

# Diseño de instrumentos virtuales: el caso de la guitarra flamenca

## Virtual instrument design: the case of the flamenco guitar



**Jagoba Santos Bengoechea**

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

agobamusika@gmail.com

jagobamusika@gmail.com



**Carlos Duque Olmedo**

City University, London, United Kingdom

musicalia@musicalia.com

<https://katarinagurska.com/en/profesor/profesor-carlos-duque>

**Resumen:** El presente artículo trata sobre cómo crear instrumentos virtuales que emulan instrumentos acústicos. A través del estudio de las diferentes técnicas de síntesis y muestreo sugiero que esta última es la más adecuada para tal efecto, dada su fidelidad estática y potencial para el realismo en los sonidos que genera. A pesar de ello, esta técnica también alberga importantes limitaciones que no nos permiten alcanzar el nivel de perfección deseado. De entre los numerosos instrumentos acústicos existentes, me centro en la guitarra flamenca, dado que hasta la fecha no existe ningún instrumento virtual dedicado a la misma. Con objeto de facilitar la comprensión del instrumento, ofrezco un amplio estudio de su naturaleza y timbre, así como el desglose del proceso de grabación de un instrumento virtual que emule este instrumento.

**Palabras clave:** Instrumentos virtuales; síntesis de sonido; muestreo; acústica; guitarra flamenca.

**Abstract:** This article is about how to create virtual instruments that emulate acoustic instruments. Through the study of the different synthesis and sampling techniques, I suggest that the latter is the most suitable for this purpose, given its static fidelity and potential for realism in the sounds it generates. Nonetheless, this technique also has important limitations that do not allow us to reach the desired level of perfection. Among the numerous existing acoustic instruments, I focus on the flamenco guitar, since to date there is no virtual instrument dedicated to it. In order to facilitate the understanding of the instrument, I offer an extensive study of its nature and timbre, as well as a breakdown of the steps to follow in the process of recording a virtual instrument that emulates this instrument.

**Keywords:** Virtual instruments; sound synthesis; sampling; acoustics; flamenco guitar.

Submetido em: 21 de outubro de 2022

Aceito em: 6 de dezembro de 2022

## 1. Introducción

Desde la aparición del género flamenco a finales del siglo XVIII y gracias a la conformación de la guitarra moderna por parte del guitarrero Antonio de Torres (ROMANILLOS, 2020, p. 126), guitarristas flamencos como Ramón Montoya, Manolo Sanlúcar, Niño Ricardo, Rafael Riqueni o Paco de Lucía han conseguido elevar este arte a la categoría de universal a través de dotes excepcionales, profesionalidad envidiable y una capacidad de ofrecer un nuevo lenguaje y definición del toque flamenco en sus diferentes etapas.

La guitarra flamenca como instrumento y el flamenco como género ha sido una temática sobre la cual se ha comenzado a investigar en la segunda mitad del siglo XX, periodo histórico que coincide con avances definitivos en la evolución de la tecnología musical que nos han llevado a nueva forma de abordar la forma en la que componemos y producimos música (CUADRADO, 2017, p. 2-4).

Entre estos avances destacan el surgimiento del protocolo MIDI (*Musical Instrument Digital Interface*) en 1983 y a la irrupción y perfeccionamiento de las denominadas DAW (*Digital Audio Workstation*) en los años noventa. Desde entonces y hasta la actualidad, los ordenadores han pasado a ser el entorno de grabación de audio más empleado por compositores y productores (THEBERGE, 2012, p. 77-90).

A medida que se ha desarrollado la tecnología de producción musical, la facilidad de uso y la disponibilidad de instrumentos virtuales y de software ha aumentado sustancialmente (SALMI, 2018, p. 39). Tanto es así, que a día de hoy un compositor puede crear una obra que contenga sonidos profesionales únicamente utilizando instrumentos virtuales. Entre las ventajas de los instrumentos virtuales se encuentran su bajo coste, mayor versatilidad y control que sus análogos acústicos (CUADRADO, 2017, p. 2-4). Además de esto, los instrumentos virtuales han otorgado al compositor nuevos timbres y posibilidades de expresión (TAVEV; BOZINOVSKI, 2013, p. 182-186).

La guitarra (tanto flamenca como clásica) no ha quedado fuera de estos avances, dado que han sido numerosas las compañías que han intentado muestrearla. El realismo conseguido en la emulación de la guitarra clásica es bastante relevante, pero no ocurre así con la guitarra flamenca. Esto se debe a la falta de conocimiento en torno al propio instrumento y a su evolución histórica dentro del género. Estudios relativos a este tema indican que la guitarra flamenca presenta una serie de particularidades en su organología, acústica y técnicas interpretativas que la hacen muy diferente a la guitarra clásica (PEDROSA PARRA, 2015, p. 5). El conocimiento de las mismas se hace indispensable y será objeto de estudio en este artículo.

