

# Análisis de sistemas procesadores de señales de guitarras eléctricas

## Estudio de las señales en efectores de guitarra eléctrica orientado a tecnologías de la actuación

**Signal Processing Systems for Electric Guitars Analysis**  
**Study of Signals in Electric Guitar's Effectors**  
**Oriented to Performance Technologies**

Recibido: 23 de septiembre de 2015 - Aceptado: 1 de marzo de 2016

Para citar este artículo: J. Vargas, J. Burgos «Análisis de sistemas procesadores de señales de guitarras», *Ingenium*, vol. 17, n.° 34, pp. 76-89, mayo de 2016.



Juan S. Vargas V.\*  
Jaime A. Burgos D. \*\*

## Resumen

El tratamiento de señales es una de las áreas más destacadas en la electrónica contemporánea. La orientación de esta revisión es el estudio de los efectos de la guitarra eléctrica, la descripción y el análisis de las sensaciones sonoras logradas por los procesadores de señales. Se condensa lo esencial de los procesadores de señal tanto analógicos como digitales, centrando la revisión en las más usuales alteraciones de estas señales: el efecto delay (variación en fase), booster (amplitud) y armonizer (frecuencia). Estos procesadores de señal, denominados también como efectores, son los pedales de guitarra: sistemas que buscan la alteración de una señal de entrada y cuyo resultado se

\* Tecnólogo en Electrónica. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail: jsvargasv@correo.udistrital.edu.co

\*\* M. Sc. en Matemática Aplicada, Universidad EAFIT. Docente Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad Tecnológica. Licenciado en Matemáticas, Universidad Pedagógica Nacional. Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. E-mail: jaburgosd@udistrital.edu.co. Grupo de Investigación Teletecno

manifiesta en una salida modificada bajo los criterios del diseño. He ahí el importante rol que desempeña la electrónica, pues, sea de manera digital o análoga, se requiere de las leyes inherentes al estudio de circuitos eléctricos, un correcto análisis de señales, una lógica media al considerar algoritmos de programación, principios de la física electromagnética y de los fenómenos sonoros.

### Palabras clave

Convertor Análogo-digital, procesador digital de señales, frecuencia, ganancia, transductores.

### Abstract

The signal processing is one of the most prominent areas in contemporary electronics. The orientation of this review is to study the effects of the electric guitar; the description and analysis of sound sensations achieved by signal processors. It summarizes the essential about the signal processors, both analog and digital signal, focusing the review on the most common alterations of these signals: delay effect (changes in phase), booster (amplitude) and harmonizer (frequency). These signal processors, also known as effectors, are the guitar pedals: systems that seek to alter an input signal and the result is manifested in a modified output under designed criteria. That is the important role played by electronics, then, whether digital or analog way, it requires laws inherent in the study of electrical circuits, a correct analysis of signals, an average logical to consider algorithms, principles of electromagnetic physics and sound phenomena.

### Keywords

Analog-digital conversion, digital signal processor, frequency, gain, transducers.

### Introducción

Toda sensación audible es causa de una fuente sonora y la propagación de la señal generada en un medio. En este caso, el proceso sonoro lo origina la vibración producida al pulsar las cuerdas de una guitarra eléctrica [1]. Esta vibración es el producto de la superposición de las ondas estacionarias que viajan a lo largo de las cuerdas del instrumento y resulta en la generación de un tono en el que sobresale la frecuencia fundamental acompañada de sus armónicos, caracterizando así el sonido de la guitarra [2].

Esta frecuencia es interpretada por nuestro cerebro en respuesta a los impulsos nerviosos generados por la recepción de la onda sonora a través del oído externo, específicamente el tímpano [3].

En el sonido, el análisis para el desarrollo de efectores ha de ser preciso, pues es obligatoria una respuesta fiel por parte del sistema a la hora de activar un efecto en un micrófono o ejecutar algún instrumento. En el momento de ejecución, se tiene en cuenta el recinto para un posible tratamiento acústico y disposición de los equipos de audio para

preservar una alta calidad tonal, libre de rebotes de señal y generación de armónicos por la retroalimentación de sonido en diferentes emisores de señal [4].

Es curioso que, aún hoy, en donde a zancadas la tendencia se enfoca en la digitalización en cada ámbito y contexto cotidiano, se presenta una excepción en el área musical en la que, no es predominante, pero sí preferible por muchos el tratamiento análogo de señales.

## La guitarra eléctrica

El desarrollo de nuevas tecnologías se da en la innovación, se analizan los conceptos y los inventos desde una nueva perspectiva que ayuda al mejoramiento, sin dejar a un lado los razonamientos científicos inherentes. Lo que en diseño industrial se denomina como ingeniería a la inversa, esto es, creatividad. En el rediseño de la guitarra se tienen en cuenta los criterios típicos ergonómicos, teniendo en cuenta los requerimientos técnicos y musicales del instrumentista: Conexiones seguras, control de tonos y volumen, uso del *trémolo*<sup>1</sup>, facilidad en la ejecución de ambas manos, entre otras [5].

