

# Trabajo Práctico Especial de Señales y Sistemas: Análisis y síntesis de instrumentos musicales: cuerdas

---

*Segundo Cuatrimestre de 20121604*

---

## Objetivo

El presente proyecto especial tiene como objetivo hacer uso de técnicas y herramientas de análisis de señales, aplicándolas a un problema práctico, de utilidad real. El tema elegido para trabajo es el análisis y síntesis del sonido generado al pulsar una cuerda de una guitarra. Para ello se utilizarán las técnicas y herramientas de análisis que se estudiaron previamente en el desarrollo de la cursada. Estas herramientas serán:

- Espectro de corto tiempo de una señal. Análisis conjunto de elementos de tiempo y frecuencia.
- Diseño de filtros digitales. Especificaciones derivadas de la aplicación.

## Requisitos para la aprobación:

Este trabajo práctico será evaluado exclusivamente en la fecha indicada en el calendario y en el turno en el cual el alumno se halle inscripto. La fecha de entrega del trabajo es **inamovible**, el alumno que no entregue su trabajo en dicha fecha deberá considerarse libre. La evaluación del proyecto es individual y se hará en forma oral o escrita por los docentes auxiliares. Por ese motivo las evaluaciones podrán fijarse para el día de la entrega o posteriores, del modo que lo designen los docentes de cada grupo. **Esto de ninguna manera implica que el trabajo pueda entregarse en fechas posteriores**, sino sólo que la evaluación se puede realizar después, de acuerdo a la cantidad de alumnos de cada turno. Queda a criterio de los docentes de cada práctica exigir entregas parciales no definitivas (sin nota) para regular el desarrollo del trabajo por parte de los alumnos. La evaluación final puede incluir preguntas sobre:

- Ítems particulares sobre los ejercicios de esta guía y su implementación en Matlab.
- Conceptos teóricos necesarios para realizar los ejercicios.

Puede requerirse también al alumno que implemente alguno de los ejercicios similares en la computadora en el momento de la evaluación. Por lo tanto el alumno debe presentarse el día de la evaluación con:

- Esta guía.
- Las soluciones a los problemas planteados: Cuando el problema requiera una implementación, la misma debe estar adecuadamente descripta y debidamente justificada. Es decir, si es necesario justificación teórica, ésta debe estar desarrollada. Si se pide una implementación práctica la misma debe estar adecuadamente documentada de modo que el docente pueda constatar que las especificaciones requeridas se cumplen. Esto incluye la presentación del programa de MATLAB utilizado, y los gráficos necesarios para mostrar los resultados obtenidos en formato electrónico e impresos. Se sugiere que el formato electrónico no dependa de que funcione internet para poder verse, para evitar inconvenientes. Todos los gráficos deberán tener título, comentarios en ambos ejes sobre la unidad a representar y el eje de abscisas debe estar en unidades de tiempo o frecuencia según corresponda.

## **Nota del trabajo práctico especial**

El proyecto especial no tiene calificación numérica. Sólo existirán las categorías Aprobado/No aprobado. La aprobación del Proyecto Especial sin embargo es condición necesaria para la aprobación de la cursada. La nota final de cursada será la nota del parcial, aunque es posible que ésta sea modificada por la evaluación del Proyecto Especial tanto subiéndola como bajándola hasta un máximo de 10 puntos.

## Análisis y síntesis de instrumentos musicales

Podemos definir como música a la ciencia de los sonidos y al arte que nace de su combinación y sucesión temporal [8]. En base a esta definición, los elementos constitutivos de la música son el sonido y el ritmo. El sonido es la sensación que genera en el oído la vibración del aire que lo rodea. La división de la física que estudia los sonidos se conoce como acústica, y la acústica musical es la subdivisión que estudia la relación entre la ciencia y el arte de la música. La acústica musical tiene una extensa historia, que se remonta a los griegos. En [1] podemos encontrar una recopilación de los hitos más importantes de esta ciencia. En el presente trabajo nos centraremos en el análisis y síntesis de los sonidos generados por los instrumentos musicales. Más específicamente nos centraremos en los sonidos emitidos por las cuerdas de una guitarra al pulsarla.

### El sonido

El sonido es un fenómeno físico ondulatorio, que consiste en la propagación a través de medios elásticos de las perturbaciones generadas por un elemento vibrante, y que es capaz de estimular el oído humano. Un objeto que vibra genera cambios de presión en el al aire circundante, estos cambios de presión son inestables, de tal forma que si en un instante dado de tiempo en un punto del espacio el aire se comprime, en los puntos vecinos el aire disminuye su presión. Como tanto el estado de compresión como de descompresión son inestables, estos se suceden iterativamente y se propagan a sus puntos vecinos. Este proceso no conlleva un movimiento efectivo de materia, si no de energía. En la Figura 1 se puede observar la evolución en el tiempo de la onda de presión generada por un cuerpo que vibra, y donde podemos ver su carácter ondulatorio.

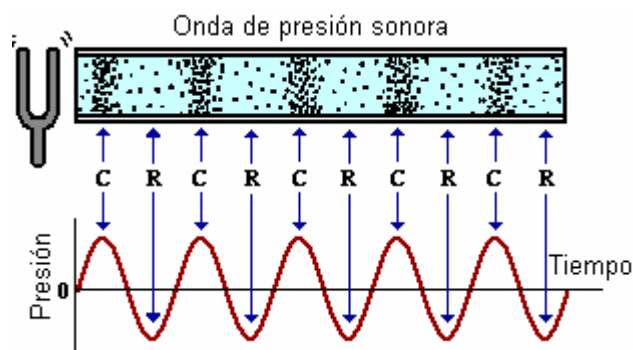


Figura 1: Evolución de la onda de presión sonora. La letra "C" indica compresión o alta presión, y la letra "R" rarefacción o baja presión. Adaptado de [9].

