-607-020840-9.
- [25] STATE, M.; LEDOUX, L.; VAN DE VOSSE, F. N. *Finite element modeling of mechanical cross-coupling in 1-D ultrasound array*. Department of Biomedical Enginnering, Technische Universiteit Eindhoven.
- [26] SAKURAI, Takayasu. *Closed-Form Expressions for Interconnection Delay, Coupling, and Crosstalk in VLSI's*. IEEE Transactions on Electron Divices, vol. 40, no. 1, January 1993, pp. 118 - 124.

Apéndice



Cerámica Comercial Piezoeléctrica

PIC 255



Piezo Material Data

SPECIFIC PARAMETERS OF THE STANDARD MATERIALS

PIEZOCERAMIC MATERIALS

General Description

PI Ceramic offers a wide selection of piezoelectric ceramic materials based on modified lead zirconate titanate (PZT) and barium titanate, tailor-made for diverse applications. Apart from the standard types described in detail below, we can perform a multitude of application-specific and custom-engineered modifications. PIC materials compare favorably with the best materials internationally available today. The properties are specified according to the EN 50324 European Standard.

On an international basis, it is usual to divide piezo ceramics into two groups. The antonyms "soft" and "hard" PZT ceramics refer to the ferro-electric properties, i.e. the mobility of the dipoles or domains and hence also to the polarization / depolarization behavior.

"Soft" piezo ceramics are characterized by a comparatively high domain mobility and a resulting "ferroelectrically soft" behavior, i.e. relatively easy polarization.

In contrast, ferroelectrically "hard" PZT materials can be subjected to high electrical and mechanical stresses. The stability of their properties destines them for high-power applications.

Material designation	General description of the material properties "Soft"-PZT	Classification in accordance with EN 50324-1	ML-Standard DOD-STD-1376A
PIC255	Material: Modified Lead Zirconate-Lead Titanate Characteristics: Very high Curie temperature, high permittivity, high coupling factor, high charge coefficient, low mechanical quality factor, low temperature coefficient Suitable for: Actuator applications for dynamic operating conditions and high ambient temperatures (PICA Power series), low-power ultrasonic transducers, non-resonant broadband systems, force and acoustic pickups, DuraAct patch transducers, PICA Shear shear actuators	200	II

Material Data

Material type		PIC 255	
Parameter			
Physical and dielectric properties			
Density	ρ (g/cm ³)	7.80	
Curie temperature	T_c (°C)	350	
Permittivity	in the polarization direction $\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	1750	
	perpendicular to the polarity $\epsilon \quad \epsilon$	1650	
Dielectric loss factor	$\tan\delta$	20	
Electromechanical properties			
Coupling factors	k_p	0.62	
	k_t	0.47	
	k_{31}	0.35	
	k_{33}	0.69	
	k_{15}	0.66	
Piezoelectric charge constants	d_{31}	-180	
	d_{33}	400	
	d_{15}	550	
Piezoelectric voltage constants	g_{31}	-11.3	
	g_{33}	25	
Acousto-mechanical properties			
Frequency constants	N_p	2000	
	N_1	(Hzm)	1420
	N_3		
	N_t	2000	
Elastic constants (compliance)	S_{11}^E	(10 ⁻¹² m ² /N)	16.1
	S_{33}^E		20.7
Elastic constants (stiffness)	C_{33}^D	(10 ¹⁰ N/m ²)	
Mechanical quality factor	Q_m		80
Temperature stability			
Temperature coefficient of ϵ_{33} (in the range -20°C up to +125°C)	$TK \quad \epsilon_{33}$ (x10 ⁻³ /K)		4
Aging stability (relative change of the parameter per decade in %)			
Relative dielectric constant	C	(%)	-1.0
Coupling factor	C_K		-1.0

