



## Obtención de la respuesta al impulso del tiple colombiano por método indirecto

Santana, Javier <sup>(a)</sup>  
Aponte, Juan Martín <sup>(b)</sup>  
Acosta, Oscar Esneider <sup>(c)</sup>  
Hermida, Luis Fernando <sup>(d)</sup>

(a) Estudiante de Ingeniería de Sonido VIII semestre, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, Crr 8h No. 172-20, Bogotá, Colombia. E-mail: [jlsantana@academia.usbbog.edu.co](mailto:jlsantana@academia.usbbog.edu.co)

(b) Estudiante de Ingeniería de Sonido VIII semestre, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, Crr 8h No. 172-20, Bogotá, Colombia. E-mail: [japonte@academia.usbbog.edu.co](mailto:japonte@academia.usbbog.edu.co)

(c) Estudiante de Ingeniería de Sonido VIII semestre, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, Crr 8h No. 172-20, Bogotá, Colombia. E-mail: [oacosta@academia.usbbog.edu.co](mailto:oacosta@academia.usbbog.edu.co)

(d) Cátedra de Acústica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, Cra 45 No. 57-47 Apto 501, Bogotá, Colombia. E-mail: [lhermida@docentes.usbbog.edu.co](mailto:lhermida@docentes.usbbog.edu.co)

### Abstract

In this paper the impulse response of the Colombian tiple is obtained by an indirect method in which the musical instrument is excited using a sine sweep signal reproduced by a loudspeaker. Then the vibration present on different points of tiple surface is recorded by means of an accelerometer and an audio interface, and finally this signal is deconvolved with the sine sweep signal to obtain the impulse response of this instrument.

### Resumen

En este artículo se obtiene la respuesta al impulso de un tiple colombiano por método indirecto, el cual consiste en excitar el instrumento musical con una señal sine sweep reproducida a través de un altavoz, para luego grabar la vibración presente en la superficie del tiple usando un acelerómetro y una interfaz de audio profesional. Posteriormente se realiza la deconvolución de la señal grabada con la generada para obtener así la respuesta al impulso del instrumento.

## 1 Introducción

La respuesta al impulso de cualquier sistema permite determinar las características más notables de éste. La convolución de  $f$  y  $g$  se denota como  $f * g$  y se define como la integral del producto de ambas funciones después de que una es invertida y desplazada una distancia  $\tau$ :

$$(f * g)(t) = \int f(\tau) g(t - \tau) d\tau.$$

El rango de integración dependerá del dominio sobre el que estén definidas las funciones; cuando se trata de hacer un procesamiento digital de señal no tiene sentido hablar de convoluciones aplicando estrictamente la definición ya que sólo se dispone de valores en instantes discretos de tiempo. Es necesario entonces, una aproximación numérica para realizar la convolución entre dos señales. Se evaluará el área de la función  $x(\tau) * h(t - \tau)$ .

El objetivo que se busca cumplir con el desarrollo de este proyecto es obtener la respuesta al impulso (IR) usando el método indirecto, en otras palabras se halla  $h(t)$  [ $h(t)=y(t)*x^{-1}(t)$ ] gracias a que se dispone de  $x(t)$  como entrada (sine sweep) y  $y(t)$  como salida que corresponde a la señal capturada con el acelerómetro. Las mediciones se realizan sobre los ejes X y Y del acelerómetro sobre el puente del tiple, que es el lugar sobre el cual se presenta la concentración de energía en el tiple.

El siguiente paso a seguir es seleccionar cuidadosamente el ámbito de medición y los materiales necesarios para la captura. En este caso se requiere una (1) interfaz de audio, una (1) base para suspender el instrumento, un (1) micrófono de medición, un software para calibrar el sistema (SiaSmaat 6), un (1) sonómetro integrador tipo 1 para medición de nivel de presión sonora de la fuente y ruido de fondo, una (1) fuente EON 15 de JBL y un software para hacer el registro del acelerómetro (Logic Pro 8). Adicionalmente se necesita un (1) rollo de nylon delgado, un (1) rollo de cinta y cables necesarios.