Desde que en el año 1957 Max V. Mathews propiciara por primera vez el desarrollo de sonidos generados únicamente por un ordenador en los laboratorios IBM, la evolución tecnológica ha propiciado resultados muy convincentes en la generación de instrumentos virtuales. En este sentido, existen estudios que se basan en la confección de sintetizadores como solución óptima para tal proceso, debatiendo entre la idoneidad de emplear sintetizadores analógicos versus digitales, y dentro de esta categoría sintetizadores digitales por software o por hardware. Estos trabajos se centran en estudiar los diferentes métodos de síntesis que existen (aditiva, sustractiva, FM, tabla de ondas, modelado físico etc.) dejando fuera del análisis la técnica de *sampling* o muestreo.

Por el contrario, diversos estudios realizados en torno a la creación de un instrumento virtual de piano, siendo este un instrumento armónico como la guitarra, han demostrado que los modelos de síntesis que únicamente emplean algoritmos y ecuaciones matemáticas no consiguen sintetizar de manera tan fidedigna sonidos generados por el propio instrumento. El potencial de realismo que la técnica de *sampling* ofrece (HOSKEN, 2011, p. 103-125) hace que esta sea la técnica que a priori sea la más adecuada para tal efecto, por lo que no será obviada en el presente artículo.

No es casualidad que cuando los compositores de cine, televisión y videojuegos presentan maquetas o *mockups* a los directores utilizan muestras de orquestas que emulan el sonido real, las cuales están hechas con la técnica de *sampling*. Asimismo, es notorio que grandes compositores como Hans Zimmer emplean instrumentos virtuales de orquesta basados en *sampling* en combinación con la orquesta real para corregir o darle más cuerpo a alguna de las secciones de la banda sonora.

Los estudios previos sobre esta materia han abordado el tema objeto de estudio desde diferentes ángulos, algunos de ellos siendo de índole teórica (YUN; CHA, 2013, p. 173-178) y otros haciendo alusión a la propia experiencia práctica de haber fabricado instrumentos virtuales de estas características. La consideración del proceso de síntesis de sonido como algo artístico y creativo (RUSS, 2009, p. 150-160) implica que el factor humano es determinante, más allá de consideraciones técnicas. Por otra parte, la defensa del empleo de los modelos matemáticos, algoritmos y recursos computacionales para simular las propiedades físicas de la fuente de sonido como la manera óptima de emular el sonido de un instrumento real (VALIMAKI; TAKALA, 1996, p. 75-86) hace hincapié en la necesidad de centrar todos nuestros esfuerzos en dominar y debatir sobre los aspectos tecnológicos de dicho proceso. La realidad de los propios instrumentos virtuales de estas características nos revela que ambos aspectos son importantes y deben ser estudiados.

A pesar de los numerosos avances en torno a la técnica de modelado físico, explicada en profundidad por los autores Webb y Bilbao (2011), la técnica de *sampling* es la más adecuada para emular instrumentos acústicos y es de hecho la que más se emplea en la actualidad, a pesar de que requiere un alto coste operativo y económico, así como un alto consumo de memoria RAM.

Otra evidencia en torno a la idoneidad de la técnica de *sampling*, es que las grandes compañías del sector han hecho uso de ella para fabricar instrumentos virtuales que emulan una guitarra. Véase el caso por ejemplo de la librería Gypsy de East West o la reciente Picked Nylon de la afamada Native Instruments.

Sin embargo, los errores que cometen estas compañías es la de dotar de un sonido “clásico” a la guitarra flamenca y la de no incluir técnicas fundamentales tales como el golpe o el rajeo de manera que tengamos una imagen más fidedigna del instrumento. A su vez, presentan únicamente una guitarra con vocación de acompañamiento (en segundo plano). Una guitarra flamenca que nos permite interpretar únicamente palos como los tangos o las rumbas, quizás por ser más asequibles para el público general. No obstante, no incorporan la posibilidad de abordar los palos más “flamencos” como la soleá, seguiriya o la bulería. Esto genera un resultado algo superficial del género, que responde a un tratamiento más comercial de concebir el producto.