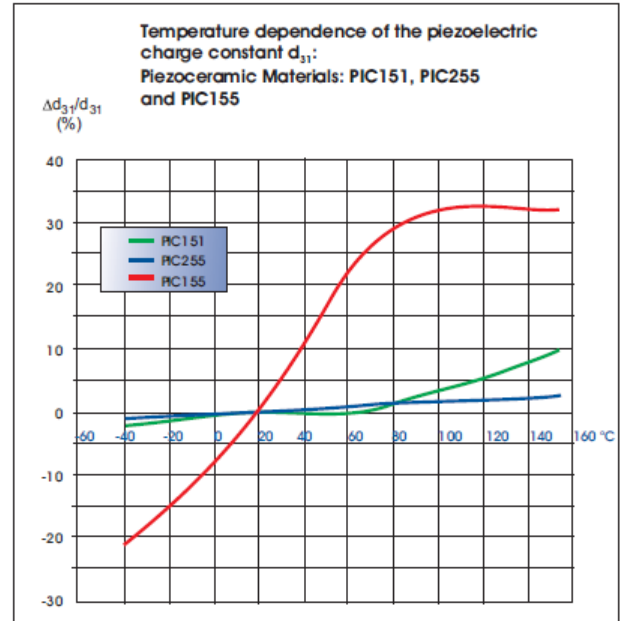
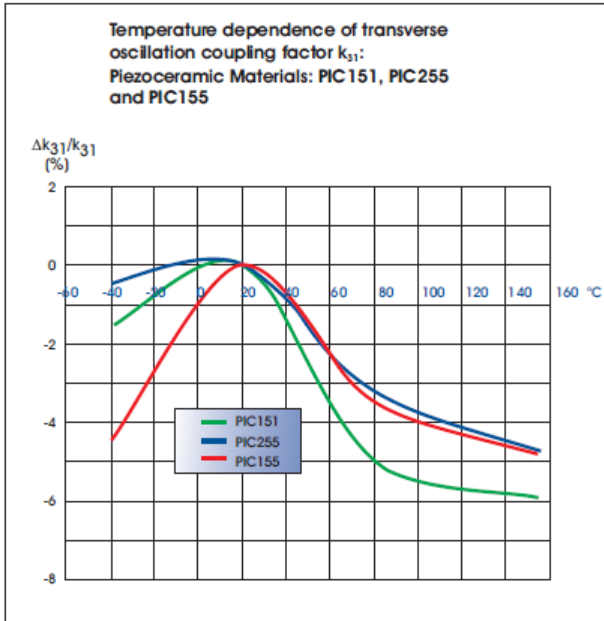
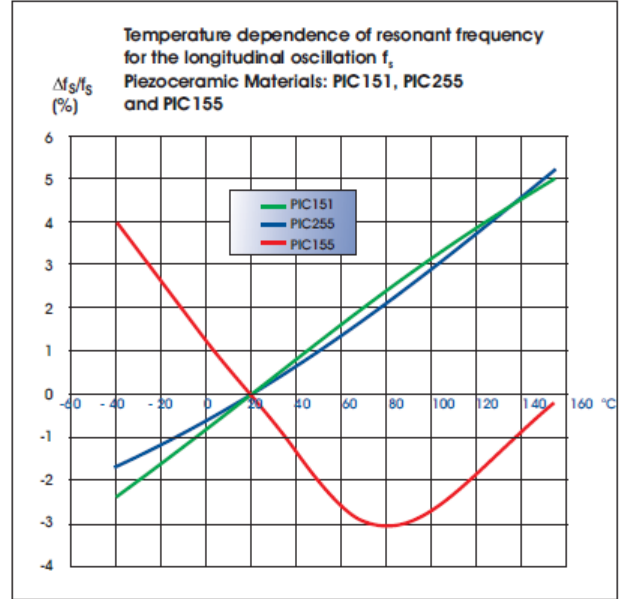
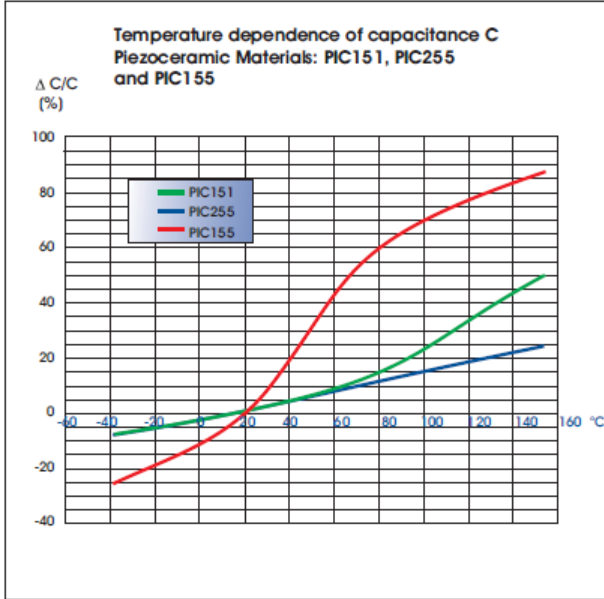
1. The data in the following tables was determined using test bodies with geometries and dimensions in accordance with European Standard EN 50324 2, and are typical values.
2. The data given represents nominal values which were determined on these test bodies 24 h - 48 h after polarization and at an ambient temperature of 23 ± 2 °C.
3. Conformance to these typical values is documented by constant testing of the individual material batches before they are released.
4. The properties of the products are determined in relation to the geometry, variations of the manufacturing process and measurement or control conditions.
5. Questions regarding interpretation of the material properties of a product are best clarified with PI Ceramic's specialists.
6. A complete coefficient matrix of the materials is available on request.