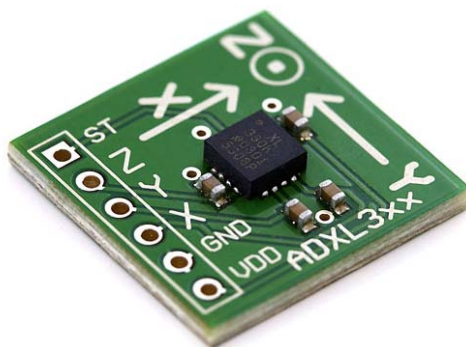
Luego se procede con la calibración de la fuente (para obtener una respuesta lo más plana posible) suspendiendo el instrumento al aire libre con un nylon delgado sujeto a la base. Posteriormente se mide y se ajusta el voltaje necesario para el correcto funcionamiento del acelerómetro (3V) y se realizan las mediciones para hacer el análisis de datos.

El paso final incluye el análisis de resultados, en el cual por medio de convolución en Adobe Audition 3 mediante el plugin Aurora se obtiene la respuesta al impulso del tiple en el punto de mayor concentración de energía (puente). Se analizó dicha respuesta por medio de un estudio espectral FFT con el software Audacity 1.3.7.

## 2 Elementos usados

### 2.1 Acelerómetro ADXL330

Este acelerómetro es un sistema completo para la medición triaxial en un solo integrado monolítico y puede trabajar con diferentes anchos de banda dependiendo de los condensadores que se usen en sus salidas. Para esta medición se trabajó con condensadores de 1 nF para llevar la frecuencia de operación hasta 1,6 kHz en los ejes X y Y. El eje Z no se tuvo en cuenta durante el análisis, debido que la respuesta del acelerómetro en este sentido posee pequeño ancho de banda. También se debe tener en cuenta que en el eje X es donde hay mayor excursión del instrumento debido a la tapa de madera.



**Figura 1.** Aspecto físico del ADXL330.

## 2.2 El tiple colombiano

El tiple es un cordófono pequeño de la familia de la guitarra, tiene 12 cuerdas de acero en cuatro cursos y es considerado el instrumento nacional de Colombia. Sus inicios se dieron en los límites de los departamentos de Santander y Boyacá, especialmente en los municipios de Chitaraque (Boyacá) y Olival Suaita (Santander). Se utiliza en el acompañamiento de ritmos típicos del interior del país como el bambuco, el pasillo y también se usa como acompañante de la tradicional trova antioqueña (canto improvisado).

El tiple tiene una tesitura que se extiende desde el re4 hasta el si5 de la quinta línea adicional superior, en términos de sonidos naturales y convencionalmente establecidos para el instrumento. Esta tesitura se puede distribuir metodológicamente en tres secciones: registro bajo (re4 y re5), registro medio (si4 y mi6) y registro alto (re5 y si6).



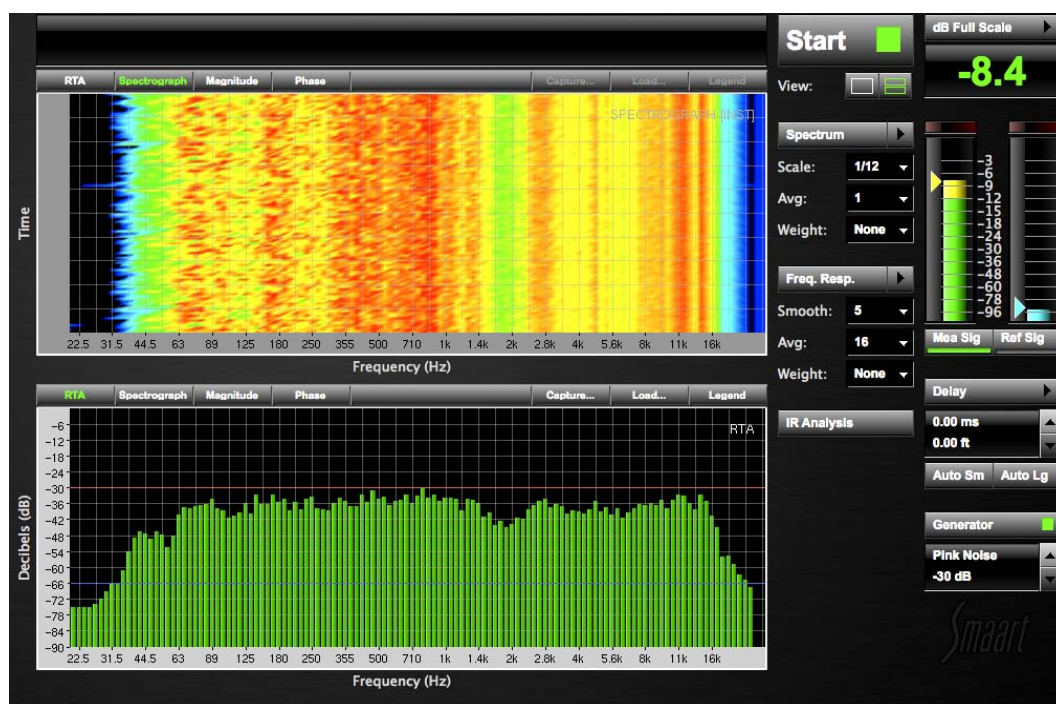
**Figura 2.** Aspecto físico del tiple.