En relación con lo técnico, al tratarse de un conjunto eléctrico, se debería buscar mejoría en la conductividad de los circuitos del instrumento. Los componentes semiconductores ahora son de tipo compuesto, pues se combinan átomos de distintos elementos logrando así una respuesta más pronta y fiel. Son apropiados entonces los semiconductores compuestos del grupo IV-A de la tabla periódica, pues brindan fidelidad y una rapidez de respuesta precisa (Silicio-Germanio SiGe, Silicio-Calcio SiC) [6].

Para la manufactura de las cuerdas se implementan aleaciones de estaño (Sn) para las de mayor frecuencia. Las cuerdas graves se caracterizan por ser de mayor grosor; esta característica resulta en una señal de menor frecuencia, lo que audiblemente se evidencia en un sonido más bajo en lo que al tono respecta. Este tipo de cuerdas se compone de una cuerda núcleo que, al igual que en las de mayor frecuencia, están hechas de aleación de Sn. Difieren en que estas cuerdas bajas están recubiertas por una cuerda tipo envolvente que favorece en alcanzar el grosor respectivo de frecuencia (147 Hz, 110 Hz y 82,4 Hz para las cuerdas 4, 5 y 6, respectivamente).

El recubrimiento de las cuerdas tipo envolventes es de níquel (Ni) [7].

Teniendo en cuenta que la primera (E1) y la sexta cuerda (E6) corresponden a la misma nota (Mi) pero en diferente frecuencia, puede hacerse el razonamiento aproximado de que el grosor de E1 es 4 veces menor que E6, considerando la frecuencia fundamental  $f$  de cada cuerda [8].

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \quad (1)$$

1 *Trémolo*. Complemento de la guitarra en forma de palanca que contribuye al mantenimiento de la pulsación y una ligera modulación tonal.

siendo  $L$  = longitud de cuerda,  $F_T$  fuerza de tensión y  $\mu$  la densidad lineal de masa de la cuerda. Expresando esta  $\mu$  en términos de su densidad obtenemos:

$$\mu = \frac{m}{L} = \frac{\rho V}{L} = \frac{\rho AL}{L} = \rho \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (2)$$

sustituyendo la ecuación (2) en (1):

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{4F_T}{\rho \pi d^2}} = \left( \frac{1}{L} \sqrt{\frac{F_T}{\rho \pi}} \right) \frac{1}{d} \quad (3)$$

sabiendo que el término entre paréntesis es una constante,  $f \propto 1/d$ . Luego:

$$\frac{fE1}{fE6} \propto \frac{dE6}{dE1} \cong \frac{329.6\text{Hz}}{82.4\text{Hz}} \cong \frac{0.49\text{mm}}{0.12\text{mm}} \cong 4$$

$$\text{así } fE1 \cong 4fE6$$

En caso de una simulación numérica de una cuerda, debe considerarse la ecuación de onda, la mitigación del sistema y las sujeciones en los extremos de la misma a lo largo del instrumento [9].

Aludiendo lo mencionado, las vibraciones en las cuerdas de guitarra se generan por una pulsación inicial generando una onda. Esta última viaja a lo largo de la cuerda por un tiempo incierto desde la posición de pulsación hasta el traste digitado actual, pasando a su vez sobre las pastillas: son transductores que convierten estas vibraciones en corriente alterna para amplificar el sonido del instrumento de manera eléctrica a través de un amplificador de sonido [10].

El rasgueo de cuerdas ejerce un campo magnético sobre las pastillas, generando a su vez fuerza electromagnética  $\varepsilon$  que, aplicado al estudio presente, es igual a la reluctancia  $R$  total del circuito representado por las cuerdas, el imán de las pastillas y el aire [11 12].

$$\varepsilon = R = Ni + \frac{Jh_m}{\mu_0} \quad (4)$$

donde  $Ni$  representa número de vueltas en la bobina multiplicado por la corriente;  $\mu_0$  la permeabilidad del aire,  $h_m$  la altura del imán y  $J$  la polarización magnética del mismo; este es el principio para calcular los imanes de las pastillas. Según la ubicación de la pastilla, se transducirá una señal diferente. Su disposición en la guitarra logra versatilidad al ejecutar el instrumento ya que es posible lograr un sonido personalizado acentuando más que otras algunas frecuencias cuando se rasguea más de una cuerda.

Se dispone en la guitarra un selector de pastilla en donde las que se encuentran próximas al puente realzan las frecuencias altas, adecuando al instrumento para la ejecución de una frase o un solo; en cambio, las pastillas más cercanas al mástil acentúan las medias y bajas frecuencias, haciendo de la guitarra un componente más rítmico y de acompañamiento [13].

Mencionada la acentuación de frecuencias, se observa en (4) que  $\varepsilon$  es proporcional al número de vueltas en la bobina. Este tipo de bobina genera una señal de mayor definición y amplitud [14]. Es más efectivo adaptar un mejor bobinado que pretender lograr mayor cantidad de corriente adaptando un imán de mayores proporciones; lograría cumplir los requerimientos técnicos más no los ergonómicos para el instrumento.

La señal transducida por la pastilla viaja ahora hacia el nodo de interconexión con el Jack<sup>2</sup> de la guitarra y es ahí donde el instrumentista decide su siguiente parada. En este caso, su destino es un procesador de señal, pero antes de ello hablaremos de esta señal.