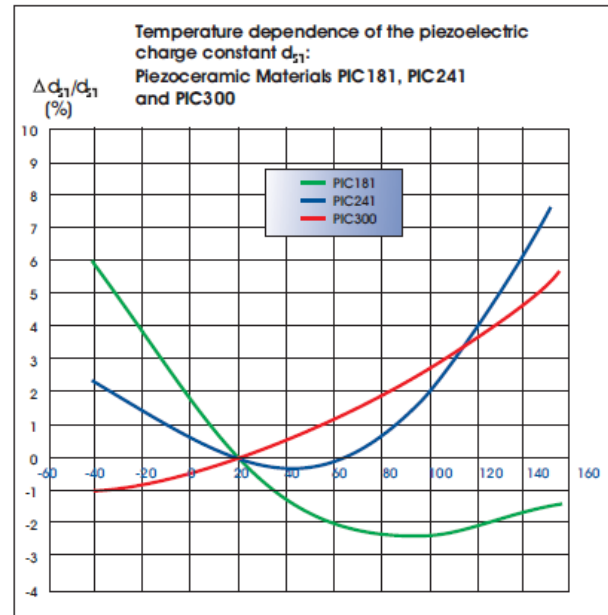
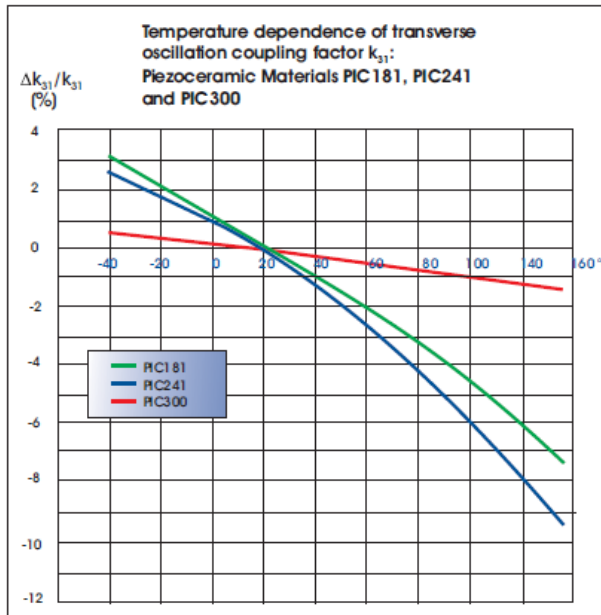
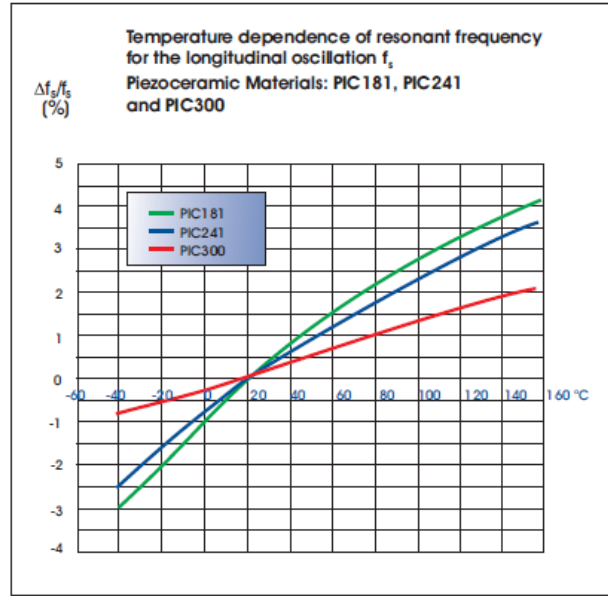
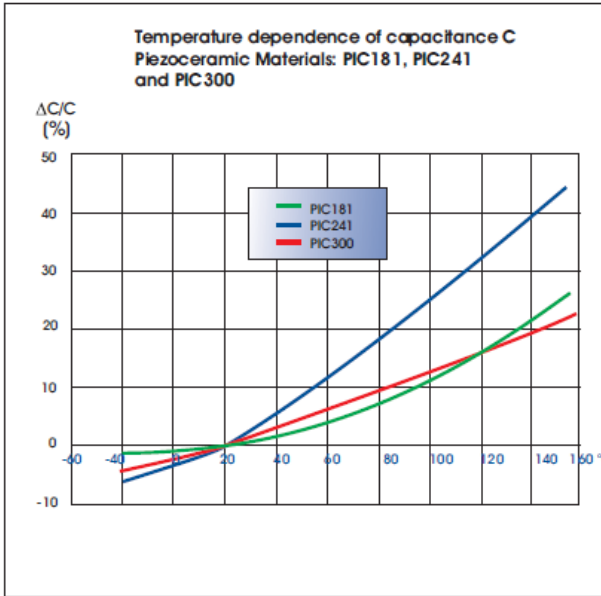
Further information:

The following values are valid approximations for all PZT materials from PI Ceramic.

Specific heat capacity	HC = approx. 350 J / kg K
Specific thermal conductivity	TC = approx. 1.1 W / m K
Poisson's ratio	σ = approx. 0.34
Coefficient of thermal expansion	α_3 = approx. -4 to -6 x 10 ⁻⁶ / K (in the polarization direction, shorted) α_{\perp} = approx. 4 to 8 x 10 ⁻⁶ / K \perp to the polarization direction, shorted)
Static compressive strength	larger than 600 Mpa

Temperature Dependence of the Coefficients





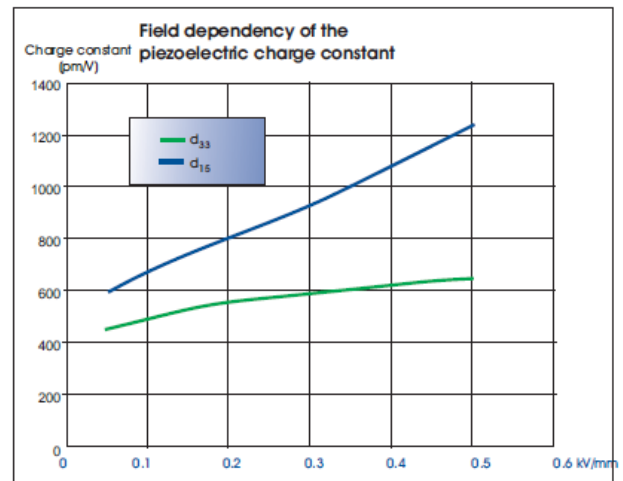
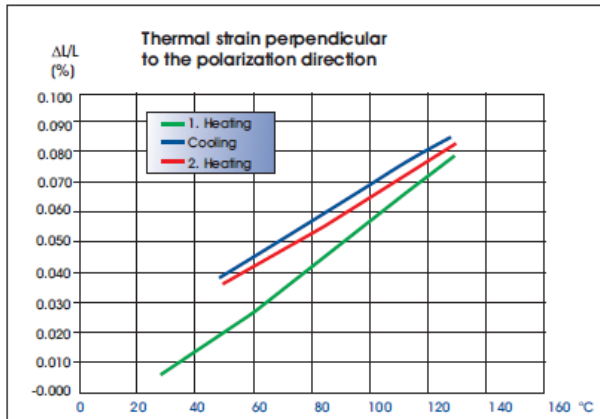
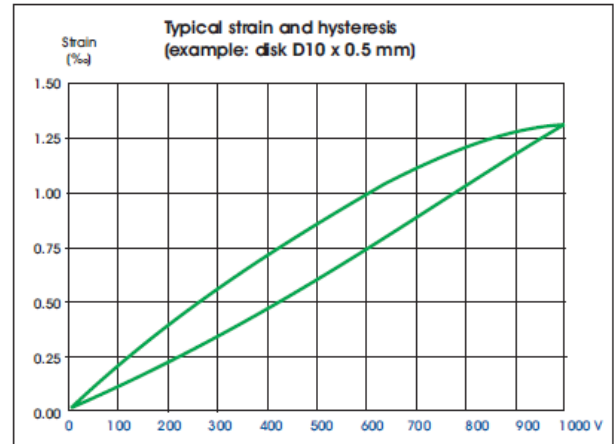
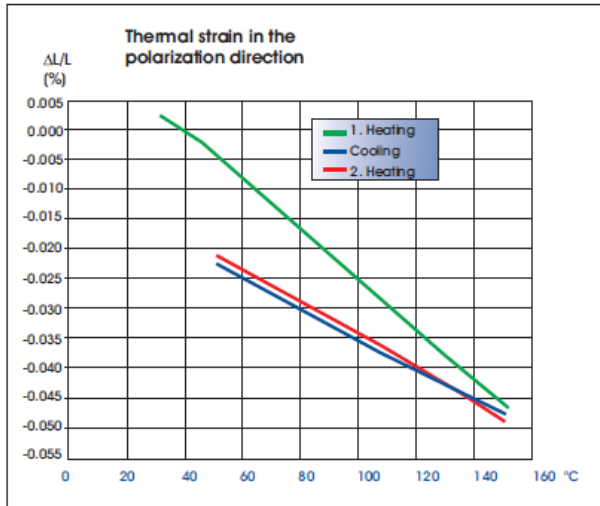
Specific Characteristics