**Figura 3.** Tarjeta de audio M-Audio Fast Track Ultra.

### 3 Otros elementos usados

Para excitar el tiple se usó una cabina JBL Eon15 la cual fue ecualizada previamente para buscar una respuesta espectral lo más plana posible en el ancho de banda soportado por el acelerómetro. Para ello se usó el software Sia Smart Live, ruido rosa y un micrófono de medición ECM8000 de la empresa Behringer. La imagen de calibración se muestra en la figura 4.

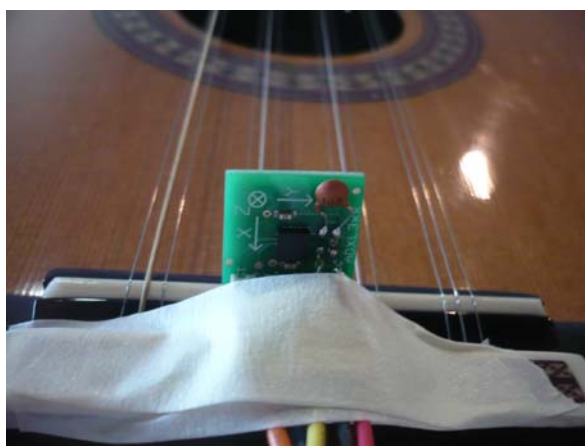


**Figura 4.** Calibración de la fuente sonora empleada.

Para medir la respuesta al impulso del tiple, fue necesario suspender la guitarra al aire libre colgándola de una base con nylon delgado. Luego de tener nuestra interfaz de audio, la fuente de audio y el acelerómetro conectados con el laptop, procedimos a ajustar la fuente con un buen nivel de presión sonora con ayuda de un sonómetro integrador.



**Figura 5.** Montaje experimental.



**Figura 6.** Acelerómetro sobre el puente del tiple.

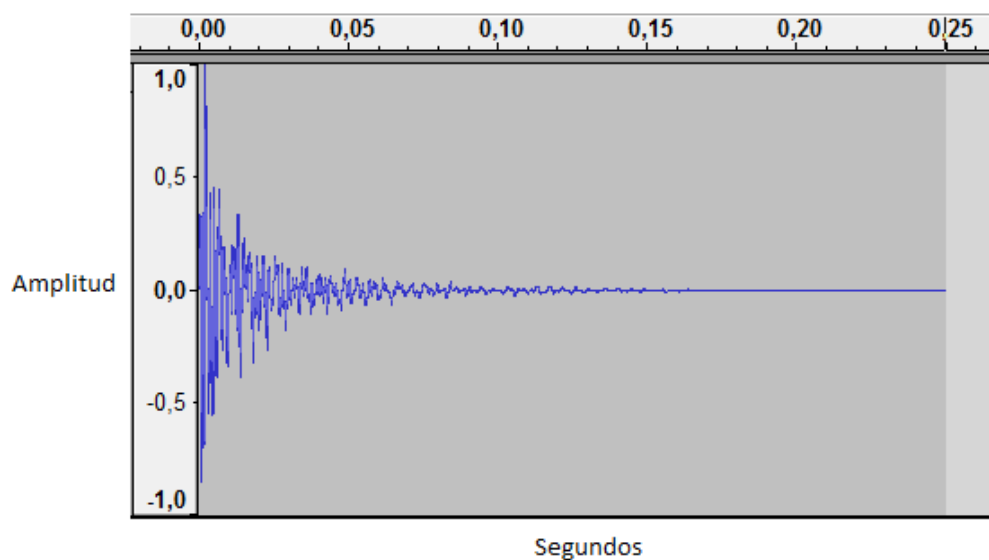
Una vez que el acelerómetro fue ubicado sobre el puente del tiple, se tomó la salida X del transductor para capturar las vibraciones generadas por el movimiento del cuerpo del instrumento en dirección perpendicular a la boca del mismo y la salida Y para las vibraciones que fueran paralelas.