## Señal de la guitarra eléctrica

Ya se mencionó que esta señal resulta de la suma de las ondas viajeras en toda la extensión de la cuerda y son consecuencia de la pulsación de la misma. Se produce un número de oscilaciones que, al tratarse de frecuencias relativamente altas, resultan en las vibraciones de cuerda. El instrumentista tiene en cierta medida control sobre estas oscilaciones que pueden llegarse a denominar *forzadas*, ya que dependiendo de la técnica de ejecución y el efecto utilizado sobre esta señal, se controlan las vibraciones de esta ocasionando un sonido personalizado [15]; sin embargo, independientemente de la técnica o el control de vibración, su resultado será una *onda estacionaria*.

Hablando concretamente, la estacionaria se compone de 2 tipos de onda: la generada por la pulsación  $y_1(x, t)$  denominada como *onda incidente* y otra que viaja en sentido opuesto y es el reflejo de la pulsación inicial, calificada con el nombre de *onda reflejada*.

$$y_1(x, t) = -A \cos(kx + \omega t) \quad (5)$$

$$y_2(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

Los signos de los coeficientes de amplitud  $A$  corresponden a la dirección de desplazamiento de onda,  $x$  a la distancia en la cuerda ( $0 \leq x \leq L$ ),  $k$  el número de ondas,  $\omega$  es la frecuencia angular (donde el signo corresponde a su desfase por reflexión en el caso de (6)) y  $t$  el tiempo. Aplicando el principio de superposición (suma de (5) y (6)) y usando las identidades de ángulos de coseno:

$$y(x, t) = (A_{s\omega} \text{sen} kx) \text{sen} \omega t \quad (7)$$

siendo  $A_{s\omega}$  la amplitud de la onda estacionaria [16].

En cuanto al contenido energético de esta, es de valor cero en lo que a los nodos de la onda se refiere. En los antinodos formados existe un contenido energético de pequeñas proporciones expresado como energía potencial [17]. Es posible el incremento de energía modificando las pastillas como se menciona anteriormente, haciendo uso del control de volumen cuando está interconectado el instrumento a un amplificador, o bien puede emplearse un efector de señal *booster*.

<sup>2</sup> Jack: nodo de salida de señal de la guitarra eléctrica.

## Pedales de guitarra

Ya referido el término *efector*, se define como un sistema modificador de los parámetros fundamentales de una señal con el objeto de lograr sonidos específicos al ejecutar instrumentos eléctricos. Son herramientas externas al instrumento que aportan a la interpretación de la guitarra eléctrica, en el caso de la revisión presente. Para su diseño se incorporan puntualmente estudios de la acústica, la teoría de señales y su respectivo procesamiento. Realizada esta indagación, se procede a una implementación de diseño que puede ser hardware o software [18], ya es dependiente de las inclinaciones del desarrollador.

Es vital reconocer que la columna vertebral en el planteamiento de estos procesadores son las operaciones con señales, pues es a través de los procesadores que es posible modificar una señal sonora en su fase, amplitud o frecuencia [19].

Retomando el rumbo que llevaba la señal de estudio; después de su transducción por las pastillas, esta viaja a través del cable para ser alterada por el procesador de señal, implementado en la estructura de un pedal, como lo muestra la figura 1. Debe considerarse que el valor de la impedancia de entrada de estos dispositivos debe ser mayor al de entrada del instrumento que se conecte a él, independientemente de cuál se trate.

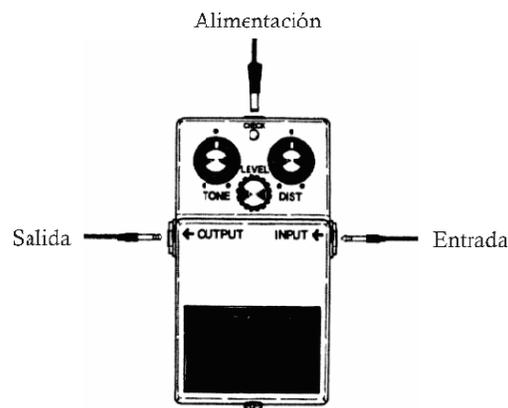


Figura 1. Pedal de guitarra eléctrica

Se puede tomar como valor de referencia una impedancia de  $1M\Omega$  para la entrada de un pedal efector y  $1K\Omega$  para su salida; la guitarra eléctrica tiene una impedancia de  $8K\Omega$  [20].

## Procesadores análogos

Comúnmente los diseños de los pedales análogos están enmarcados por el uso de amplificadores operacionales y transistores al permitir el ajuste de la impedancia de salida, la ganancia adicional en pastillas con bajos niveles de voltaje de salida y, proporcional a esta ganancia, una evidente propiedad de amplificación [21]. También es considerablemente aprovechado el uso de diodos en los circuitos de los pedales de distorsión y los circuitos integrados osciladores para la creación de efectos moduladores de señal [22].

Todas estas especificaciones clarifican que a este tipo de pedales se les denomina como análogos por la manera en que realizan el procesamiento de la señal recibida.

El voltaje de alimentación para la mayoría de pedales procesadores es de 9V, aunque existe una cantidad muy reducida de pedales que cuyas proporciones dimensionales requieren de un voltaje de 18V. Hay otros pedales que, si bien no son de mayores proporciones dimensionales, una de sus configuraciones implica una alimentación de estas magnitudes para generar otro tipo de respuesta de señal [23].