Thermal expansion
example with PZT ceramic PIC 255

- The thermal strain exhibits different behavior in the polarization direction and perpendicular to it.
- The preferred orientation of the domains in a polarized PZT body leads to an anisotropy. This is the cause of the varying thermal expansion behavior.
- Non-polarized piezo ceramic is isotropic. The coefficient of expansion is approximately linear with a CTE of approx. $2 \times 10^{-6} / K$.
- The effect of successive temperature changes must be given particular consideration in the application. Large changes in the curve can occur especially in the first temperature cycle.
- Depending on the material, it is possible that the curves deviate substantially from those illustrated.

Deformation behavior
example with PZT ceramic PIC 255

- In the case of large-signal fields (max. 2 kV/mm), the strain of a piezoceramic is associated with reversible and irreversible domain reorientation processes.
- The domain reorientations cause larger deformations in the ceramic elements than can be calculated from the piezo coefficients given in the table (small-signal values).
- The irreversible domain reorientations lead to hysteresis in the strain behavior.





Conductive Epoxy CW2460

CHEMTRONICS® Technical Data Sheet

TDS CW2460

60 Minute Conductive Epoxy

PRODUCT DESCRIPTION

The 60 Minute Conductive Epoxy is a two part, silver epoxy used in prototype, repair and general solder-less conductive bonding applications. It features strong mechanical bonds, excellent electrical conductivity, and extended pot life for increased work time. Components can be easily placed and replaced before full cure occurs. For accelerated cure, simply heat material to 212°F (100°C). This conductive epoxy bonds aggressively to a wide variety of materials.


- Two-component product with simple mixing ratios
- 60 minute work time offers increased workability and extended pot life
- Excellent electrical and thermal conductivity
- High strength bond adheres dissimilar surfaces
- Operating temperature range from -67°F (-55°C) to 300°F (150°C)

TYPICAL APPLICATIONS

60 Minute Conductive Epoxy may be used for electronics applications including:

- Conductive Bonds Between Heat Sensitive Components
- Solderless Surface Mount Connections
- Circuit Board Trace Repair
- Static Discharge and Grounding
- Solder Repair
- Conductive Structural Adhesions

TYPICAL PRODUCT DATA AND PHYSICAL PROPERTIES

Composition		
Material	Part A Part B	Adhesive Hardener
Color	Part A Part B	Bright Silver Gray Silver
Silver content	>75%	
Cured Compound		
Volume Resistivity	<0.001 ohm-cm	
Thermal Conductivity		
Cal-cm/sec-cm ² -°C	3.8 x 10 ⁻³	
BTU-in/hr-ft ² -°F	11.0	
W/m ² K	1.6	
Operating Temperature Range	-67°F to 300°F (-55°C to 150°C)	
Tensile Lap Shear (ASTM D-1002)	>70-140 Kgm-cm ²	
Shore D Hardness	>70	
Adhesion	Excellent	
Cured Flexibility	Excellent	
Chemical Resistance	Excellent	
Moisture Resistance	Good	
Typical Thickness	5 mil	
Shelflife	12 months - Store at temperatures below 120° F	
RoHS Compliant		

COMPATIBILITY

60 Minute Conductive Epoxy is generally compatible with most materials used in printed circuit board fabrication. As with any adhesive/sealant, compatibility with substrate should be determined on a non-critical area prior to use.

USAGE INSTRUCTIONS

Read MSDS carefully prior to use.

Cleaning: For best results, clean the board prior to application with a Chemtronics® ControlWipe™ and Chemtronics® Electro-Wash® PX to remove any surface contamination which may prevent adequate material contact.

Mixing: Mix equal amounts (1:1) by weight or volume of Part A and Part B. Mix thoroughly for 2-3 minutes and apply within 1-2 hours.

Thinning: Do not attempt to thin.

Curing: Curing times and electrical conductivity depend primarily on temperature. For fastest curing times, maximum conductivity and adhesion, cure the bond at 175°F to 212°F (80 to 100°C) for 10-15 minutes. It can be room temperature cured at or above 77°F (25°C) for 24 hours. Maximum conductivity and bond strength are achieved in 36 hours. **Curing at temperatures below 77°F (25°C) will result in a loss of conductivity and adhesion.**

Pot Life: 1-2 hours at 20-25°C after mixing (3-5 gram mass).