## **4 Análisis de resultados**

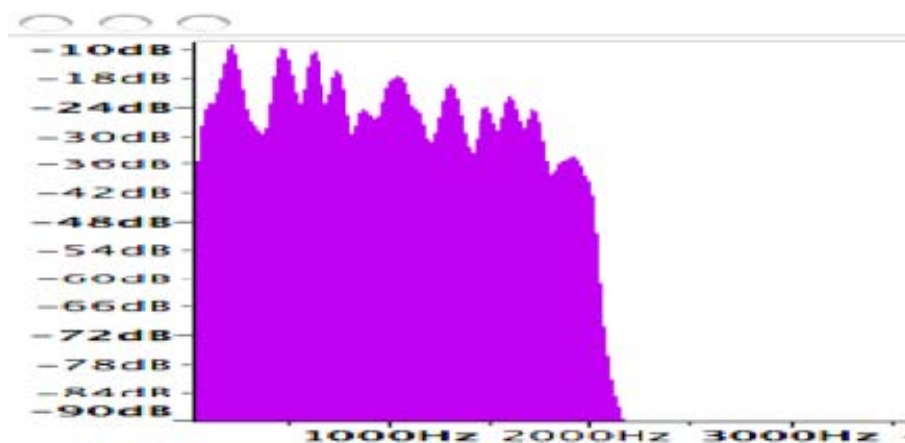
### **4.1 Respuesta al impulso obtenida sobre el eje X**

En esta medición se puede observar que el instrumento resuena en 234,2 Hz, siendo ésta la frecuencia fundamental con un nivel de -10dB (considerando 0db el máximo valor). También se destaca que luego aparecen otras componentes significativas en las frecuencias

473,7 Hz, 645,9 Hz y 732,12 Hz, cada una con niveles de -11,2 dB, -13,13 dB y -16,88 dB respectivamente.



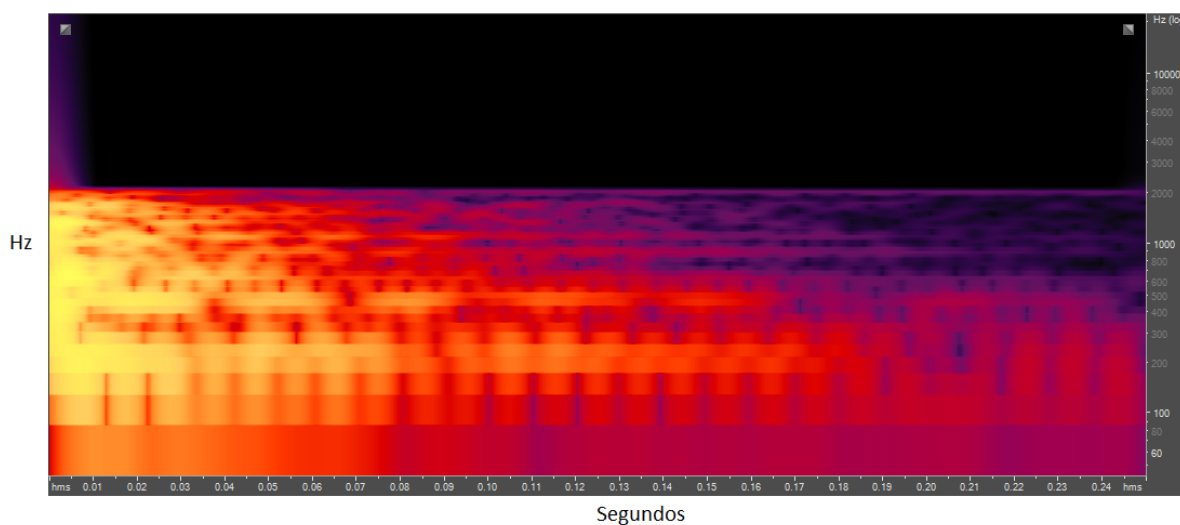
**Figura 7.** Respuesta al impulso a lo largo del eje X (medición 1).