Los sonidos puede describirse con tres atributos perceptuales: tono, intensidad y timbre; que tienen su correlato físico a la frecuencia fundamental, amplitud y configuración de los armónicos. La frecuencia de un sonido es un parámetro físico, e indica la velocidad de vibración de la fuente, medido en ciclos por unidad de tiempo, y el tono es la evaluación subjetiva de un oyente de dicha frecuencia. Los sonidos de baja frecuencia son percibidos como graves o bajos, y los de alta frecuencia son percibidos como agudos o altos. El oído humano solo es sensible a las frecuencias en el rango de 20 Hz a 20 kHz, donde Hz indica ciclos por segundo, y por lo cual toda onda con una frecuencia fuera de este rango no es considerada como una onda sonora. La intensidad o sonoridad de un sonido se relaciona con la cantidad de energía que transporta la onda sonora. Como el medio en que se propaga el sonido absorbe parte de su energía, a medida que nos alejamos de una fuente sonora, su intensidad disminuye. La unidad comúnmente utilizada para medir la energía o potencia de una onda sonora son los decibeles.

## Sonidos musicales

Las personas consideramos a un sonido como agradable si son regulares y periódicos. En cambio percibimos como ruidosos a los sonidos que no tienen una composición armónica de frecuencias. Un cuerpo al vibrar no genera un sonido puro o de una sola frecuencia, como en el caso del diapasón, si no que generan sonidos que contienen diferentes frecuencias, que guardan una relación entera o armónica entre ellas. La frecuencia más baja se la denomina fundamental, y a las otras armónicos. En el sistema musical occidental, solo se utilizan sonidos de determinadas frecuencias fundamentales, a los cuales llamamos notas, y que se estructuran en escalas. Así por ejemplo, la escala musical de igualmente temperada consiste en doce notas que se repiten por octavas, de tal forma que una nota de una octava tiene una frecuencia fundamental el doble de la misma nota en la octava anterior. Para este sistema, cada octava la separación entre las frecuencias fundamentales de dos notas consecutivas están relacionadas por la raíz duodécima de dos, y se toma como referencia la nota denominada *La*, que en la tercera octava tiene una frecuencia fundamental de 440 Hz.

En general, los armónicos poseen menor energía que la fundamental, y la configuración de sus intensidades define el timbre de un sonido. Los armónicos también definen la forma de onda de la señal. A través del timbre podemos distinguir si una nota musical ha sido ejecutada por uno u otro instrumento, como podemos observar en la Figura 2.

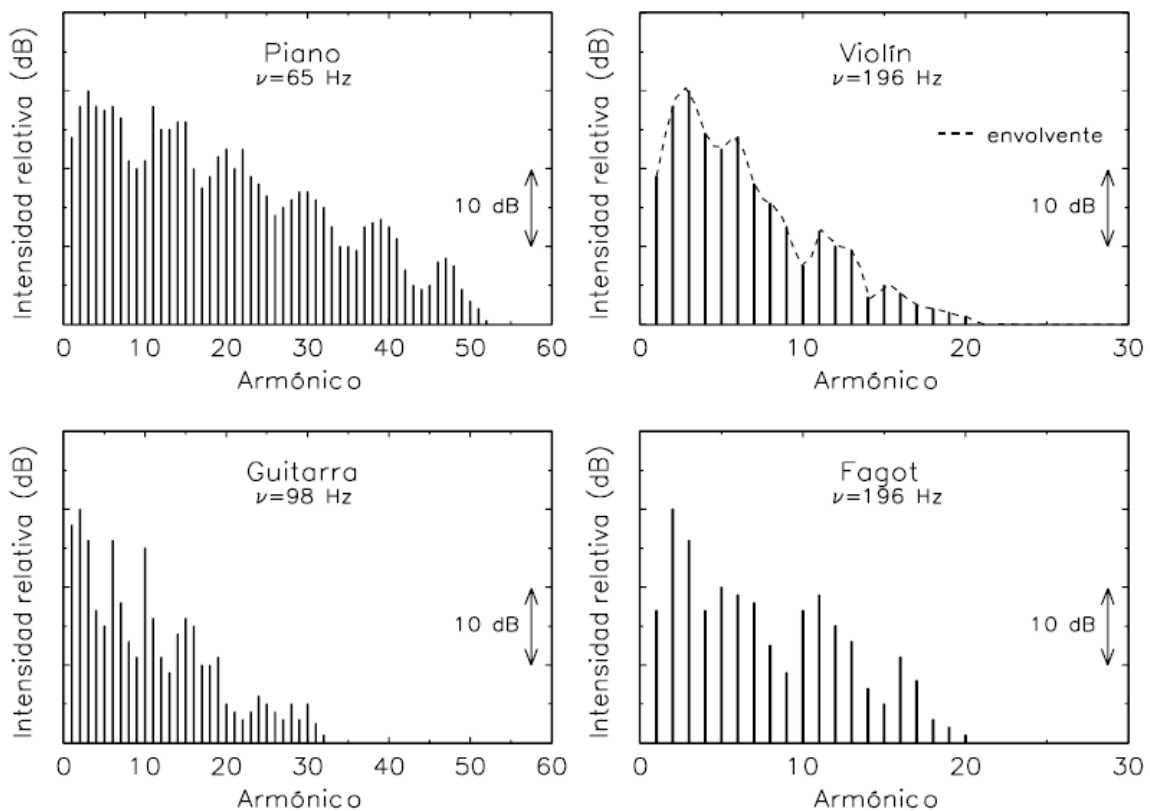


Figura 2: Amplitud de los armónicos del sonido dos notas ejecutadas por distintos instrumentos musicales. Extraído de [13].