## Procesadores digitales

Pese a que su implementación es física, este tipo de pedales son desarrollados por medio de algoritmos y herramientas computacionales que logren el tratamiento deseado de la señal. Esto implica que la señal continua sea digitalizada: procesada por un microprocesador. Seguido a esto, mediante un conversor digital-análogo (DAC), esta nueva salida digital será traducida como una señal continua con el tratamiento propio del pedal [24].

La digitalización implica el muestreo de una señal, esto es, tomar ciertas partes del contenido y aproximarlos a estándares de programación. Como consecuencia, se desprecia gran parte del contenido de la onda concluyendo en una salida de menor fidelidad. Ya que se trata de una programación, es evidente que está bajo los parámetros de un código; es invariante y por lo tanto es menos versátil en el momento de ejecución [25].

Este tipo de pedales son mucho más económicos que los análogos precisamente por su forma de procesamiento de sonido; aunque se tome un gran número de muestras de señal, nunca podrá ser reconstruida plenamente como una continuidad nuevamente. Siendo el empleo de pedales una disciplina inherente a la interpretación en vivo, se espera una respuesta mucho más fiel por parte de estos mismos. Por esto, gran parte de ejecutantes se inclina hacia los procesadores análogos. No por esto los sistemas digitales son desfavorables en lo concerniente al procesamiento de señales en general; el procesamiento de imágenes, el envío de datos, las transmisiones televisivas y tecnologías de la industria son algunos ejemplos de la aplicabilidad de sistemas digitales [26].

## Características adicionales

El «true bypass» es una característica que pedales tanto análogos como digitales deben tener en común. Consiste en la conservación de la señal de entrada en el nodo de salida cuando el efecto se encuentra inhabilitado [27]. Se compara su funcionamiento al de un amplificador operacional en configuración seguidor de voltaje, pues debe mantenerse el nivel de entrada en la salida del circuito [28].

Aunque los pedales digitales multiefectos comparten varios aspectos de las especificaciones técnicas tanto de los pedales digitales de efecto individual como de los análogos, su frecuencia de muestreo es baja y el seguidor true bypass atenúa la salida sin efecto activo [29]. Por ventaja se cuenta su versatilidad al incluir considerables librerías de efectos de toda clase, son procesadores precisos para el «uso doméstico».

## Desarrollo universitario

Las tecnologías para el desarrollo de procesadores de esta índole no son limitadas. Existen efectores netamente computacionales, otros se encuentran embebidos en consolas de sonido modernas, se han desarrollado tarjetas especializadas para tratamiento sonoro y dispositivos portátiles incluyendo circuitos con tecnología VLSI incorporada [30].

En el Instituto de Investigación en Electrónica y Telecomunicaciones de Japón se desarrolla un procesador de efectos que, aunque incorpora en su diseño la teoría convencional de tratamiento de señales, físicamente no la aplica netamente para aproximarse al arquetipo. Un prototipo similar se desarrolla en la Escuela de Ingeniería Electrónica e Informática de Guangzhou, China [31 32].

Se expone en el 19.º Foro de Telecomunicaciones, Serbia, un procesador para guitarra que contiene efectos moduladores de señal, *vibrato* y *delay* [33]. Se presenta en Argentina un modificador de tono implementando un algoritmo en un DSP [34].

## Análisis de efectos

### Efecto Harmonizer

Denominado también *Pitch Shifter*. Como procesador de señales en su frecuencia, es el pedal que más interactúa con el contenido de la onda, pues revela el contenido armónico de esta. Es un efector para instrumentistas más experimentados ya que debe ser clara la noción de tonalidad, intervalos tonales y armonía. Este refuerza la señal adicionando a ella una segunda voz, da la impresión que se está ejecutando una segunda guitarra [35]. Actúa gracias al principio de transposición de señales el cual se fundamenta en multiplicar el contenido frecuencial de la señal de entrada por una constante, siendo el valor de esta dependiente a la transposición deseada; posteriormente, se suma esta señal producto a la original ingresada en el procesador produciendo un sonido armónico [36].

Si se quisiera realizar una transposición de quinta justa sobre un tono de 220Hz (Nota *La*), la constante modificadora de altura tonal para lograr los 330Hz es  $33/22 = 1,5$  (Nota *Mi*. Se encuentra a una distancia de 3 tonos más 1 semitono desde *La*).

La configuración de este efector permite su interconexión con 2 amplificadores de sonido, consiguiendo así una salida estéreo y una sensación sonora más realista del efecto; admite a su vez la posibilidad de complementarlo con un pedal de expresión para mayor control del tono producido.

Debe indicarse la tonalidad de ejecución de la pieza, si es de modo mayor o menor y el intervalo tonal de transposición de señal [37].

En lo que a la tonalidad del instrumento respecta, esta puede ser variable dependiendo de la disposición de sus cuerdas, específicamente en la tensión aplicada. Se evidencia en (1) que a mayor tensión, mayor será la frecuencia emitida por la cuerda [38]. Es común que en algunos géneros y estilos musicales una o más cuerdas sean ajustadas a diferentes frecuencias propiamente para este tipo de interpretaciones.

Puede observarse el comportamiento de este y de los demás procesadores al realizarse una simulación en el software Scilab, accediendo a sus librerías de captura de sonido y sus respectivas gráficas de espectro [39].