**Figura 8.** Módulo de la FFT de la respuesta al impulso a lo largo del eje X (medición 1).

En el espectrograma la componente de 234,2 Hz se mantiene presente la mayor parte del tiempo con un alto nivel energético. Le sigue la componente de 473,7 Hz que se desvanece mucho más rápido. Es notable la presencia de componentes de bajas frecuencias durante toda la duración de la respuesta al impulso (250 ms), perdiendo éstas poco nivel en comparación con las de frecuencias medias.

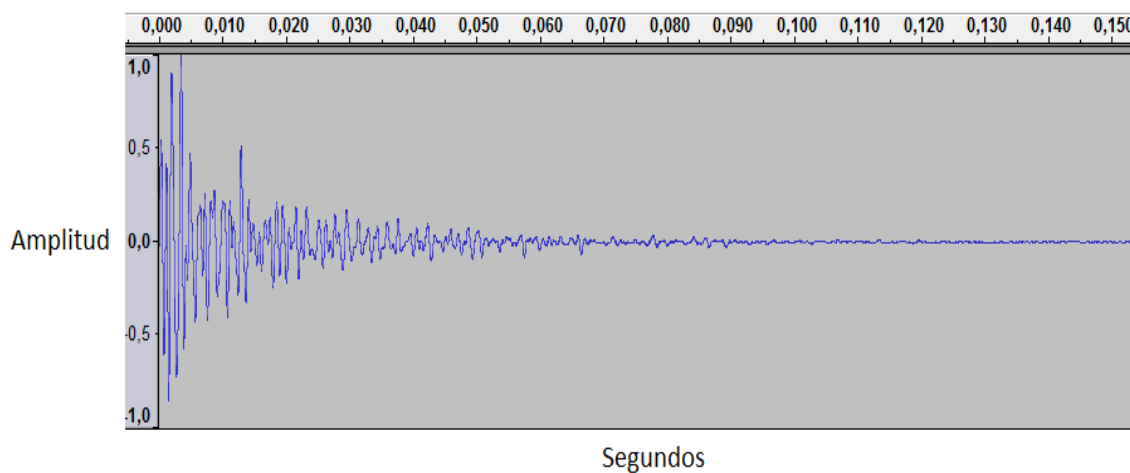




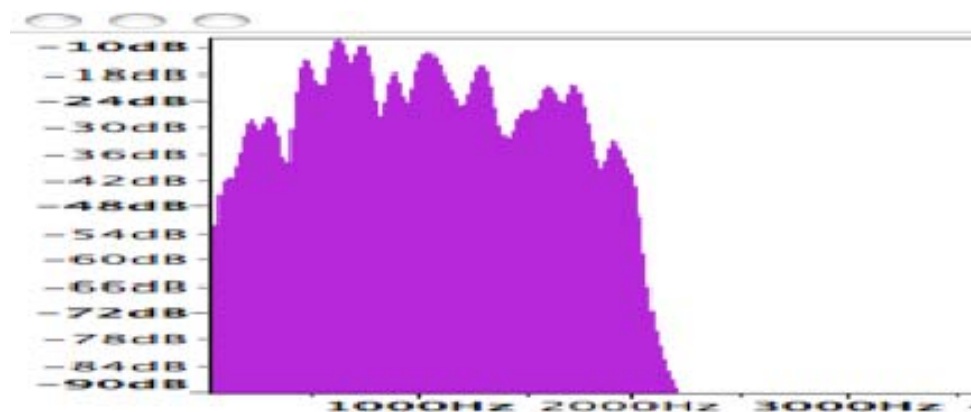
**Figura 9.** Espectrograma de la respuesta al impulso sobre el eje x.