**Ejercicio 1:** Genere una señal de audio  $x[n]$  como:

- $x[n] = \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot n \cdot T) + \sin(2\pi \cdot 2 \cdot f_0 \cdot n \cdot T) / 2 + \sin(2\pi \cdot 3 \cdot f_0 \cdot n \cdot T) / 3 + \sin(2\pi \cdot 4 \cdot f_0 \cdot n \cdot T) / 4$
- $x[n] = \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot n \cdot T) + \sin(2\pi \cdot 3 \cdot f_0 \cdot n \cdot T) / 3 + \sin(2\pi \cdot 5 \cdot f_0 \cdot n \cdot T) / 5 + \sin(2\pi \cdot 7 \cdot f_0 \cdot n \cdot T) / 7$

con  $f_0 = 370$  Hz;  $T=1/44100$  ms; y  $0 \leq n \leq 3/T$ . Escuche la señal, grafique la forma de onda y obtenga su espectro de frecuencia.

**Ejercicio 2:** Repita el Ejercicio 1: con las señales contenidas en los archivos *guitarra\_370.wav*, *flauta\_370.wav*, y *piano\_370.wav*. Observe y comente sobre la configuración de las frecuencias presentes para cada uno de los instrumentos<sup>1</sup>.

El contenido espectral del sonido emitido por un instrumento no depende solo del instrumento, sino que también depende de la nota que se esté interpretando y de cómo se ejecute. En la Figura 3 podemos observar la amplitud de los armónicos para dos notas emitidas por el mismo clarinete, donde son muy visibles las diferencias en uno y otro caso.

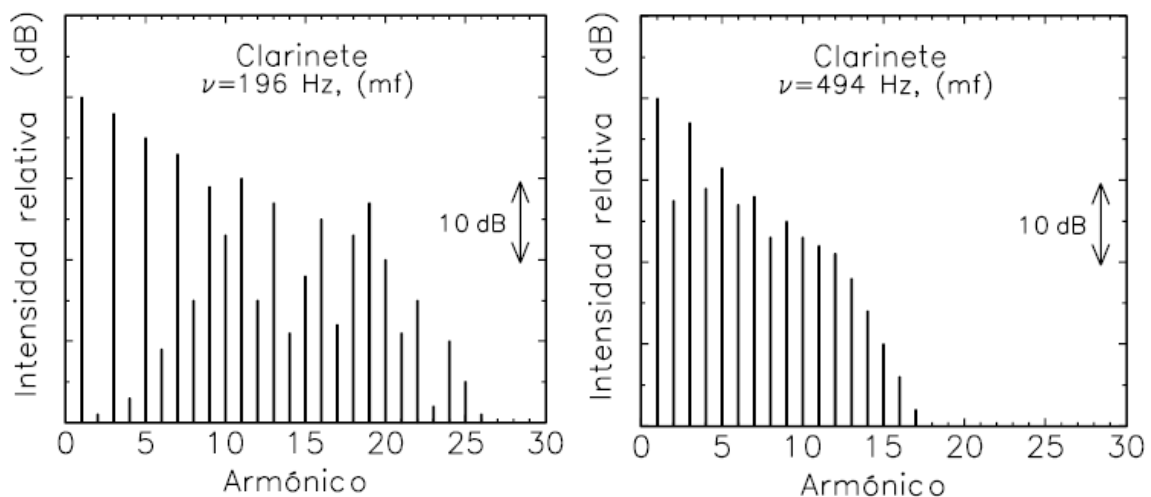


Figura 3: Amplitud de los armónicos del sonido dos notas ejecutadas por un clarinete. Extraído de [13].

**Ejercicio 3:** Obtenga la amplitud de los armónicos de las tres primeras notas contenidas en el archivo *canción.wav*.

Otro aspecto a tener en cuenta en los sonidos es su evolución temporal. Las intensidades y contenido armónico varían con el tiempo. Por ejemplo, al analizar la variación de amplitud en la grafica de la forma de onda del ejercicio anterior, podemos observar que su intensidad disminuye, hasta desvanecerse. En general, se distinguen tres zonas en la evolución temporal de una nota: el ataque, una zona de inestabilidad donde el sonido comienza a tomar forma; el sostenido, donde las ondas ya están estabilizadas; y el decaimiento final. En la Figura 4 se puede observar un esquema de la evolución temporal de la intensidad de la señal de una nota musical.

**Ejercicio 4:** En las formas de onda del Ejercicio 2: marque las zonas de inicio del ataque, sostenido y decaimiento de cada señal.

Igualmente, si realizamos un análisis tiempo-frecuencia, podemos observar que el contenido espectral varía con el tiempo. Esto también es un factor muy importante para definir el timbre de un instrumento musical.

<sup>1</sup> Más archivos de audio de notas musicales ejecutadas con diferentes instrumentos pueden ser encontrados en el repositorio <http://theremin.music.uiowa.edu/index.html>.

**Ejercicio 5:** A las ondas del Ejercicio 2: realice un análisis tiempo-frecuencia y compare entre ellas la variación temporal de los armónicos.