AVAILABILITY

CW2460

- Part A 10 g. adhesive per mixing jar
- Part B 10 g. hardener per mixing jar

ENVIRONMENTAL IMPACT DATA

ODP	None	VOC	None
HCFC	None	HFC	None

Ozone depletion potential (ODP) is determined in accordance with the Montreal Protocol and U.S. Clean Air Act of 1990. Hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) are regulated under the Montreal Protocol as Class II ozone depleting substances. Volatile Organic Compound (VOC) information is calculated on a weight basis using the VOC definition of California Air Resources Board (CARB) Consumer Product Regulations, South Coast Air Quality Management District (SCAQMD) Rule 102 and the Federal definition published in 40 CFR 51.100(s). Hydrofluorocarbons (HFCs) are not currently regulated.

TECHNICAL & APPLICATION ASSISTANCE

Chemtronics® provides a technical hotline to answer your technical and application related questions. The toll free number is: **1-800-TECH-401.**

NOTE:

This information is believed to be accurate. It is intended for professional end users having the skills to evaluate and use the data properly. ITW CHEMTRONICS® does not guarantee the accuracy of the data and assumes no liability in connection with damages incurred while using it.

Chemtronics®, Electro-Wash® and CircuitWorks® are registered trademarks of ITW Chemtronics. All rights reserved. ControlWipes™ is a trademark of ITW Chemtronics. All rights reserved.

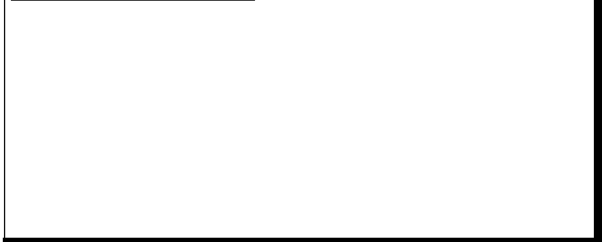
MANUFACTURED BY:

ITW CHEMTRONICS®
 8125 COBB CENTER DRIVE
 KENNESAW, GA 30152

1-770-424-4888

REV. B (01/09)

DISTRIBUTED BY:





Propiedades Acústicas y Mecánicas del Cobre

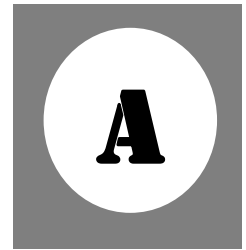
Propiedades Acústicas del Cobre.

Metales	Velocidad Longitudinal		Velocidad Transversal		Velocidad Superficial		Densidad g/cm ³	Impedancia Acústica g/cm ² -sec x10 ⁵
	cm/μs	in/μs	cm/μs	in/μs	cm/μs	in/μs		
Cobre	0.466	0.1835	0.233	0.0890	0.193	0.0760	8.93	41.61

Propiedades mecánicas del Cobre	
Resistencia a tracción	22 kg/mm ²
Límite elástico	5 kg/mm ²
Alargamiento	48 %
Dureza Brinell	45
Resistencia a la cizalladura	18-20 kg/mm ²

Anexos

Programas en MATLAB para el análisis de las gráficas obtenidas de la simulación en COMSOL



PROGRAMA 1

El programa 1 carga los datos obtenidos de la simulación en COMSOL para posteriormente graficarlos en las figuras 1 y 2 en forma de lista; para que se puedan apreciar claramente se muestran 4 gráficas en cada figura ingresando leyendas para identificar las formas de onda, para la figura 3 se muestra en una vista 2-D las 8 gráficas y en la figura 4 en 3-D, ambas con leyendas.

```
for i = 1:4

    figure(1), subplot(4,1,i), plot(x, Presion(i, :), 'LineWidth', 1.5), set(gca, 'xtickMode', 'auto',
    'ytickMode', 'auto'), grid on
end

subplot(4,1,1), LEGEND("Crosstalk" entre los elementos 1-2', 'Position', [92.8, 281.2, 10, 10]);
subplot(4,1,2), LEGEND("Crosstalk" entre los elementos 2-3', 'Position', [92.8, 212.2, 10, 10]);

for i = 5:8
    figure(2), subplot(4,1,i-4), plot(x, Presion(i, :), 'LineWidth', 1.5), ...
        set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), grid on
end

subplot(4,1,1), LEGEND("Crosstalk" entre los elementos 4-7', 'Position', [92.8, 281.2, 10, 10]);
subplot(4,1,2), LEGEND("Crosstalk" entre los elementos 6-9', 'Position', [92.8, 179.7, 10, 10]);

figure(3), plot(x, Presion, 'LineWidth', 1.5), set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), ...
    axis([0 3.5e-3 -0.06 0.09]), grid on

LEGEND("Crosstalk" entre los elementos 1-2', "Crosstalk" entre los elementos 2-3', "Crosstalk"
entre los elementos 1-4', ...

figure(4), plot3(x, y, Presion, 'LineWidth', 1.5), ...
    axis([0 3.5e-3 1 8 -0.06 0.09]), grid on

LEGEND("Crosstalk" entre los elementos 1-2', "Crosstalk" entre los elementos 2-3', "Crosstalk"
entre los elementos 1-4', ...
```

PROGRAMA 2

Las gráficas de la simulación en COMSOL fueron exportados en archivos en formato txt y posteriormente en Matlab se importaron cada uno de los datos para poder analizarlos por semi-ciclos; se muestra a continuación el código del programa desarrollado en Matlab en el que primero se grafica la forma de onda que se va a analizar.