#### 4.2 Respuesta al impulso obtenida sobre el eje Y

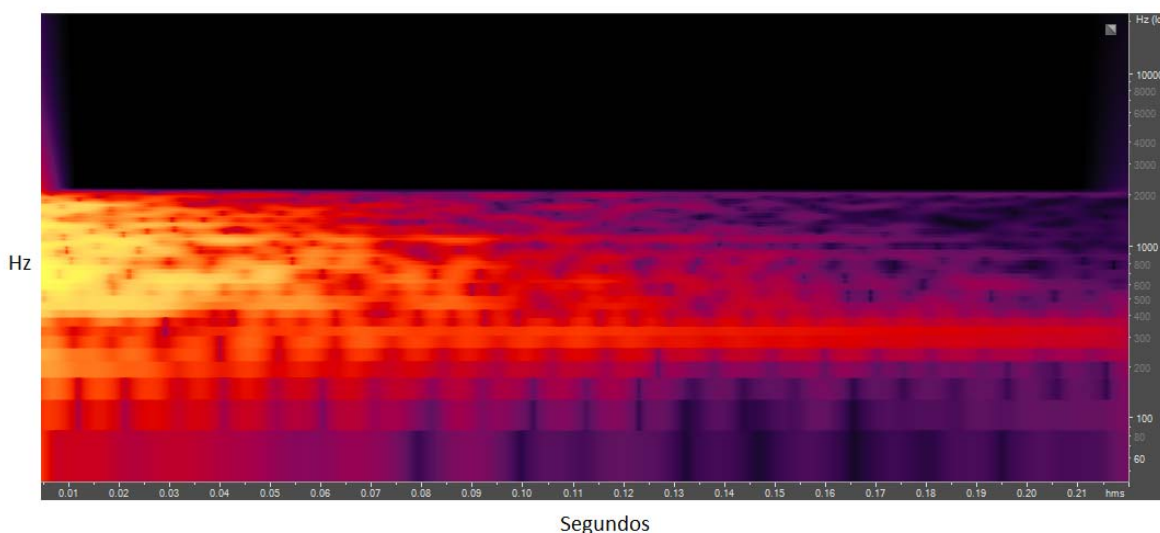
Para este eje la componente fundamental es de 645,9 Hz con un nivel de -10,52dB (siendo 0db el máximo valor). A diferencia del eje X, en el eje Y se encontraron componentes de frecuencias por debajo de la fundamental con altos valores energéticos. Éstas son de 258,3 Hz, 344,5 Hz, 473,7 Hz con -30,62 dB, -30,17 dB y -14,37 dB cada una. Dentro de este pequeño grupo la última frecuencia (473,7 Hz) coincide con la resonancia del tiple en el eje X.



**Figura 10.** Respuesta al impulso sobre el eje Y (medición 1).



**Figura 11.** Módulo de la FFT de la respuesta al impulso sobre el eje Y (medición 1).



**Figura 12.** Espectrograma respuesta al impulso sobre eje Y.

Para el eje Y predomina la componente de 301,4 Hz durante toda la duración del impulso, pero la de mayor energía es de 645,9 Hz que es muy notable al inicio. A diferencia del espectrograma obtenido para el eje X que presentó un nivel similar en bajas frecuencias, en este caso hay una disminución energética a medida que transcurre el tiempo.

## 5 Errores sistemáticos

El transductor sólo funciona hasta 2000 Hz en los ejes X y Y, razón por la cual el análisis se limita sólo a frecuencias bajas. Este es un punto importante para mejorar, ya que el comportamiento estructural es fundamental para la excursión de frecuencias altas.