**Ejercicio 6:** Repita el ejercicio anterior para la señal que se encuentra en el archivo *canción.wav*.

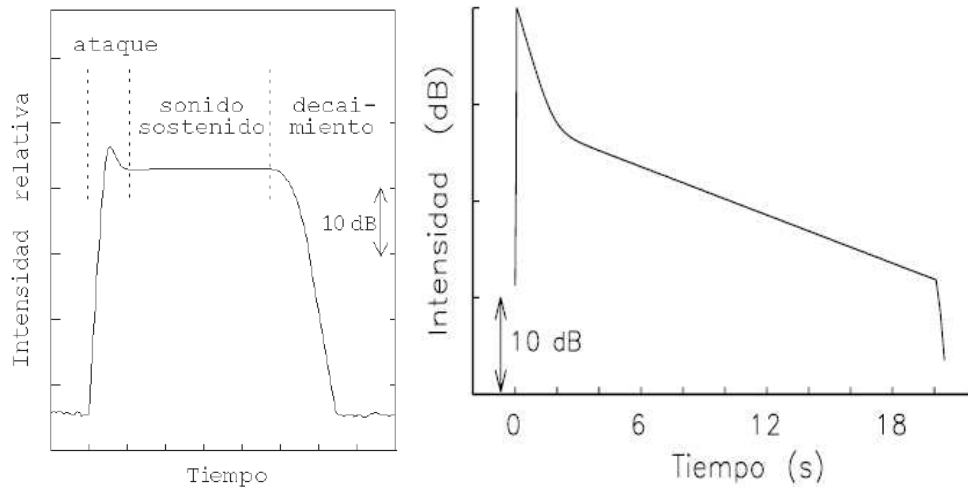


Figura 4: Esquema de la evolución temporal de la intensidad de la señal de a) una nota musical teorica; y b) de un piano. Extraídos de [13].

Como vimos, todo cuerpo tiene una frecuencia de vibración característica o propia. Cuando una fuerza exterior periódica estimula la vibración de un cuerpo, con una frecuencia igual a la frecuencia de vibración propia de dicho cuerpo, se produce el fenómeno conocido como resonancia. Cuando existe resonancia, el cuerpo va aumentando progresivamente la intensidad de su vibración. Este efecto puede tener consecuencias beneficiosas, como en las cajas de los instrumentos musicales de cuerda, o destructivas como cuando una copa de cristal se rompe por entrar en resonancia con un sonido. Las cajas de resonancia o resonadores se construyen para favorecer determinadas frecuencias, y obviamente, modifican el timbre de los sonidos. Ejemplo de resonadores son la caja de una guitarra o el tracto vocal. Las frecuencias que se ven favorecidas en un resonador se las conoce con el nombre de formantes. En la Figura 5 se pueden observar la respuesta en frecuencia de las cajas de una guitarra y de un violín, obtenidas en forma experimental.

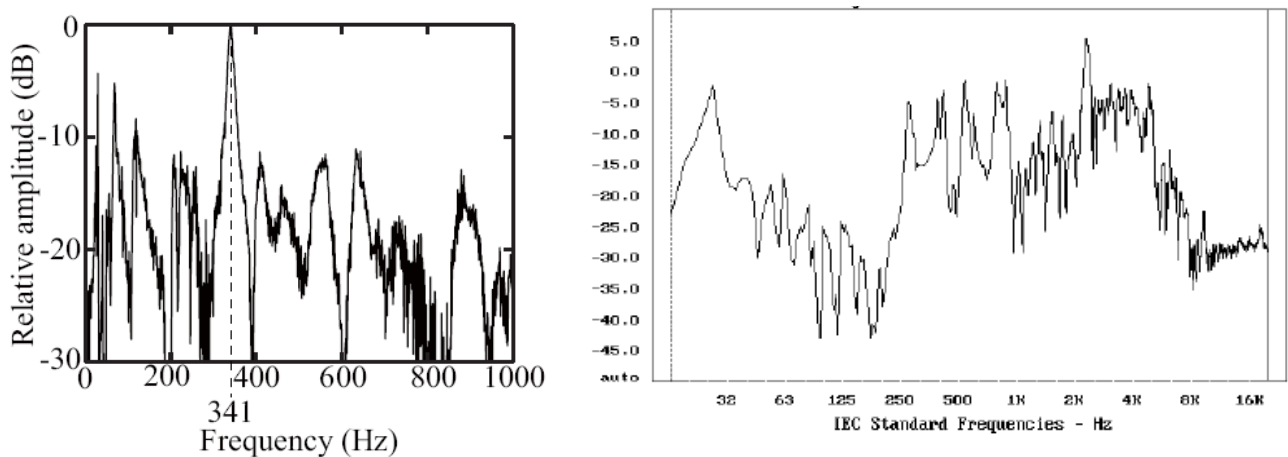


Figura 5: a) Respuesta en frecuencia del cuerpo de una guitarra. Extraído de [11]. b) a) Respuesta en frecuencia del cuerpo de un violín. Extraído de [12].

**Ejercicio 7:** Encuentre los formantes del tracto vocal al emitir la vocal [a] que fue registrada en el archivo *a.wav*. Para resolver este ejercicio, puede utilizar la herramienta wavesurfer<sup>2</sup>.

El componente principal e indispensable de un instrumento musical es un cuerpo que vibre, u oscilador. Además, pueden tener acoplado un resonador, que como ya vimos modifica el timbre del instrumento. También es interesante ver como se estimula al oscilador. En una guitarra por ejemplo, las cuerdas son los osciladores, la caja es el resonador, y la forma de excitación es a través de la pulsación de la cuerda tensada, ya sea por un dedo o una púa.

Existen diferentes posibles clasificaciones de los instrumentos musicales, por ejemplo instrumentos de viento, cuerda o percusión. Para una clasificación muy detallada, consultar [10]. En este trabajo nos vamos a centrar en los instrumentos de cuerda, más específicamente en la guitarra.

### ***El sonido de la guitarra***

En una guitarra las cuerdas están fijas en ambos extremos, y al ser pulsadas a lo largo de la cuerda viajan vibraciones transversales; estas perturbaciones rebotan en los extremos fijos, y se forma un patrón de onda estacionaria. Los modos naturales de vibración dan origen a las ondas longitudinales en el aire del entorno, el cual los transmite a nuestros oídos en forma de sonido musical.