Con el ciclo **for** se hace el barrido para los puntos adquiridos y con el primer par de **if's** localiza el cruce por cero de negativo a positivo para después obtener el máximo valor hasta el siguiente cruce por cero, este valor máximo se guarda en un vector de máximos; con el segundo grupo de **if's** anidados se ejecuta el proceso similar al descrito anteriormente pero para un semi-ciclo negativo obteniendo se valores mínimos que son almacenados en un vector.

```
figure,plot(potx,poty,'LineWidth',1.2),title('Potencial Eléctrico [V]'),...

for i=1:length(TY)
    if TY(i)<0
        if TY(i+1)>0
            while TY(i+j)>0
                mp=max(mp,TY(i+j)); %obtiene el max-max
            end
            pico(k)=mp;
        end
    end

    if TY(i)>0
        if TY(i+1)<0
            while TY(i+j)<0
                mp=min(mp,TY(i+j));
            end
            picon(k1)=mp;
        end
    end
end
```

Cuando finaliza el ciclo **for** los valores máximos de los semi-ciclos positivos se encuentran en un vector llamado pico y los valores mínimos de los semi-ciclos negativos se encuentran en un vector llamado picon.

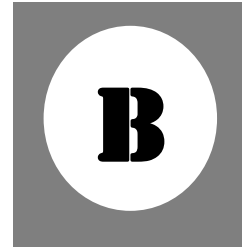
A continuación se obtiene los valores absolutos de picon y con el primer **for** realiza la suma elemento con elemento del vector picon con el vector piconabs, que es el nuevo vector que se generó con los valores absolutos del vector picon. Finalmente con el segundo **for** se efectúa la suma total de la contribución del “Crosstalk” en la gráfica analizada.

Con el valor final obtenido se completa la tabla III.1 poniendo el valor en la fila correspondiente de acuerdo a los datos que fueron analizados.

```
for i=1:length(pico)
    suma=pico(i)+piconabs(i);
end

for i=1:length(suma1)
    suma2=suma2+suma1(i);
end
```

Programa en MATLAB para el análisis de las gráficas obtenidas de las mediciones del “Crosstalk” eléctrico en la base de Cobre



En el programa inicia importando todos los datos adquiridos en la base Cobre, empleando las cuatro configuraciones, así como datos adicionales como los pulsos de oscilación de las cerámicas piezoeléctricas.

Después de importar los datos se definen variables y matrices que se utilizaron para el desarrollo del programa basado en los datos importados.

El programa comienza graficando los resultados medidos en la configuración 1, desplegándose seis figuras con tres mediciones del “Crosstalk” cada una en forma de lista para que se observen de forma clara cada gráfica, e introduciendo leyendas que indican la posición en la que fue medido el “Crosstalk”

```
for i = 2:4
    for j = 2:4
        figure(i-1), subplot(3,1,j-1), plot(x, Conf1(k+j,:), 'LineWidth', 1.45),
            set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]), grid on
    end

    subplot(3,1,1), LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1', 'Position', [85.6, 281.2, 10, 10]);
end

for i = 2:4
    for j = 5:7
        figure(i+2), subplot(3,1,j-
4), plot(x, Conf1(k+j,:), 'LineWidth', 1.45), set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), ...
            axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]), axis 'auto y', grid on
    end

    subplot(3,1,1), LEGEND('"Crosstalk" en la posición 4', 'Position', [85.6, 281.2, 10, 10]);
end
```

Con el ciclo **for** se muestran gráficas en 2-D y 3-D con las seis mediciones del “Crosstalk” medidas en la configuración 1, después se incluye la respuesta de oscilación de una de las cerámicas con las seis mediciones del “Crosstalk” en vistas en 2-D y 3-D; y finalmente se presenta una gráfica en 2-D con la comparación del “Crosstalk” total medido en cada base y de la respuesta de oscilación de una cerámica.

```

for i = 1:3
    figure(i+6),plot(x,Conf1(k:k+5,:),'LineWidth',1.45),...axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]),grid on

    LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1','"Crosstalk" en la posición 2','"Crosstalk" en la
    posición 3','"Crosstalk" en la posición 4',...

    figure(i+9),plot3(x,y(1:6,:),Conf1(k:k+5,:),'LineWidth',1.45),...

    LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1','"Crosstalk" en la posición 2','"Crosstalk" en la
    posición 3','"Crosstalk" en la posición 4',...

    figure(i+12),plot3(x,y(1,:),PulsosC(P,:),x,y(2:7,:),Conf1(k:k+5,:),'LineWidth',1.45),...
        axis([0 5.005e-6 1 7 -1 1.3]),axis 'auto z',grid on

    LEGEND('Respuesta de oscilación de la cerámica','"Crosstalk" en la posición 1','"Crosstalk"
    en la posición 2',...

    figure(i+15),plot(x,PulsosC(P,:),x,Sconf1(i,:),'LineWidth',1.45),...
        xlabel('Tiempo [s]'),ylabel('Voltaje [V]'),axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid
    on

    LEGEND('Pulso de oscilación de la cerámica','"Crosstalk" total en la configuración 1');

end

```

En este bloque solo se trataron los datos para la base de Cobre en las configuraciones 2, 3 y 4; los tres ciclos **for's** muestran las gráficas en forma de lista y para las tres configuraciones seleccionadas insertando leyendas para saber la posición en la que fueron tomadas.

```

for i = 1:6
    for j = 2:4
        figure(i),subplot(3,1,j-1),plot(x,Cnf234CL(k+j,:),'LineWidth',1.45),...
            set(gca,'xtickMode','auto','ytickMode','auto'),...axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]),...
            axis 'auto y',grid on
    end

    subplot(3,1,1),LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1','Position',[85.6, 281.2, 10, 10]),...

end

for i = 7:12
    for j = 5:7
        figure(i),subplot(3,1,j-
    4),plot(x,Cnf234CL(k+j,:),'LineWidth',1.45),set(gca,'xtickMode','auto','ytickMode','auto'),...

end

    subplot(3,1,1),LEGEND('"Crosstalk" en la posición 4','Position',[85.6, 281.2, 10, 10]);

end

for i = 13:18