## 6 Conclusiones

1. De acuerdo a los datos obtenidos en el eje X, el instrumento musical tiene mayor energía en bajas frecuencias, con una componente fundamental en 234,2 Hz. Musicalmente esta frecuencia corresponde a la nota A#3, por ello cuando se interpreta esta nota en particular, habrá un incremento significativo de nivel en grabación que deberá tenerse en cuenta a la hora de hacer mezclas en las cuales esté



presente este instrumento musical, para no tener coloraciones indeseadas.

2. En la respuesta al impulso obtenida para el eje Y del tiple, la componente fundamental es de 645,9 Hz la cual es equivalente a la nota musical D#5, por tanto es necesario prestar especial atención a esta nota durante su grabación y mezcla.
3. En los espectrogramas de los impulsos se puede observar, que el eje X tiene un comportamiento más uniforme y con mayor contenido de energía en baja frecuencia. En cambio en el eje Y el contenido energético está dado en frecuencias medias y con un comportamiento no tan uniforme comparado con el eje X.
4. Debido a que el acelerómetro ADXL330 usado para obtener las respuestas al impulso solo permite registrar señales vibratorias de hasta 500 Hz en su eje Z, este no se tuvo en cuenta durante el análisis. De haberlo hecho el ancho de banda estudiado con respecto a los ejes X y Y sería diferente y, en ese caso se estaría pasando por alto información de frecuencias superiores al límite frecuencial del transductor.
5. Durante el estudio temporal de un sonido, además de analizar las variaciones de nivel energético de la frecuencia fundamental, también es importante estudiar el comportamiento que sufren los armónicos o el espectro del mismo, ya es éste el factor objetivo que interviene de forma clave en la conformación del timbre característico de cada instrumento.

## Referencias

- Oppenheim, Alan; Willsky, Alan. (1996) "Señales y Sistemas" segunda edición. Prentice Hall, U.S.
- Davis, Timothy A.; Sigmon, Kermit (2005). "MATLAB\_Primer". Chapman & Hall/CRC, U.S.
- Hunt, Brian R; Lipsman, Ronald L.; Rosenberg, Jonathan M.. (2006) "A\_Guide"
- Puerta Zuluaga, David Puerta (1988). "Los Caminos del Tiple". Primera Edición. Ediciones AMP. Biblioteca Luis Ángel Arango, Bogotá Colombia.
- Beranek, Leo (1961). "Acústica". Primera Edición. Editorial Hispanoamericana. Buenos Aires, Argentina.
- Howard, David Martin (2001). "Acoustics and Psicoacoustics". Segunda Edición. Oxford, Focal Press. Oxfordshire, Inglaterra.
- Puerta Zuluaga, David Puerta (1988). "Los Caminos del Tiple". Primera Edición. Ediciones AMP. Biblioteca Luis Ángel Arango, Bogotá Colombia.
- Ruffa, Fransisco (2008). Cátedra de la asignatura Diseño de Sistemas I, en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, Colombia.
- Hermida Cadena, Luis Fernando (2009). Cátedra de la asignatura Mediciones Acústicas en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, Colombia.
- Fletcher, Neville Horner (2000). "The physics of musical instruments". Primera Edición. Springer Verlag. New York, Estados Unidos.
- Farina, Angelo; Langhoff, Andreads; Tronchin, Lamberto. "Comparison of Violin Impulse Responses by Listentint to Convolutad Signals". Institute for System Engineering and Informatics, E.C. Joint Research Center y Scuola Internazionale di Liuteria, Cremona. Ispra, Italia
- Farina, Angelo; Langhoff, Andreads; Tronchin, Lamberto. "Acoustic characterisation of virtual musical instruments: using MLS technique on ancient violins". Institute for System Engineering and Informatics, E.C. Universidad de Parma, Italina. D.I.E.N.C.A, Facolta di Ingengeria, Univeristy of Bolonga, Italia.