La densidad y tensión de la cuerda determinan su velocidad de vibración: a mayor tensión y menor densidad, más agudo será el sonido que emita. Una cuerda de densidad lineal  $\epsilon$  Kg/m, de longitud  $L$  metros, y sometida a una tensión  $K$  Newtons, tiene una deflexión o desplazamiento  $y(t,x)$ , en el instante  $t$  segundos,  $t \geq 0$ , en cada uno de sus puntos  $x$ ,  $0 \leq x \leq L$ , de acuerdo a la ecuación:

$$K \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial x^2} = \epsilon \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial t^2}$$

Esta ecuación es resuelta por una onda viajera de velocidad dada por:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\epsilon}}$$

y que se mueve en ambos sentidos.

Si denotamos con  $y_d\left(t - \frac{x}{c}\right)$  la onda que se dirige a la derecha y  $y_i\left(t + \frac{x}{c}\right)$  la que se dirige a la izquierda, podemos escribir la solución general como la suma de ambas:

$$y(t, x) = y_d\left(t - \frac{x}{c}\right) + y_i\left(t + \frac{x}{c}\right)$$

De aquí podemos deducir que la frecuencia fundamental  $f_0$  del sonido emitido será:

---

<sup>2</sup> <http://www.speech.kth.se/wavesurfer/>

$$\frac{2L}{1/f_0} = \sqrt{\frac{K}{\epsilon}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{K}{\epsilon}}$$

**Ejercicio 8:** En el archivo *cuerdas.wav* se almacenó el audio generado al pulsar las cuerdas de una guitarra, una a continuación de otra. Si todas las cuerdas están sometidas a la misma tensión, ordene de mayor a menor los sonidos según el peso de la cuerda que los originó.

Para el caso discreto, haciendo  $t = n T$ , donde  $T \in \mathcal{R}$  es el período de muestreo,  $v = c T$  es la resolución espacial, con  $n$  y  $m \in \mathcal{X}$ , podemos escribir:

$$y[n, m] = y_d[n - m] + y_i[n + m]$$

Para el caso de una cuerda de una guitarra, debemos considerar que sus extremos son rígidos, es decir,  $y(t, 0) = y(t, L) = 0$ , cuya solución es:

$$y_d[n - m] = -y_i[n + m]$$

$$y_i\left[n + \frac{N}{2}\right] = -y_d\left[n - \frac{N}{2}\right]$$

Donde  $N = \frac{2L}{v}$  es el número de muestra del retardo, que definen las frecuencias de resonancia de la cuerda. Esta aproximación es la base del modelo digital de guía de ondas, que es uno de los métodos preferidos para sintetizar música digital [14].

Una primera aproximación para modelar el sonido generado por una cuerda tensada es la respuesta al impulso de un filtro peine IIR [3]. Un filtro peine IIR tiene la forma:

$$y[n] = x[n] + r^K y[n - K]$$

**Ejercicio 9:** Encontrar la función de transferencia del filtro. Graficar el diagrama de polos y ceros, y la respuesta en frecuencia para  $r = 0.9995$  y  $K = 119$ . Obtener 3 segundos de la respuesta al impulso, con una frecuencia de muestreo de 44100 Hz. Escuchar y graficar la evolución temporal. ¿Cuál es su frecuencia fundamental?

### ***Síntesis de sonidos generados por una cuerda vibrante***

Existen diversos métodos para sintetizar música: síntesis aditiva, síntesis substractiva, síntesis por modulación, síntesis por formantes, entre otras [15] [16]. El estudio de los modelos físicos de los instrumentos nos ha permitido crear modelos matemáticos que permiten simular, o sintetizar, sonidos generados por los instrumentos musicales. Nosotros no centraremos en la síntesis substractiva, la cual consiste en generar un sonido por el filtrado de un sonido base más complejo, como por ejemplo un ruido.

Unos de los primeros algoritmos para simular el punteo de la cuerda de una guitarra es el presentado por Karplus y Strong [1], que se basa en la técnica de guías de ondas digitales y se puede derivar de la modelización física de la vibración de una cuerda. El modelo acústico básico



es simulado mediante una línea de retardo digital de longitud variable alimentada por ruido, acoplado a un filtro pasa bajos, que induce resonancias similares a las de una cuerda en vibración. En la Figura 6 se esquematiza este algoritmo, donde las condiciones iniciales se fijan en forma aleatoria. Para generar una nota de frecuencia fundamental  $f$ , el retardo  $N$  se estima como  $N=\text{round}(fs/f)$ , donde  $fs$  es la frecuencia de muestreo.

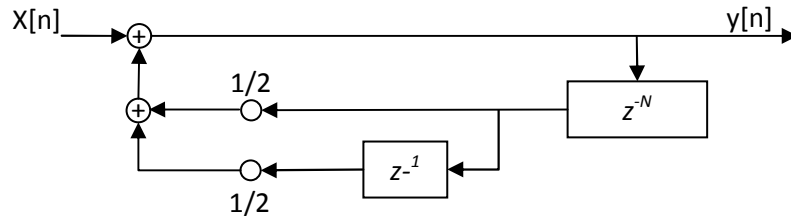


Figura 6: Esquema del algoritmo de Karplus-Strong. Adaptado de [2].

**Ejercicio 10:** Encontrar la función de transferencia del sistema de la Figura 6. Graficar el diagrama de polos y ceros. Obtener 3 segundo de la respuesta al impulso, para una frecuencia de muestreo de  $fs = 44100$  Hz, con una frecuencia fundamental de  $f_0 = 370$  Hz. Escuchar y graficar la evolución temporal y el espectro de frecuencias de la salida. ¿Por qué no se logra obtener la frecuencia fundamental deseada?

Si bien el modelo de Karplus-Strong es un modelo que genera un sonido muy aproximado al real, y además es muy sencillo de implementar y de bajo costo computacional, tiene sus falencias como ser: no logra afinar la nota exacta; y no modela los efectos de la posición donde se realiza el pulsado de la cuerda, entre otros. Para solucionar estos y otros aspectos del sistema, se han propuesto una amplia variedad de modelos. Por ejemplo, en la Figura 7 se puede observar el diagrama de bloques de un modelo más completo para simular el sonido generado al pulsar una cuerda de una guitarra [3].