```

```

figure(i),subplot(3,1,1),plot(x,Cnf234CL(k,:), 'LineWidth',1.45),set(gca,'xtickMode','auto','ytick
Mode','auto'),axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]),axis 'auto y',grid on

    subplot(3,1,1),LEGEND('"Crosstalk" en la posición 7','Position',[85.6, 281.2, 10, 10]);
end

```

Con el siguiente ciclo se muestran las siete mediciones en 2-D y 3-D para la base de Cobre; y para las configuraciones 2, 3 y 4, después se comparan las mediciones del “Crosstalk” con la respuesta de oscilación de una de las cerámicas mostrándolas en vistas en 2-D y 3-D, para finalmente graficar el “Crosstalk” total que se genera y en cada configuración comparándola con la respuesta de oscilación de una de las cerámicas y mostrándola en una vista en 2-D

```

for i = 1:6
    figure(i+18),plot(x,Cnf234CL(k:k+6,:), 'LineWidth',1.45),...
        axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]),axis 'auto y',grid on

    LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1','"Crosstalk" en la posición 2','"Crosstalk" en la
posición 3','"Crosstalk" en la posición 4',...

    figure(i+24),plot3(x,y(1:7,:),Cnf234CL(k:k+6,:), 'LineWidth',1.45),...
        axis([0 5.005e-6 1 7 -0.25 0.2]),axis 'auto z',grid on

    LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1','"Crosstalk" en la posición 2','"Crosstalk" en la
posición 3','"Crosstalk" en la posición 4',...

    figure(i+30),plot3(x,y(1,:),PulsosC(m,:),x,y(2:8,:),Cnf234CL(k:k+6,:), 'LineWidth',1.45),...
        axis([0 5.005e-6 1 8 -1 1.3]),axis 'auto z',grid on

    LEGEND('Respuesta de oscilación de la cerámica','"Crosstalk" en la posición 1','"Crosstalk"
en la posición 2',...

    figure(i+36),plot(x,PulsosC(m,:),x,SCL(i,:), 'LineWidth',1.45),...
        xlabel('Tiempo [s]'),ylabel('Voltaje [V]'),...
        axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on
end

```

Después de mostrar las mediciones obtenidas en forma individual y con vistas en 2-D y 3-D se procedió a graficar el “Crosstalk” total que se genera con la contribución del “Crosstalk” en las 4 configuraciones y otra con la contribución del “Crosstalk” solo considerando las configuraciones 1, 2 y 4, para la base de Cobre.

```

figure(4),plot(x,PulsosC(5,:),x,CTC, 'LineWidth',1.45);...
    axis([0 5.005e-6 -1.5 2]),axis 'auto y',grid on

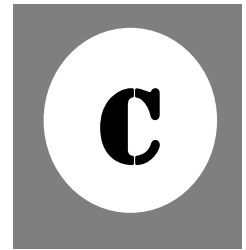
figure(5),plot(x,PulsosC(6,:),x,CTL, 'LineWidth',1.45);...
    axis([0 5.005e-6 -1.5 2]),axis 'auto y',grid on

figure(6),plot(x,PulsosC(5,:),x,CTC41, 'LineWidth',1.45);...
    axis([0 5.005e-6 -1.5 2]),axis 'auto y',grid on

figure(7),plot(x,PulsosC(6,:),x,CTL41, 'LineWidth',1.45);...
    axis([0 5.005e-6 -1.5 2]),axis 'auto y',grid on

```


Programa en MATLAB para generar el campo acústico en un arreglo de elementos piezoeléctricos con y sin la presencia del “Crosstalk”



El programa comienza definiendo las variables que se usaran para generar el campo acústico en un arreglo de elementos piezoeléctricos de dimensiones 3x3, introduciendo e 5 de sus nueve elementos un factor representativo del “Crosstalk”.

```
TN=[-Esp 0 Esp
    -Esp 0 Esp
    -Esp 0 Esp];
figure(1),plot(TN,'*'),axis([0 4 -.0001 .0001]);
set(gcf, 'Position', [10 10 750 550]);

TN1=TN;
Cap = 15.576e-15;
TN1(1) = TN1(1)*Cap;
TN1(3) = TN1(3)*Cap;
TN1(5) = TN1(5)*Cap;
TN1(7) = TN1(7)*Cap;
TN1(9) = TN1(9)*Cap;
```

Los datos para graficar el campo acústico con y sin la presencia del “Crosstalk” son guardados en dos matrices.

```
for nLoop1 = 1:x
    for nLoop2 = 1:y
        for nLoop3 = 1:m
            for nLoop4 = 1:n
                r = sqrt((Ex(nLoop1) - TN(nLoop3,nLoop4))^2 + Ey(nLoop2)^2);
                CUS(nLoop1, nLoop2) = CUS(nLoop1, nLoop2) + cos(-k*r)/r;
            end
        end
    end
end
```

Se grafica el campo acústico sin “Crosstalk”

```
figure(3);
mesh(Ex, Ey, abs(CUS'));
mesh(Ex, Ey, CUSdB');
title(sprintf('Campo acústico generado por un transductor matricial (n = %2i; dx = %4.2f mm; f = %4.2f MHz)', ...
    Nel, Esp*1000, f/1e6));
```

Se grafica el campo acústico con “Crosstalk”

```
figure(4);
set(gcf, 'Position', [10 10 750 550]);

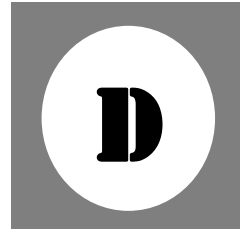
mesh(Ex, Ey, abs(CUSC'));
mesh(Ex, Ey, CUSCdB');

colorbar('vert');
title(sprintf('Campo acústico generado por un transductor matricial (n = %2i; dx = %4.2f mm; f
= %4.2f MHz)', ...
            Nel, Esp*1000, f/1e6));
xlabel ('Posición del transductor (dimensiones en m)');
```

El programa termina con la comparación en una gráfica en 2-D del campo acústico sin la presencia del “Crosstalk” y con la presencia del fenómeno.

```
figure(5)
set(gcf, 'Position', [10 10 750 550]);
plot(Ex,planoXY,'-r',Ex,planoXYC,'-b','LineWidth',1.5);grid
```

Programa en MATLAB para el análisis de las gráficas obtenidas de las mediciones del “Crosstalk” mecánico en la base de Cobre.