Por estos motivos, en la actualidad no existe un instrumento virtual que emule de forma satisfactoria el comportamiento de la guitarra flamenca. En el presente artículo discutiremos sobre la técnica de fabricación más adecuada para fabricar tal instrumento (síntesis VS *sampling*) prestando especial atención a la fuente sonora y a las diversas técnicas y herramientas de grabación que debemos emplear para captar su esencia en forma de instrumento virtual.

La metodología empleada en el presente artículo se sustenta en el estudio previo de los diferentes tratados y libros que versan sobre las distintas técnicas de síntesis de audio. Por otro lado, mi experiencia profesional con la guitarra me ha permitido valorar de forma más fidedigna los resultados, en mayor o menor medida realistas, que cada una de estas técnicas genera.

## 2. Partes constitutivas de la guitarra flamenca: Descripción y función acústica

La guitarra es un instrumento cordófono que irradia el sonido como resultado de un componente vibratorio y acústico. El comportamiento vibratorio describe la transferencia de energía que comienza en las cuerdas una vez pulsadas, pasa por el puente al fondo, aros y tapa de la guitarra y termina en la caja de resonancia (MOLINA, 2017, p. 48). El comportamiento acústico por

su parte describe el sonido irradiado por el movimiento de la caja de resonancia (PERRY, 2014, p. 78-102).

Las vibraciones del cuerpo de la guitarra mueven las partículas de aire a lo largo de toda su tesitura, que corresponde a tres octavas y media. Esta extensión interválica ocurre entre 82,5 y 990 Hz. Sin embargo, analizando funciones de distribución de energía de varias piezas musicales tocados con guitarras de características diferentes, se aprecia que la mayor cantidad de energía que radia está en frecuencias a partir de 400 Hz. Las frecuencias menores a 400 Hz aportan alrededor de 25% de la energía total radiada, mientras que entre 400 y 500 Hz hay un incremento abrupto de alrededor de 55% más de energía, y el 20% restante viene dada por frecuencias más altas. Cada elemento de la guitarra cumple una función acústica determinada en el sonido que esta genera (ROBERTS, 2015, p. 25).

El elemento que en mayor medida determina la calidad del sonido de la guitarra es la tapa armónica, por lo tanto, se considera la parte más importante del instrumento, dado que gracias a esta las vibraciones son transmitidas a la caja de resonancia a través del puente. Las ondas sonoras resultantes de estas vibraciones salen en última instancia por la boca de la guitarra. El comportamiento vibratorio de la estructura de la guitarra puede compararse con el proceso resultante de la pulsación de una cuerda del instrumento, cuyo sonido queda definido por la presencia de los parciales y los armónicos que cooperan en dar cuerpo al sonido fundamental, o primer armónico, de toda nota musical (ROMANILLOS, 2020, p. 126). Fletcher y Rossing (1991) afirman que el lóbulo superior de la tapa armónica y el puente proporcionan la respuesta de altas frecuencias y la cavidad de aire, el fondo y el lóbulo inferior de la tapa proporcionan la respuesta de frecuencias más bajas (PERRY, 2014, p. 78-102).

El grosor de la tapa armónica varía a lo largo de la misma con objeto de fortalecer aquellas partes que soportan una mayor tensión, como es el caso del área donde está ubicado el puente (FUENTES-CUESTA, 2021, p. 3-8). Con objeto de mejorar la calidad

del sonido irradiado por el instrumento, el guitarrero busca una alta rigidez y baja densidad de la tapa (ROBERTS, 2015, p. 25).

El puente es el elemento que sirve como punto de unión entre la caja de resonancia y el mástil. El material empleado para su fabricación es la madera, y sobre este están ancladas directamente las cuerdas. La tensión total que las seis cuerdas ejercen sobre el puente es el equivalente al peso de un cuerpo de 42 Kg, aunque dependiendo del tipo de tensión el peso puede oscilar entre 30 y 50 Kg. El puente cumple una función completamente acústica, dado que además de reforzar la tapa armónica, también afecta a las vibraciones de la misma. Según se reportó en la Revista Mexicana de Física (BOULLOSA, 1996, p. 303-304), la rigidez del puente afecta considerablemente a la respuesta vibratoria de la tapa (se vio por ejemplo que en las guitarras de mala calidad la rigidez del puente disminuye gran parte de la respuesta de la guitarra) (TORRES, 2009, p. 38). Los cambios en el comportamiento vibratorio de la tapa traen como consecuencia cambios en el patrón de radiación sonora de la guitarra (TORRES, 2015, p. 228-234). Kasha (1982) también publicó en diversos estudios que el puente además de servir como punto terminal de las cuerdas, también es el transmisor de la energía vibracional de la cuerda a la tapa, y es recomendable poner atención especial en la impedancia mecánica del puente y en su dependencia en frecuencia.