Se genera un vector en el que se registran 2 señales: la primera corresponde a la señal de entrada (440Hz), y la segunda es su segundo armónico (880Hz). Este último se logra multiplicando el contenido frecuencial de la señal por una constante  $k=2$ .

```
t=soundsec(2);
s=[sin(2*pi*440*t);sin(2*pi*880*t)]; sound(s)//Efecto Pitch
Shifter.
```

Para lograr apreciar el comportamiento de este efecto gráficamente, se toman valores de menor frecuencia:

```
t=soundsec(1);
s=[sin(2*pi*5*t);sin(2*pi*10*t)];
plot(t,s)
```

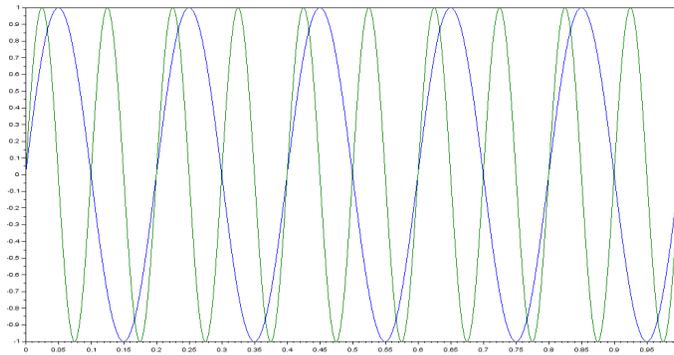


Figura2. Pitch Shifter

Otra adaptación del *pitch shifter* es la de octavador, el cual armoniza la señal de entrada con otra de frecuencia 2 o 3 veces más baja. Puede implementarse para generar armónicos valiéndose de la retroalimentación de la señal a través de la bobina de la pastilla, comúnmente conocido como *feedback* [40]. También pueden generarse con la ejecución propia del instrumento, sin necesidad de efector alguno.

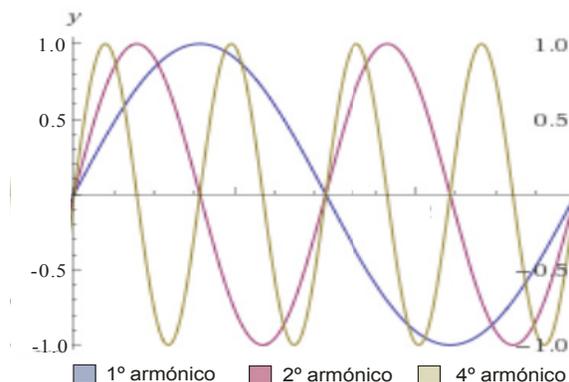


Figura 3. Representación de armónicos de una señal  $\text{Sen}(x)$

Se consiguen de manera natural cuando se digitan levemente posiciones específicas del mástil, por ejemplo: el 5.º traste corresponde al cuarto armónico de la cuerda pulsada, el 7.º traste corresponde al tercer armónico de la cuerda [41] que, a su vez, es el 2.º armónico de la frecuencia correspondiente a ese traste. La forma artificial de producirlos es un poco más técnica, pues se logra pulsando la cuerda e induciendo un rebote adicional digitando con el pulgar o el índice las áreas cercanas a las pastillas de la guitarra eléctrica [42]. Utilizando el *harmonizer*, se logra procesar la señal generando como máxima distancia tonal de 7 tonos, esto es, su 2.º armónico.

## Efecto Delay

Como su nombre lo indica, es un efecto que *retrasa* la señal, siendo esta manifiesta en el mismo instante de envío y en otro próximo a este, según la configuración del procesador. Es posible en la medida que se desfasa la señal de entrada, se mantiene o atenúa su amplitud y se hace una sumatoria de todo este contenido:  $X[n] + X[n - 1] + X[n - 2]$  [43]. Se hace manifiesto que, al igual que el *pitch shifter*, este pedal se vale de los principios de transposición de señales para lograr su efecto.

Digitalmente, es intuitivo que para lograrlo se disponga en el procesador de una memoria que almacene la información recibida y, según la programación efectuada, reproduzca las señales de forma sucesiva. En la manera análoga se hace uso de circuitos integrados especiales que interactúan con la amplitud de la señal y su desfase [44], siendo este alterado por medio de líneas *bucket-brigade device* (BBD): arreglo de condensadores y circuitos temporizadores [45].

La rutina que simula este efecto es:

```
t=soundsec(3);
s=sin(2*pi*440*t);
//f1=440KHz(Nota La)
//f2=550KHz(Nota Do#)
[nr,nc]=size(t); //Se crea vector, se subdivide el vector en 4
partes en donde las 2 primeras asignaciones s & s(nc/5:nc)
serán las pulsaciones y las otras dos sus sonidos sucesivos.
s(nc/5:nc)=sin(2*pi*550*t(nc/5:nc));
s(nc/3:nc)=sin(2*pi*440*t(nc/3:nc));
s(nc/2:nc)=sin(2*pi*550*t(nc/2:nc));
sound(s)
```

Para apreciarlo gráficamente:

```
t=soundsec(3);
s=sin(2*pi*20*t);
[nr,nc]=size(t);
s(nc/5:nc)=sin(2*pi*10*t(nc/5:nc));
s(nc/3:nc)=sin(2*pi*20*t(nc/3:nc));
s(nc/2:nc)=sin(2*pi*10*t(nc/2:nc));
plot(t,s)
```