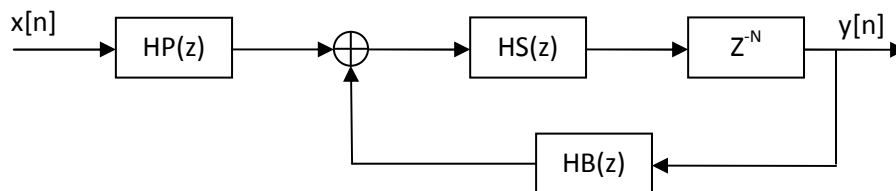


Figura 7: Esquema de un modelo del punteo de una cuerda de una guitarra. Adaptado de [3].

En la Figura 7, la entrada  $x[n]$  representa el estímulo al puntear la cuerda, y puede ser obtenida por filtrado inverso; el valor del retardo  $N$  se estima como  $N=\text{round}(fs/f)$ , donde  $f$  es la frecuencia fundamental de la nota que se desea emitir; y  $fs$  la frecuencia de muestreo. Se proporciona un ejemplo de entrada  $x[n]$  en el archivo *estimulo.wav*, la cual se grafica en la Figura 8.

El filtro  $HP(z)$  modela la posición del punteo, y se implementa como un filtro peine FIR, de orden  $M$ , dado por:

$$y[n] = x[n] - x[n - M]$$

Si definimos la posición relativa del punteo  $p \in (0,1)$ , el orden  $M$  del filtro se puede definir como  $M=\text{round}(p * fs / f)$ , donde  $f$  es la frecuencia fundamental de la nota que se desea emitir, y  $fs$  la frecuencia de muestreo.

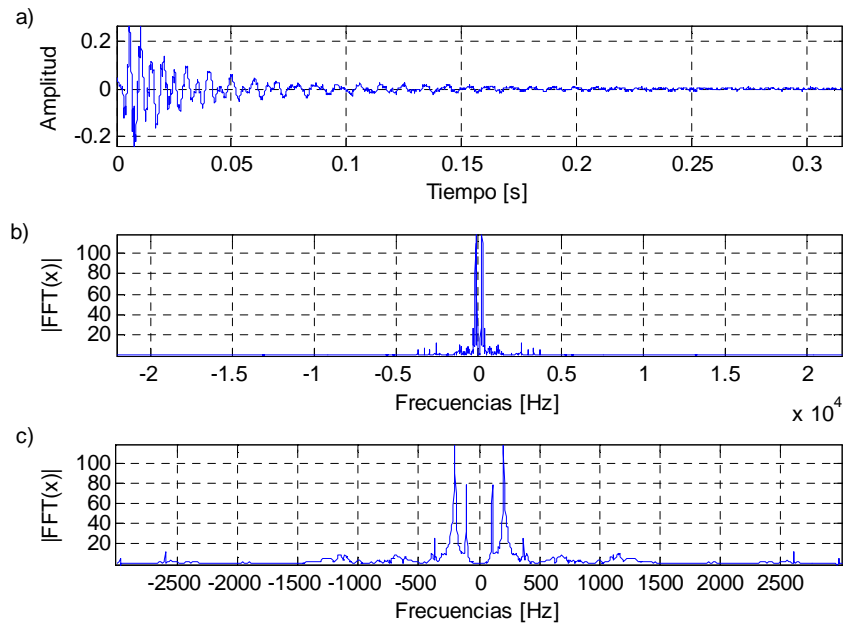


Figura 8: a) Evolución temporal del estímulo de entrada; b) su espectro de frecuencias en amplitud; y c) una ampliación a bajas frecuencias.

**Ejercicio Opcional 1:** Graficar la respuesta en frecuencia del filtro  $HP(z)$ ,  $f = 370$ ; y  $f_s = 44100$ , para  $p = 0.5, 0.7, 0.9$ .

El filtro  $HS(z)$  es el encargado de sintonizar la nota deseada, corrigiendo el retardo. El filtro  $HS(z)$  permite obtener retardos no enteros, y se puede implementar como un filtro FIR de retardo fraccionario de Lagrange [7], de tercer orden, cuyos coeficientes se definen según:

$$HS(z) = -\frac{(D-1)(D-2)(D-3)}{6} + \frac{D(D-2)(D-3)z^{-1}}{2} - \frac{D(D-1)(D-3)z^{-2}}{2} + \frac{D(D-1)(D-2)z^{-3}}{6} \quad (2)$$

Donde  $D$  representa la fracción de retardo que se quiere corregir. Con una correcta elección del valor de  $N$  y  $D$  se puede sintonizar el valor exacto de la frecuencia fundamental de la nota deseada. Para un retardo deseado, dado por  $T = f_s/f$ , si fijamos  $N = \text{fix}(T) - 1$ , y consideramos el retardo  $N_B$  del filtro de bucle HB, el valor de  $D$  estará dado por la diferencias entre el retardo deseado y la suma de los retardos  $N$  y  $N_B$ , es decir:  $D = T - N - N_B$ . Para la aproximación que planteamos, podemos considerar que  $N_B = 0.5$ .

**Ejercicio Opcional 2:** Encontrar los valores de los parámetros  $N$  y  $D$  para obtener una nota con una frecuencia fundamental  $f = 370$ ; con  $f_s = 44100$ . Graficar la respuesta en frecuencia del filtro  $HS(z)$  para dichos valores.

El filtro de bucle  $HB(z)$  modela el amortiguamiento de los armónicos presente en una guitarra, mejorando su timbre, el cual se implementa como:

$$HB(z) = \frac{0.8995 + 0.1087 z^{-1}}{1 + 0.0136 z^{-1}}$$

**Ejercicio Opcional 3:** Graficar la respuesta en frecuencia del filtro  $HB(z)$ , para una frecuencia de muestreo de  $f_s = 44100$ .