Las cuerdas son los elementos principales de las guitarras dado que en ellas comienza la propagación de sonido. Las cuerdas pulsadas generan energía, pero irradian solo una pequeña cantidad de sonido directamente dado que no mueven un gran volumen de aire al vibrar. Estas transmiten energía vibratoria a la tapa armónica y al puente, que, a su vez, comparten esta energía con el fondo, los aros y la caja de resonancia. La influencia mutua que mantienen las cuerdas y la caja de resonancia es tal, que la vibración de la caja de resonancia afectará las vibraciones musicales de la cuerda y viceversa (ROBERTS, 2015). Las seis cuerdas de la guitarra se afinan como sigue; E2, A2, D3, G3, B3 y E4, que corresponden a las siguientes frecuencias: 82 Hz, 110 Hz, 147b Hz, 196 Hz, 247 Hz

y 330 Hz. El nylon y el carbono son los dos materiales principales empleados en la fabricación de las cuerdas para guitarra flamenca. En el argot flamenco a las tres cuerdas más agudas se les llama *primas* y a las tres graves se les llama *bordones*.

En cuanto a la caja de resonancia, ésta está conformada por dos tapas iguales que se cierran por ambos extremos. Tiene la función de amplificar las ondas sonoras producidas como consecuencia de las vibraciones que genera la excitación de las cuerdas en la tapa armónica, dejándolas salir por la boca. Es por tanto una cámara de sonido que influye de manera definitiva en su volumen. El detalle o la forma de este aparente “filtro” de la caja de resonancia es complejo y se rige por los modos vibratorios del mismo. Estos modos se hacen mucho más complejos a medida que interactúan con la tapa armónica, la cavidad de aire y el fondo y los aros de la guitarra (ROBERTS, 2015, p. 25). Por otra parte, el fondo aporta equilibrio y rigidez al instrumento, y su función acústica se basa en amplificar las ondas y contener el volumen de aire.

Entre los elementos no estructurales de la guitarra se encuentran los aros, la cabeza, el clavijero, el diapasón, el mástil y el golpeador. Los aros son dos tiras de la misma madera que el fondo, que tienen la función de cerrar la caja de resonancia. La cabeza se refiere a la parte superior de la guitarra, donde el clavijero cumple la función de tensar las cuerdas.

El diapasón alberga los trastes que separan una nota de otra, por intervalos de medio tono, mientras que el mástil sirve como nexo de unión entre la cabeza de la guitarra y su caja de resonancia (MOLINA, 2017). El golpeador se adhiere sobre la tapa armónica, y aunque no tiene efecto alguno en el sonido, previene posibles daños ocasionados por los golpes de carácter rítmico que realizan los guitarristas flamencos.

### 3. El timbre de la guitarra flamenca

El tono tradicional o “timbre flamenco” se caracteriza por ser un sonido balanceado, rajado, brillante, percusivo, con un

ataque rápido en la vibración de la tapa armónica, decaimiento y sostenimiento cortos, y con un amplio rango dinámico. Los guitarristas flamencos pulsan las cuerdas muy cerca del puente y con las uñas; estos dos hechos generan la aparición de armónicos superiores en detrimento de los inferiores. Tocar progresivamente cerca del puente, cambia el tono al poner más energía en los armónicos. El efecto es un sonido mucho más agudo y fino, ya que la fundamental se debilita y los armónicos se fortalecen (LEWIS; SMITH, 2014, p. 3-9). A su vez, el sonido de la guitarra flamenca se caracteriza por un alto volumen en las frecuencias medias y casi ningún bajo profundo, pero sí con un sonido nítido.

Otro aspecto que caracteriza al sonido flamenco es el “chasqueo” o “cerdeo” que se genera fruto de que las cuerdas suelen estar muy pegadas al puente para ganar comodidad en la mano derecha. Y es que casi todas las técnicas de la guitarra flamenca, ya sea el rasgueo, picado, arpeggio o trémolo, se tocan situando la mano derecha más cerca del puente que de la boca, lo cual produce un sonido más brillante y percusivo.