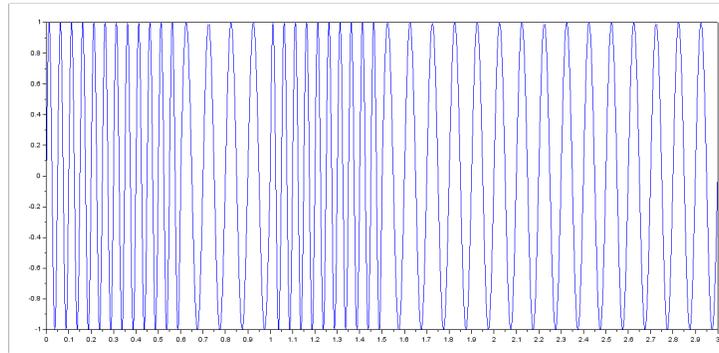


Figura 4. Efecto delay de eco simple

### Efecto Booster

Este procesador modifica la señal en su amplitud, la incrementa. Consiste básicamente en un potenciómetro con el que se configura la ganancia que se desea obtener sobre el nivel de intensidad actual [46]. Como cada uno de los procesamientos propios de la guitarra, se debe ser cauteloso con la ganancia que se configura ya que puede causar daños auditivos y perjudicar los equipos de ejecución si está en un nivel bastante alto. Esta ganancia se expresa en decibeles (dB) y es la relación que tiene la entrada vs. la potencia de salida del procesador [47].

Típicamente la ganancia de un *booster* aumenta desde +0.5dB hasta el orden de las veintenas de dB [48]. Hay diseños de estos pedales enfocados al realce de las frecuencias bajas de la guitarra; su potencia aumenta cuando se utiliza condensadores de grandes capacitancias [49]. Su funcionamiento es análogo al de un amplificador operacional en configuración de amplificador no inversor cuya salida se somete a los valores resistivos del circuito. En este caso tenemos una resistencia variable en donde la ganancia depende de su ajuste [50]. Es aplicado típicamente en la ejecución de solos de guitarra. Este último efecto se simula con el principio de multiplicación de señales por un valor constante  $k$ .

Si  $x[n]$  es el sonido a la entrada, la respuesta será  $k \cdot x[n]$ .

Como resultado se obtiene una salida caracterizada por la amplificación de amplitud de la señal de entrada. Aplicado a la revisión, representa la ganancia del booster, mayor intensidad sonora.

```
//Descargar audio .wav de prueba en:
http://freewavesamples.com/alesis-s4-clean-gtr-c4
// Para cargar el archivo en Scilab, se indica la dirección
de almacenamiento y el nombre del audio con el comando
"loadwave".
y=loadwave ("SCI/modules/sound/demos/Alesis-S4-Plus-Clean-Gtr-
C4.wav");
sound(y) //Lectura de señal original
sound(y*2) // Multiplicación de señal
```

Para observarlo:

```
y=wavread("SCI/modules/sound/demos/Alesis-S4-Plus-Clean-Gtr-
C4.wav");
yb=y*2 //Señal amplificada
subplot(2, 1, 1)
plot2d(y(1,:)) // Sin Booster
subplot(2,1,2)
plot2d(yb(2,:)) // Con Booster
```

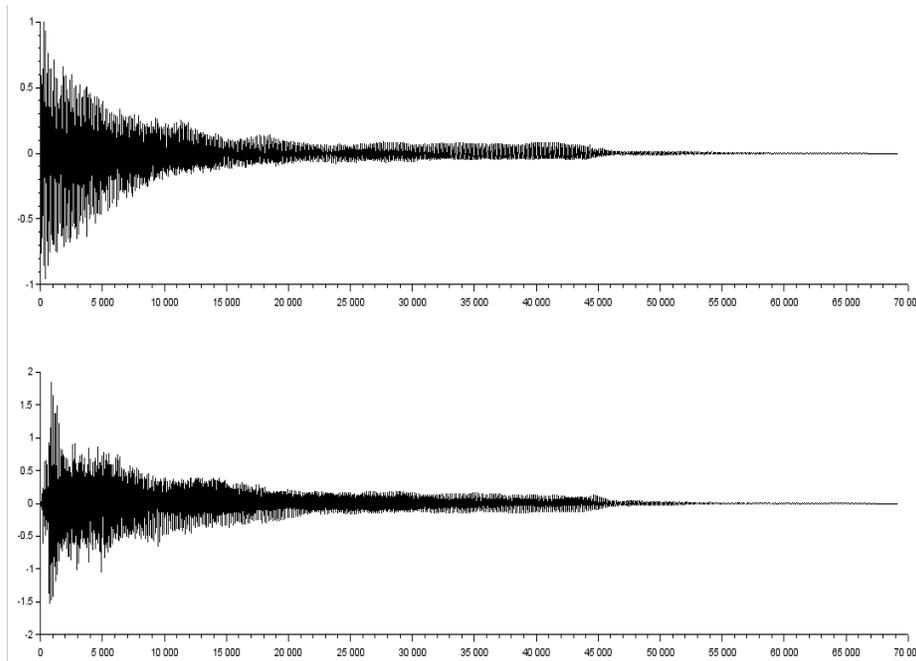


Figura 5. Espectro de audio sin booster y con booster activo, respectivamente

## Conclusiones

Se expresa en el documento detalladamente cada etapa de la señal de guitarra eléctrica, desde su origen hasta el procesamiento mismo, con el ánimo de contribuir al conocimiento tanto de este tema en específico, como de otros que puedan estar relacionados de manera directa o indirecta. Los datos técnicos y teóricos aportan al conocimiento de aquellos vinculados directamente con los temas que se enlazan con la ejecución instrumental, técnicos e ingenieros de sonido, procesamiento de señales, elaboración y fabricación de guitarras (lutieres) y equipos de audio.