**Ejercicio Opcional 4:** Implementar el sistema de la Figura 7. Obtener 3 segundos de la respuesta al impulso, para una frecuencia de muestreo de  $f_s = 44100$  Hz, y una

frecuencia fundamental de  $f_0 = 370$  Hz. Escuchar y graficar la evolución temporal y el espectro de frecuencias de la salida.

## Efectos musicales digitales

Los efectos musicales son muy utilizados en la actualidad para obtener variantes del sonido del instrumento que se interpreta. Si bien originalmente eran básicamente analógicos y muchos de ellos solo se podían realizar sobre grabaciones de audios previamente registradas, en la actualidad su uso e implementación se ha tornado más flexible, presentado versiones digitales en hardware y/o software. A continuación presentaremos algunos de los efectos digitales más usuales.

### Modulación en amplitud

La modulación de amplitud es el uso de una señal de control para alterar, o modular, el volumen de otra señal. La señal utilizada para modular se la llama portadora. Si  $x(n)$  es la señal a modular,  $m(n)$  es la portadora, entonces la señal modulada en amplitud  $y(n)$  puede escribirse como:

$$y(n) = (1 + \alpha m(n)).x(n)$$

donde  $\alpha$  controla la intensidad de la modulación.

Cuando se utiliza una portadora que no es audible, con una frecuencia menor a 20 Hz, la señal resultante tiene efecto ondulante lento, conocido con el nombre de trémolo, en el que el volumen del sonido varía lentamente en forma ondulatoria. En el archivo *ejemplo\_tremolo.wav* podemos escuchar la introducción del tema *Porque hoy nací* de Manal en la que se utilizó el efecto trémolo.

Si la portadora tiene una frecuencia en el rango audible, los cambios en el volumen serán mucho más difíciles de percibir debido a su rapidez, y el efecto resultante es la creación de bandas laterales audibles de la señal portadora. Las bandas laterales son los armónicos que forman parte del sonido, pero no lo dominan, agregándole color.

**Ejercicio Opcional 5:** Obtener dos versiones moduladas en amplitud del sonido almacenado en el archivo *nota.wav*. Utilizar una portadora senoidal, de frecuencias  $f_c = 5$  Hz y  $f_c = 50$  Hz, y de amplitud  $\alpha = 0.5$ . Compare los resultados con la señal original, en el dominio del tiempo y de las frecuencias. Identificar y marcar las bandas laterales.

### Modulación en anillo

La modulación en anillo es una forma de modulación de amplitud que suprime la señal portadora y reproduce solamente las bandas laterales, y puede ser expresada como:

$$y(n) = m(n).x(n)$$

Si la señal de entrada tiene muchos armónicos, tales como una guitarra o la voz humana, la señal de salida resultante es compleja y rica, una especie de fantasma del sonido original [17]. Este efecto es muy utilizado cuando se quiere obtener una voz metálica o robótica.

**Ejercicio Opcional 6:** Modular en anillo el sonido almacenado en el archivo *nota.wav*. Utilizar una portadora senoidal, de frecuencias  $f_c = 440$ . Compare el resultado con la señal original, en el dominio del tiempo y de las frecuencias.

## Distorsión

En la década del 60, a raíz de la cantidad creciente de público que asistía a los conciertos de rock, comenzó a ser necesario mayor volumen para que las audiencias pudieran escuchar a la banda mientras tocaba. Esto llevó a utilizar los equipos a mayor volumen y luego a fabricar equipos de mayor potencia. Las válvulas, que son las encargadas de dar potencia en las etapas de preamplificación y potencia se comportan de manera extraña al ser sobrecargadas y generan una amplificación no lineal, generando un efecto de saturación. A diferencia de cualquier otro instrumento o sonido donde cualquier distorsión por pequeña que sea es indeseable, los guitarristas se enamoraron de este particular sonido y de la respuesta tonal que adquiere la guitarra al ser sometido a él. En el archivo ejemplo\_distorsion.wav podemos escuchar la introducción del tema *Sobrio a las piñas* de Divididos en la que se utilizó el efecto de distorsión.

El efecto de distorsión puede ser implementado generando una no linealidad a partir de la función arco tangente, como:

$$y(t) = \text{atan}(S \cdot x(t))$$

donde  $S$  controla la saturación de la señal.

**Ejercicio 11:** Implemente el efecto de distorsión. Pruebe con distintos valores de saturación y analice utilizando espectrogramas que sucede con el espectro de la señal de salida.

## Delay

Este efecto consiste en sumarle a la señal de entrada varios retardos con amplitudes decrecientes. Estos retardos deben ser múltiplos enteros de un retardo principal, el cual se encuentra entre 80 y 300ms. Los otros dos parámetros que gobiernan este efecto son el número de retardos y las amplitudes de los mismos. Con retardos muy cortos (20 a 80ms) y muy poco retorno generaremos la sensación de que hubiera dos instrumentos tocando lo mismo. Con tiempos de retardo entre 80 y 300ms generaremos un efecto tipo reverberación. Ya con tiempos superiores el oído empieza a escuchar más nítidamente la repetición y percibir el efecto como un eco. En el archivo ejemplo\_delay.wav podemos escuchar una parte del solo de guitarra del tema *Another brick in the wall* de Pink Floyd en el que se utilizó el efecto delay.

El efecto de delay puede ser implementado como

$$y(t) = \sum_{k=0}^K A_k \cdot x(t - kT)$$

donde  $T$  es el retardo principal,  $K$  es el número de retardos y  $A_k$  son las amplitudes de los mismos.