#### 4. Postura y técnicas interpretativas de la guitarra flamenca

Los guitarristas flamencos de finales del siglo XIX y principios del XX colocaban la guitarra sobre su pierna derecha, sosteniéndola con su mano izquierda y con ambos pies en el suelo. Los flamencos modernos (comenzando por Paco de Lucía) tienden a cruzar las piernas y a sostener la guitarra sobre la pierna derecha, para ganar agilidad y capacidad de movimiento de la mano izquierda por todo el diapasón. La guitarra flamenca se toca colocando la mano derecha entre la boca y el puente de la guitarra, con el fin de producir un sonido brillante y percusivo. Los nudillos de la mano derecha se posicionan paralelos a las cuerdas, con el pulgar a la izquierda de los dedos (generalmente apoyado en la sexta cuerda). La mano izquierda emplea el pulgar como punto de apoyo en la parte trasera del mástil. Las yemas de los dedos se posicionan

perpendiculares a las cuerdas, cerca de los trastes. El pulgar y la mano permanecen rectos, con un poco de espacio entre la palma y el mástil de la guitarra. Entre las técnicas y mecanismos de mano derecha empleadas en la guitarra flamenca destacan el picado, el ligado, el arpegio, el trémolo, la horquilla, el pulgar, la alzapúa, el golpe, el rasgueado y el pulgar-índice.

La técnica de picado, también conocida como *punteado* se ejecuta con los dedos índice y medio de forma alternativa, y su función principal es la de crear melodías en el registro medio y agudo del instrumento. Aunque también presente en la guitarra clásica, el picado flamenco ostenta unos matices y expresividad propias debido a la fuerza y rapidez con la que se ejecuta.

La técnica de arpegio consiste en tocar con la mano derecha las notas de un acorde en sucesión (una tras otra), existiendo numerosas posibilidades de combinación. Por otro lado, a diferencia del trémolo empleado en la guitarra clásica, que ejecuta cuatro notas con la digitación p/a/m/i, el trémolo flamenco es una sucesión rápida de cinco notas (cinquillo) con la digitación p/i/a/m/i. El ligado se refiere a la técnica martillar uno de los dedos de la mano izquierda hacia abajo o tirarlo de una cuerda, lo que hace que suene una segunda nota después de que se puntee inicialmente. La técnica del pulgar se usa para tocar notas en secuencia a modo de escalas. La ejecución de esta técnica se realiza, al igual que el picado, con una combinación de uña y yema. Una vez pulsada la nota, el pulgar se apoya en la siguiente cuerda. En combinación con el pulgar, la técnica pulgar-índice se refiere a tocar secuencialmente los *bordones* con el dedo pulgar y con dedo el índice las *primas*.

La técnica de la alzapúa es una técnica característica que define a la guitarra flamenca, y raramente se encuentra en ningún otro género musical que emplee la guitarra como instrumento armónico principal. Esta técnica emplea movimientos ascendentes y descendentes con el pulgar (que actúa como púa), generalmente en tresillos o semicorcheas. En el primer golpe, el pulgar toca la nota del bajo (normalmente colocada en la cuarta, quinta o sexta

cuerda de la guitarra), usando un golpe hacia abajo y descansando sobre la siguiente cuerda (apoyando). El segundo golpe es un movimiento hacia abajo en el que el pulgar toca dos o tres cuerdas. Por lo general, este segundo golpe se realiza con un golpe en la tapa armónica con el dedo medio. En el tercer golpe, el pulgar sube, tocando las mismas cuerdas que en el segundo golpe. El golpe es uno de los elementos percusivos más característicos de la guitarra flamenca, y consiste en, como su nombre indica, golpear la tapa armónica con el dedo medio y/o anular de la mano derecha, empleando indistintamente la yema o uña (o una combinación de ambos) de los mismos. En el flamenco el golpe se ejecuta entre acorde y acorde, nota y nota o simultáneamente a la realización de los mismos. La técnica del rajeo (o rasgueado) consiste en mover los dedos a través de las cuerdas, hacia arriba o hacia abajo, ya sea individualmente o en rápida sucesión. De los diferentes tipos de rajeo existentes destaca el rajeo de abanico, un tipo de rajeo con un patrón rítmico atresillado. Las tres digitaciones más empleadas en esta técnica son las siguientes: p/m/p, p/a/i y p/e/i.

## 5. Síntesis de sonido

Para la construcción o creación de instrumentos virtuales se utilizan básicamente dos técnicas diferentes: técnicas de síntesis de sonido y técnica de muestreo (*sampling* en inglés). Llamamos síntesis de sonido (*sound synthesis*) al proceso de producir y generar sonoridades empleando sonidos sintéticos. A través de esta técnica podemos procesar y manipular sonidos preexistentes o generar nuevos sonidos tanto electrónica como mecánicamente.