Las simulaciones gráficas y audibles realizadas de cada pedal de efecto afirman la revisión temática elaborada. Sirven como referencia a lectores individuales y grupos que comparten interés por este campo de estudio y aspiran a un posible desarrollo de sistemas procesadores de señales en el futuro; resulta entonces conveniente el valerse de la revisión en su totalidad como un recurso de aprendizaje, enseñanza y fundamento de investigación.

## Referencias

- [1] J. H. Jaramillo. "Principios de audio". *Documentación Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana*. 2005. pp. 5-6-
- [2] A. H. Cromer. *Física en la ciencia y en la industria*". Reverté. Barcelona: 1998. pp. 372.
- [3] Brüel & Kjaer. "Measuring Sound". *Brüel & Kjaer's Library*. 1984. p. 9.
- [4] A. C. Isbert. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1998. p. 240.
- [5] N. Marmaras. N. Zarboutis. "Ergonomic redesign of the Electric Guitar". *Elsevier Journal*. 1997. pp. 60-64.
- [6] L. P. Viñas., J. C. Cardona. *Dispositivos electrónicos y fotónicos. Fundamentos*. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. 2003. pp. 11-12.
- [7] I. Rezic. L. C´urkovic. M. Ujevic. "Metal ion release from Electric Guitar strings in artificial sweat". *Elsevier Journal*. 2009. pp. 1985-1986.
- [8] J. D. Wilson. A. J. Buffa. *Física*. México. 5.ª Ed. Pearson Education, 2003. pp. 469.
- [9] J. A. Torres. P. L. Rendón. "A simple method for synthesizing and producing Guitar Sounds". *IOP Publishing*. 2009. pp. 504.
- [10] R. Denyer. *Manual de guitarra*. Madrid: Editorial Raíces. 1992. pp.50-52.
- [11] G. Lemarquand. V. Lemarquand. "Calculation Method of Permanent-Magnet Pickups for Electric Guitars". *Transactions on Magnetics*, Vol. 2007. pp. 3574.
- [12] A. Donate. *Principios de electricidad y electrónica II*. Marcombo Boixareu Editores. 1999. pp. 73.
- [13] M. French. B.Harriger. "Assembling an Electric Guitar". *COLLABnFAB Organization*. 2010. pp. 25-27.
- [14] R. M. French. "Technology of the Guitar". *Springer*. 2012. pp. 168-169.
- [15] J. Gustems. "Música y sonido en los audiovisuales". *Publicacions i edicions Universitat de Barcelona*. 2012. pp. 34.
- [16] H. D. Young. R. A. Freedman. *Física Universitaria*. Pearson Education. 12.ª Ed. 2009. pp. 507-513.
- [17] J. L. Alfaro, "Ondas estacionarias". *Documentación de la Facultad de Física de la Pontificia Universidad Católica de Chile, Física General*. 2010. pp. 1-2.
- [18] G. Evengelista. "Physically Inspired Playable Models of Guitar, a tutorial". *4th International Symposium on Communications, Control and Signal Processors*. 2010. p. 2.
- [19] A. V. Oppenheim. A. S. Willsky. S. H. Nawav. *Señales y Sistemas*. .2.ª Ed. Pearson Education. 1998. pp. 423.
- [20] L. A. Rico .*Turbo Manual de Guitarra Eléctrica*. R&R Muñonez. p. 292.
- [21] Available online at [www.aronnelson.com/DIYFiles/up/](http://www.aronnelson.com/DIYFiles/up/). August, 2015.
- [22] C. D. Paiva. S. D'Angelo. J. Pakarinen.V. Välimäki. "Emulation of Operational Amplifiers and Diodes". *IEEE Transactions on Circuits and Systems—II: Express Briefs*. Vol. 59. 2012. p. 688.
- [23] Available online at [www.manualslib.com/manual/314827/Boss-Ds-1.html?page=9#manual](http://www.manualslib.com/manual/314827/Boss-Ds-1.html?page=9#manual). July, 2015.
- [24] "Filtros digitales". *Documentación de Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. 2005.
- [25] Available online at <http://screaminfx.com/tech/analog-verse-digital-guitar-pedals.htm>. July, 2015.
- [26] Available online at [www.articleworld.org/Analog\\_signal\\_processing](http://www.articleworld.org/Analog_signal_processing). July, 2015.
- [27] Available online at [https://books.google.com.co/books?id=SCGWb6KEE7AC&pg=PT167&dq=TRUE+bypass+guitar&hl=es&sa=X&ved=0CCsQ6AEwAmoVChMlqay\\_q6eOxwIVCZseCh1cbQIH#v=onepage&q=TRUE%20bypass%20guitar&f=false](https://books.google.com.co/books?id=SCGWb6KEE7AC&pg=PT167&dq=TRUE+bypass+guitar&hl=es&sa=X&ved=0CCsQ6AEwAmoVChMlqay_q6eOxwIVCZseCh1cbQIH#v=onepage&q=TRUE%20bypass%20guitar&f=false). August, 2015.
- [28] A. H. Donate. *Electrónica aplicada*. Barcelona: Marcombo Ediciones Técnicas. 2012. pp. 343-344.
- [29] Harman International Industries. "RP90 Owner's Manual". *Harman© Professional*. 2007.
- [30] A. V. Oppenheim. R. W. Schafer. *Discrete-Time Signal Processing*. New Jersey. Prentice-Hall. 1999. p. 9.
- [31] K. Byun. N. Eum. H. Jung. K. Jeong. J. Koo. "Development of Portable Sound Effector". *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*. 2011.
- [32] J. Fan. Y. Chen. R. Liu. "The Realization of Multifunctional Guitar Effectors & Synthesizer Based on ADSP-BF533". *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*. 2008.
- [33] M. Malko. J. Kovacevic. R. Peckai-Kovac. M. Gajic. M. Jovanovic. "Implementation of digital audio effects for electric guitar on DSP platform". *19th Telecommunications Forum (Telfor)*. 2011.