**Ejercicio 12:** Implemente mediante un filtro de tiempo discreto el efecto delay. Pruebe con distintos juegos de parámetros, por ejemplo,  $T=250$  ms,  $K=3$ ,  $A_0 = 1$ ,  $A_1 = 0.32$ ,  $A_2 = 0.24$  y  $A_3 = 0.2$ .

## Flanger

El efecto de flanging está inspirado en un fenómeno acústico natural que se produce cuando se mezclan un sonido directo y una versión retardada del mismo, con la característica que el retardo varía lentamente en el tiempo. Su descubrimiento se lo atribuye al matemático y físico holandés Christiaan Huygens en 1693. En su implementación original, allá por los años 60, se utilizaban dos

grabadores a disco con control variable de la velocidad y una consola de mezcla, como se esquematiza en la Figura 9, y el usuario controlaba la velocidad de uno de los discos para generar una mezcla con retardos. En el archivo *ejemplo\_flanger.wav* podemos escuchar la introducción del tema *Day tripper* de The Beatles modificada con el efecto flanger.

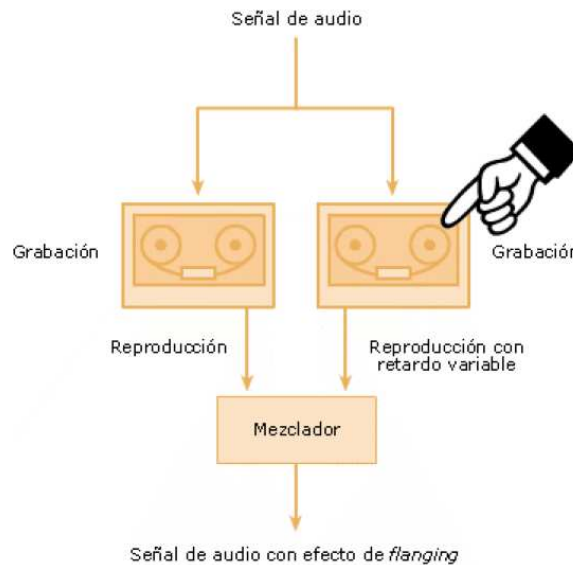


Figura 9: Esquema del método empleado para generar un efecto de flanger.

Este efecto se puede implementar digitalmente utilizando filtros peine FIR con retardos variables según una senoidal de frecuencia cercana a la unidad en el rango de 0 a 15 ms. Esto se puede escribir como:

$$y(n) = \alpha \cdot x(n) + (1 - \alpha) \cdot x\left(n - \text{round}\left(\frac{T_{\max}}{T_s} \cdot \cos(2\pi \cdot f_{\text{flanger}} \cdot n \cdot T_s)\right)\right)$$

donde  $T_{\max}$  es el retardo máximo,  $f_{\text{flanger}}$  es la frecuencia de variación del retardo, y  $0 < \alpha < 1$ .

**Ejercicio 13:** Aplicar al sonido almacenado en el archivo *nota.wav* un efecto de flanger, con una variación del retardo de 1 Hz, y retardo máximo de 3 ms. Compare el resultado con la señal original, en el dominio del tiempo y de las frecuencias.

**Ejercicio Opcional 7:** Aplique los efectos implementados en los puntos anteriores sobre los audios que se encuentran en el directorio *prueba*.

## Referencias

- [1] Acoustical Society of America's Physical Acoustics Technical Committee: Physical Acoustics Timeline, 550 BC - Present. <http://asa.aip.org/physical/patimeline.pdf>
- [2] Kevin Karplus and Alex Strong. Digital synthesis of plucked-string and drum timbres. *Computer Music Journal*, 7(2): pp. 43-55, 1983.
- [3] Matti Karjalainen, Vesa Valimäki, and Zoltán Jánosy. Towards High-Quality Sound Synthesis of the Guitar and String Instruments. In Proc. of International Computer Music Conference, September 10-15, 1993, Tokyo, Japan.
- [4] Julius O. Smith, Digital Waveguide Modeling of Musical Instruments, Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Stanford University, 2003.
- [5] D.A. Jaffe and J.O. Smith, Extensions of the Karplus-Strong plucked string algorithm. *Computer Music Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 56-69, 1983.
- [6] C. Roads, ed., *The Music Machine*, Cambridge, MA: MIT Press, 1989.
- [7] Julius O. Smith III. *Physical Audio Signal Processing*, W3K Publishing, 2010, ISBN 978-0-9745607-2-4.
- [8] Jaime Jaén, "Orientación musical". Universal Books, Panamá, 2002.
- [9] <http://www.physicsclassroom.com/class/sound/>
- [10] <http://www.ksanti.net/free-reed/description/taxonomy.html>
- [11] Toru Kobayashi, Naoto Wakatsuki, and Koichi Mizutani. Inharmonicity of Guitar String Vibration Influenced by Body Resonance and Fingering Position. Proc. of the International Symposium on Music Acoustics, Sydney and Katoomba. Australia, August 2010.
- [12] Angelo Farina, Andreas Langhoff, Lamberto Tronchin. Acoustic characterisation of "virtual" musical instruments: Using MLS technique on ancient violins. *Journal of New Music Research* Vol. 27(4), 1998.
- [13] Brahim Navarrete, Luis. Herbert Massmann y Rodrigo Ferrer. *Instrumentos musicales: Artesanía y ciencia*. Santiago: Dolmen Ediciones, 1993.
- [14] Julius O. Smith III. Physical Modeling using Digital Waveguides. *Computer Music Journal*, Part I, Vol 16(4), pp. 74-91. 1992.
- [15] Chris Chafe. *A Short History of Digital Sound Synthesis by Composers in the U.S.A.* Stanford University. 2009.
- [16] Eduardo R. Miranda. *Computer Sound Design: Synthesis techniques and programming*. Focal Press. Second Edition, 2002.
- [17] Thom Holmes. *Electronic and experimental music*. Routledge, Second Edition, 2002.