El autor estadounidense Martin Russ describe este proceso como una combinación de arte y ciencia. Un proceso a través del cual podemos generar sonidos simples y complejos, así como una inmensa variedad de timbres llenos de emotividad en los cuales la imaginación se presenta como el único límite (RUSS, 2009).

Existen diversas técnicas de síntesis. Las más empleados hoy en día son aquellas que emplean el modelo "*source and modifier*",

por el cual una fuente sonora (como por ejemplo un oscilador) genera un sonido básico sin procesar que a posteriori puede ser modificado para crear un sonido o timbre final diferente a este. Esta técnica se sustenta en el principio fundamental de que los instrumentos convencionales o acústicos pueden ser divididos en tres partes principales: la fuente sonora, un modificador (que procesa la salida de la fuente sonora) y algunos controladores (RUSS, 2009, p. 150-160). Este modelo resulta válido al analizar, por ejemplo, instrumentos de viento en los cuales la lengüeta actúa como fuente sonora, el cuerpo del instrumento actúa como modificador (el cual se comporta como una serie de filtros resonantes) y los controladores corresponderían a cada una de las notas que pulsa el intérprete. Sin embargo, en un instrumento como la guitarra flamenca resulta más difícil de aplicar, dado que la fuente sonora (la cuerda pulsada) y el modificador (el cuerpo de la guitarra) no se pueden dividir en partes independientes. La cuerda no puede tocarse aisladamente de la misma manera que la lengüeta de un instrumento de viento, y todas las resonancias del cuerpo de la guitarra no pueden ser determinadas sin que la vibración de las cuerdas esté presente en todo momento. A pesar de esto, este modelo es susceptible de producir una amplia gama de timbres sintéticos e imitativos.

Las técnicas de síntesis se clasifican en dos grupos: técnicas de síntesis analógica (dentro de las cuales se encuentran la síntesis aditiva, síntesis sustractiva y síntesis por tabla de ondas, y las técnicas de síntesis digital (dentro de las cuales se encuentran la síntesis, FM o modelado físico entre otras).

## 5.1. Técnicas de síntesis analógica

La síntesis aditiva se sustenta en la idea de que todo sonido periódico, por complejo que sea, es el resultante de la suma de ondas sinusoidales sencillas de frecuencias múltiplo de una frecuencia base. Con el fin de construir un espectro complejo que conste de muchos parciales o armónicos, cada uno con su propia

frecuencia y amplitud, un sintetizador aditivo utiliza una onda sinusoidal para cada uno de los parciales y luego suma todas ellas. El espectro resultante tendrá todos los parciales deseados con las frecuencias y amplitudes correctas (HOSKEN, 2011, p. 103-125).

Los principales inconvenientes de esta técnica son la gran cantidad de datos y osciladores necesarios para producir un sonido con un amplio contenido armónico. En teoría, la síntesis aditiva puede recrear perfectamente cualquier sonido periódico para el cual tengamos todos los datos necesarios sobre cada uno de sus parciales. En la práctica eso es una enorme cantidad de datos. No sólo variará la amplitud, frecuencia y envolvente sonora de cada parcial durante el transcurso de una nota, sino que cada parcial puede comenzar con una fase diferente con respecto a los otros parciales. Para recrear perfectamente un sonido, el sintetizador tendría que tener todos esos datos para cada parcial de una nota en cada uno de sus puntos durante un periodo de tiempo determinado. Si, por otra parte, tuviéramos como objetivo generar sonidos que varíen en el tiempo, deberemos de evaluar y controlar el desarrollo de cada amplitud. A esto habría que añadirle el carácter excesivamente monótono de los sonidos periódicos, un hecho que no tiene parangón en los instrumentos acústicos. Además del problema de necesitar enormes cantidades de datos, la síntesis aditiva también es computacionalmente intensiva. Puede requerir docenas de osciladores que produzcan ondas sinusoidales para crear el espectro generado por un oscilador de tabla de ondas. Sin embargo, el lado positivo de esta técnica reside en que puede generar nuevos timbres que cambien de manera interesante a lo largo del tiempo (HOSKEN, 2011, p. 103-125).

A diferencia de la síntesis aditiva, la síntesis sustractiva produce sonidos sustrayéndole frecuencias a un sonido con un espectro rico en armónicos. Este proceso se consigue con el empleo de filtros. La síntesis sustractiva se basa en el modelo *source and modifier* explicado anteriormente, en el cual la fuente sonora produce un sonido rico en armónicos, mientras que el modificador se usa para filtrar cualquier armónico no deseado y para dar forma a la

envolvente de volumen del sonido final. De esta forma, el filtro así resta o sustrae los armónicos no requeridos o deseados; de ahí el nombre de la síntesis.