El programa para analizar las mediciones del “Crosstalk” mecánico se basa en el programa del “Crosstalk” eléctrico, al inicio se importaron los datos guardados en el disquete y se definieron las matrices para generar las gráficas.

Primero se analizaron las mediciones tomadas sobre la base, generando gráficas en 2-D y 3-D para tener diferentes perspectivas de las mediciones tomadas.

```
for i = 2:3
    for j = 2:4
        figure(i-1), subplot(3,1,j-
1), plot(x, CobLat(k+j, :), 'LineWidth', 1.45), set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), ...
            axis([0 5.005e-6 -0.6 0.4]), grid on, %axis 'auto y'%, grid on
        end

        subplot(3,1,1), LEGEND('"Crosstalk" en la posición 1', 'Position', [85.6, 281.2, 10, 10]), ...
    end

for i = 2:3
    for j = 5:7
        figure(i+1), subplot(3,1,j-
4), plot(x, CobLat(k+j, :), 'LineWidth', 1.45), set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), ...
            axis([0 5.005e-6 -0.6 0.4]), grid on, %axis 'auto y'%, grid on
        end

    end

for i = 2:3
    for j = 8:10
        figure(i+3), subplot(3,1,j-
7), plot(x, CobLat(k+j, :), 'LineWidth', 1.45), set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), ...
            end

    end

for i = 2:3
    for j = 11:12
        figure(i+5), subplot(3,1,j-
10), plot(x, CobLat(k+j, :), 'LineWidth', 1.45), set(gca, 'xtickMode', 'auto', 'ytickMode', 'auto'), ...
            axis([0 5.005e-6 -0.6 0.4]), grid on, %axis 'auto y'%, grid on
        end

    end

end

for i = 1:2

    figure(i+8), plot(x, CobLat(k:k+10, :), 'LineWidth', 1.45), ...
        axis([0 5.005e-6 -0.3 0.2]), grid on, axis 'auto y'
```

```

LEGEND('Crosstalk" en la posición 1','Crosstalk" en la posición 2','Crosstalk" en la posición
3','Crosstalk" en la posición 4',...

figure(i+10),plot3(x,y(1:11,:),CobLat(k:k+10:),'LineWidth',1.45),...
axis([0 5.005e-6 1 11 -0.25 0.2]),grid on,axis 'auto z'

LEGEND('Crosstalk" en la posición 1','Crosstalk" en la posición 2','Crosstalk" en la
posición 3','Crosstalk" en la posición 4',...

figure(i+12),plot3(x,y(1:12,:),CobLat(k-1:k+10:),'LineWidth',1.45),...
axis([0 5.005e-6 1 12 -1 1.3]),axis 'auto z',grid on

LEGEND('Respuesta de oscilación de la cerámica','Crosstalk" en la posición 1','Crosstalk"
en la posición 2','Crosstalk" en la posición 3',...

figure(i+14),plot(x,CobLat(k-1,:),x,STCTM(i:),'LineWidth',1.45),...
axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on

LEGEND('Pulso de oscilación de la cerámica','Crosstalk" Mecánico total');

end

```

En un segundo bloque se analizan las mediciones de tomadas sobre la base de Cobre; se muestran gráficas en 2-d y 3-D.

```

for i = 1:3

figure(1),subplot(3,1,i),plot(x,Rex(i+1:),'r','LineWidth',1.45),set(gca,'xtickMode','auto','ytic
kMode','auto'),...
axis([0 5.005e-6 -0.02 0.01]),grid on,%axis 'auto y%',grid on

subplot(3,1,1),LEGEND('Crosstalk" en la posición 1','Position',[85.6, 281.2, 10, 10]),...
end

figure(2),plot3(x,y(1:3,:),Rex(2:4:),'LineWidth',1.45),...
axis([0 5.005e-6 1 3 -0.02 0.01]),grid on,%axis 'auto y'

8');

figure(3),plot3(x,y(1:4,:),Rex(1:4:),'LineWidth',1.45),...
axis([0 5.005e-6 1 4 -0.9 1.2]),grid on,%axis 'auto y'

figure(4),plot(x,Rex(1:),x,SCTMR(1:),'r','LineWidth',1.45),...
axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on

```

Finalmente el programa termina haciendo comparaciones con gráficas en 2-D entre la respuesta de oscilación de una cerámica contra las mediciones del “Crosstalk” eléctrico y mecánico medido en la base de Cobre.

```
figure(1),plot(x,S3CL(1,:),x,SCTCM(1:),'r','LineWidth',1.45),...
    axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on

CTT = [S3CL; SCTCM];
STCTME = sum(CTT,1);

figure(2),plot(x,STCTME(1:),'r','LineWidth',1.45),...
    axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on

figure(3),plot(x,CobLat(1:),x,STCTME(1:),'r','LineWidth',1.45),...
    axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on

figure(4),plot(x,CobLat(1:),x,S3CL(1:),x,SCTCM(1:),'r','LineWidth',1.45),...
    axis([0 5.005e-6 -1 1.3]),axis 'auto y',grid on
```

Los programas expuestos en este trabajo se encuentran protegidos por los derechos de autor. © 2012, Miguel López Jiménez; MC Israel Sánchez Domínguez. Todos los derechos reservados.