- [34] G. Bisheimer. M. O. Sonnaillon. "Modificación del tono de señales de audio en tiempo real". *Research Gate*. 2006.
- [35] Available online at [www.bossus.com/products/ps-6/](http://www.bossus.com/products/ps-6/). August, 2015.
- [36] E. Gómez. "Efectos Digitales Básicos". Síntesi i Processament del So I, Departament de Sonologia, Escola Superior de Musica de Catalunya. 2009. p. 16.
- [37] BOSS Products of Roland. "PS-6 Harmonist Owner's Manual". 2010.
- [38] A. P. French. *Vibraciones y ondas*. Massachusetts. Editorial Reverté. 1974. p. 189.
- [39] Available online at [https://help.scilab.org/doc/5.3.3/en\\_US/wavread.html](https://help.scilab.org/doc/5.3.3/en_US/wavread.html). August, 2015.
- [40] E. Gómez. I. Cuenca. *Manual Técnico del Sonido*. Madrid. 7.ª Ed. Paraninfo, 2011. p. 67.
- [41] Universidad Nacional de Río Cuarto. Facultad de Ingeniería. "Armónicos: Teoría, definiciones y aspectos fundamentales". Presentación de Especialización en Sistemas de Energía Eléctrica de la UNRC. 2012. pp. 34.
- [42] Available online at [https://en.wikipedia.org/wiki/Pinch\\_harmonic](https://en.wikipedia.org/wiki/Pinch_harmonic). July, 2015.
- [43] E. Winer. "The Audio Expert". Massachusetts. *Focal Press*. 2012. pp. 46-49.
- [44] J. Schneider. *The Contemporary Guitar*. Los Angeles. University of California Press. 1985. pp. 70-71.
- [45] Available online at <http://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/86816/PANASONIC/MN3207.html>. August, 2015.
- [46] Available online at [www2.gibson.com/news-lifestyle/features/en-us/effects-explained-booster-comp.aspx](http://www2.gibson.com/news-lifestyle/features/en-us/effects-explained-booster-comp.aspx). July, 2015.
- [47] R. Boylestad. *Introducción al análisis de circuitos*. México: 10.ª Ed. Pearson Education. 2004. pp. 1021-1023.
- [48] Dunlop manufacturing Inc. "MXR M133 Micro Amp's User Manual". 2011.
- [49] P. K. Sood, *Electronic Musical Projects*. Dehli. Business Promotion Bureau. 1979. pp. 9-10.
- [50] R. E. Thomas. *Circuitos y señales: Introducción a los circuitos lineales y de acoplamiento*. Barcelona: Editorial Reverté. 1991. p. 161.
- [51] Available online at [www-amna.math.uni-wuppertal.de/~ehrhartd/scilab/doc/html/manual/docu016.html](http://www-amna.math.uni-wuppertal.de/~ehrhartd/scilab/doc/html/manual/docu016.html). October, 2015.
- [52] [https://help.scilab.org/doc/5.5.2/en\\_US/subplot.html](https://help.scilab.org/doc/5.5.2/en_US/subplot.html). October, 2015.
- [53] [www.openeering.com/sites/default/files/Plotting\\_in\\_Scilab.pdf](http://www.openeering.com/sites/default/files/Plotting_in_Scilab.pdf). October, 2015.
- [54] R. L. Freeman. *Fundamentals of Telecommunications*. 2<sup>nd</sup> Edition. Jhon Wiley & Sons INC. 2005. p. 61.
- [55] Available online at <http://scilab.ninja/study-modules/scilab-control-engineering-basics/module-1-transfer-functions-and-frequency-responses/>. October, 2015.
- [56] Figura 1. Pedal de guitarra eléctrica. Disponible en <http://www.manualslib.com/manual/314827/Boss-Ds-1.html?page=9#manual>. Agosto, 2015.