Además del oscilador, los filtros y las envolventes, este modelo emplea un amplificador y los denominados LFO (*Low Frequency Oscillator*) para procesar y modificar el sonido. El LFO suele ser un elemento que se puede enrutar a uno o más elementos del modelo (el filtro, el oscilador o el amplificador) para manipularlos cíclicamente.

Las fuentes sonoras utilizadas en los sintetizadores sustractivos analógicos tienden a estar basadas en principios matemáticos. Hay dos tipos básicos de fuentes sonoras: formas de onda y aleatorias. Las formas de onda generalmente reciben el nombre de la onda simple que genera. Estas son las más fáciles de describir matemáticamente y de producir electrónicamente. Por otro lado, las formas de onda aleatorias producen ruido, que contiene una mezcla en constante cambio de todas las frecuencias. También se debe tener en cuenta que, en general, las fuentes producen salidas continuas y, por ende, monótonas. Se necesita usar un modificador para alterar el timbre o aplicar una envolvente al sonido primario (RUSS, 2009, p. 150-160). Este método de síntesis genera un sonido muy "vintage" y sintético, con lo cual no es apto para emular instrumentos acústicos.

Desarrollado en los años setenta por Wolfgang Palm para su compañía PPG, la síntesis por tabla de ondas (*wavetable synthesis*) amplía la idea de la síntesis analógica al proporcionar mayor cantidad y sofisticación de formas de onda sin procesar como punto de partida para su posterior filtrado y modelado. Una tabla de ondas es por tanto una colección de formas de onda o esencialmente muestras de audio, que se reproducen en un bucle (loop) para producir una forma de onda periódica o un sonido o tono continuo. En lugar de usar osciladores que generan formas de onda simples, usan circuitos electrónicos que reproducen determinadas muestras de sonido digitalizadas, a diferentes frecuencias dependiendo de las notas que toquemos.

Las tablas de ondas pueden almacenar un único ciclo de una forma de onda, o una colección de los mismos, en lo que se denomina *lookup table* (al que podemos acceder desde el panel de control). Esto nos permitirá acceder, seleccionar o realizar fades entre las distintas formas de onda de forma dinámica en tiempo real. Estos cambios generalmente se logran cambiando manualmente la posición de la tabla de ondas en el sintetizador, a través de controladores MIDI o usando un LFO para automatizar un poco más el proceso. Debido a que la fuente de sonido sin procesar se almacena y reproduce en lugar de generarse desde cero, la síntesis de tabla de ondas suele consumir mucha menos memoria y CPU, al tiempo que logra el mismo efecto que las técnicas de síntesis más complejas.

El estatismo y carácter artificial de los sonidos producidos es uno de los aspectos negativos de esta tecnología. Esto se debe a que, mientras un sonido generado por un instrumento acústico tiene un timbre y capacidades expresivas enormes (dependiendo de la técnica e intensidad con la que toquemos), una muestra digitalizada no es más que una grabación que siempre suena de la misma forma de principio a fin.

Por otro lado, en relación a las demás técnicas de síntesis analógicas, observamos que una forma de onda digitalizada es mucho más difícil de manipular que la señal de un oscilador simple, ya que se necesitan capacidades de cálculo mucho mayores. Por esa razón, algunos modelos tempranos de síntesis de tabla de ondas tenían estructuras de síntesis muy simples que no eran capaces de alterar el sonido de forma o cantidad significativa, a diferencia de los sintetizadores analógicos o digitales basados en síntesis sustractiva.

Posteriormente, gracias al aumento de velocidad y capacidad de los microprocesadores y componentes digitales en general, se agregaron todos los elementos habituales de la síntesis sustractiva, por lo que hoy en día los sintetizadores de tabla de ondas pueden verse como la evolución natural de los sintetizadores de síntesis sustractiva que le preceden, en los que la diferencia más relevante

es la capacidad de utilizar varios cientos o incluso miles de formas de onda complejas en lugar de un pequeño conjunto de formas de onda básicas.

## 5.2. Técnicas de síntesis digital

Durante sus años de trabajo en la universidad de Standford, el compositor John Chowning introdujo en el año 1973 la síntesis de sonido por modulación de frecuencia (FM), la cual abrió nuevas posibilidades sonoras a un bajo coste. Esta emplea una técnica similar a la tecnología de radio y transmisión de ondas, y se lleva a cabo por la alteración de la frecuencia instantánea de una función (seno, coseno u otra función periódica más compleja), según el comportamiento instantáneo de otra función periódica de frecuencia y amplitud dadas.