## ANEXO A

Datos Técnicos ADXL330 suministrados por Analog Devices.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
<b>SENSOR INPUT</b>					
Measurement Range	Each axis	±3	±3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		±0.3		%
Package Alignment Error			±1		Degrees
Inter-Axis Alignment Error			±0.1		Degrees
Cross Axis Sensitivity <sup>1</sup>			±1		%
<b>SENSITIVITY (RATIOMETRIC)<sup>2</sup></b>					
Sensitivity at X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub> , Z <sub>out</sub>	Each axis V <sub>s</sub> = 3 V	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature <sup>3</sup>	V <sub>s</sub> = 3 V		±0.015		%/°C
<b>ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)</b>					
0 g Voltage at X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub> , Z <sub>out</sub>	Each axis V <sub>s</sub> = 3 V	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			±1		mg/°C
<b>NOISE PERFORMANCE</b>					
Noise Density X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub>			280		μg/√Hz rms
Noise Density Z <sub>out</sub>			350		μg/√Hz rms
<b>FREQUENCY RESPONSE<sup>4</sup></b>					
Bandwidth X <sub>out</sub> , Y <sub>out</sub> <sup>5</sup>	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z <sub>out</sub> <sup>5</sup>	No external filter		550		Hz
R <sub>FI</sub> Tolerance			32 ± 15%		kΩ
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
<b>SELF-TEST<sup>6</sup></b>					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		μA
Output Change at X <sub>out</sub>	Self-test 0 to 1		-150		mV
Output Change at Y <sub>out</sub>	Self-test 0 to 1		+150		mV
Output Change at Z <sub>out</sub>	Self-test 0 to 1		-60		mV
<b>OUTPUT AMPLIFIER</b>					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
<b>POWER SUPPLY</b>					
Operating Voltage Range		2.0		3.6	V
Supply Current	V <sub>s</sub> = 3 V		320		μA
Turn-On Time <sup>7</sup>	No external filter		1		ms
<b>TEMPERATURE</b>					
Operating Temperature Range		-25		+70	°C

## ANEXO B

### Datos Técnicos M-Audio Fast Track Ultra.

<b>Line Outputs</b>	
Frequency Response:	20 Hz to 22 kHz, +/- 0.1 dB @ 48 kHz sample rate
SNR and Dynamic Range:	-104 dB, A-weighted
THD+N:	0.002% @ -1dBFS, 1kHz
Signal Level:	+10 dBu balanced
	+2 dBV, unbalanced
Impedance:	300 Ohm balanced
	150 Ohm unbalanced
Crosstalk:	< -100 dB @ 1 kHz
<b>Line Inputs</b>	
Frequency response:	20 Hz to 22 kHz, +/- 0.3 dB @ 48 kHz sample rate
SNR and Dynamic Range:	-103 dB, A-weighted
THD+N:	0.002% @ -1dBFS, 1kHz
Signal Level:	+3.4 dBu balanced
	+1.2 dBV, unbalanced
Impedance:	20K Ohm balanced
	10K Ohm unbalanced
Crosstalk:	< -100 dB @ 1 kHz
<b>Headphone Outputs</b>	
Frequency Response:	20 Hz to 22 kHz, +/- 0.7 dB @ 48 kHz sample rate
SNR and Dynamic Range:	96 dB, A-weighted
THD+N:	< 0.065% at maximum volume
Working Range:	24 to 600 ohms
Maximum Output Level:	0dbv into 32ohms
Crosstalk:	55 dB @ 1 kHz
<b>Microphone Input</b>	
Pre-amp Gain:	60dB or greater
SNR (min gain):	-103 dB, A-weighted
Dynamic Range (min gain):	103 dB, A-weighted
THD+N (min gain):	0.003% @ -1dBFS
Freq. Response (min gain):	20 Hz to 22 kHz, +/- 0.1 dB @ 48 kHz sample rate
Sensitivity:	+1dBu max level at min gain, +21dBu max level at min gain (pad engaged)
Phantom Power:	48 Volts DC no load, 16mA max
Switchable Pad:	-20 dB
<b>Instrument Input</b>	
Pre-amp Gain:	0dB to 40dB or greater
Impedance:	1M Ohm unbalanced
SNR (min gain):	-103 dB, A-weighted
Dynamic Range (min gain):	103 dB, A-weighted
THD+N (min gain):	0.005% (-86 dB) @ -1 dBFS, 1 kHz
Freq. Response (min gain):	20 Hz to 22 kHz, +/- 0.3 dB @ 48 kHz sample rate
Maximum Input:	+14dbv max level at min gain (pad disengaged)
Switchable Pad:	-20 dB