FM esencialmente significa tomar el *output* o frecuencia generada por un oscilador y emplearla para controlar (modular) la frecuencia de otro oscilador. Es decir, la frecuencia de una onda sinusoidal portadora es controlada o modulada por una onda sinusoidal moduladora. (OLAND; DANNENBERG, 2017) En su versión más primitiva, este método de síntesis requiere únicamente dos osciladores: la señal portadora y la señal modulante. FM tiene sus raíces en matemáticas y se preocupa por producir formas de onda con complicados espectros de formas de onda mucho más simples mediante un proceso que puede compararse con la multiplicación. Las formas de onda más simples son las ondas sinusoidales, y FM es fácil de entender si se utilizan ondas sinusoidales para las explicaciones iniciales. De hecho, a diferencia de los sintetizadores analógicos, donde las formas de onda son a menudo el foco principal de los controles del usuario, la FM está mucho más preocupada por los armónicos, los parciales y el espectro de la sonar.

Los sonidos producidos por FM pueden ser bastante brillantes y van desde armónicos hasta muy inarmónicos. El hecho de que esta técnica haya quedado es desuso en los últimos años se debe

a que, a pesar de producir sonidos ricos en armónicos, resulta un tanto complejo programarlo para obtener sonidos imitativos.

El modelado físico por su parte describe la forma de comportarse de los instrumentos acústicos convencionales a través de modelos matemáticos. Un modelo matemático de un instrumento musical normalmente toma la forma de un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen los diversos componentes del instrumento, como una cuerda vibrante, una columna de aire o un resonador. Los componentes se describen mediante ecuaciones en el sentido de que siempre se observa que su movimiento obedece a las ecuaciones diferenciales. Como resultado, dadas las condiciones iniciales (posiciones y velocidades iniciales), las condiciones de contorno (restricciones que describen las conexiones con otros componentes) y conociendo todas las fuerzas externas a lo largo del tiempo (“condiciones de contorno variables en el tiempo”), es posible simular matemáticamente el movimiento del sistema real con gran precisión.

Todas estas ecuaciones y fórmulas (realizadas con una computadora) consideran variables como los materiales empleados para su construcción, temperatura, humedad y todo lo referente a sus propiedades físicas. El resultado sonoro y su semejanza con el instrumento acústico que se está modelando depende exclusivamente del nivel de detalle del modelo empleado (BAKOIANNIS; POLYCHRONOPOULOS; MARINI; KOUROUPETROGLOU, 2021, p. 3).

Una de las diferencias más notables entre el enfoque de modelado físico y otras técnicas de síntesis es que este último intenta imitar (modelar) las propiedades y comportamiento de la fuente sonora, mientras que las otras se centran en las propiedades de la señal de sonido emitidas por la misma. Esto genera un potencial para obtener resultados más naturales y realistas, aunque también podemos construir sonidos sintéticos y mixtos a través de esta técnica. Las principales pegas de este método de síntesis son su alto coste de diseño y alto coste computacional. Es por ello, que hasta mediados de los años noventa no se desarrolló esta técnica en equipos profesionales.

Algo importante a resaltar en esta técnica, es que, sumado a la capacidad de modelar el comportamiento acústico del instrumento, también nos permite modelar las diferentes técnicas de ejecución. En el caso de la guitarra, por ejemplo, nos ofrece la posibilidad de modelar las técnicas de mano izquierda y derecha. En este sentido, la guitarra clásica ha sido un área en el que el modelado físico ha conseguido importantes avances. El comportamiento de la cuerda pulsada se comprende relativamente bien, aunque solo se ha avanzado moderadamente en el modelado del comportamiento del resonador (McKAY, 2003, p. 3-7). Esto se debe a que es muy difícil modelar completamente el comportamiento oscilatorio de una guitarra en todo su rango sonoro, ya que la interacción entre los picos resonantes de las cuerdas y del cuerpo de la guitarra son difíciles de modelar, particularmente en frecuencias más altas. Por otro lado, además del trabajo rudimentario realizado por Jaffe y Smith en 1983, se ha avanzado muy poco en el modelado de las técnicas de mano izquierda como los ligados y los *slides*. Por todo ello, a pesar del gran trabajo que se ha hecho sobre el terreno, aún falta mucho para que lleguemos a un punto en el que un instrumento como la guitarra (y sus técnicas) pueda ser sintetizado de forma realista a través de esta técnica (McKAY, 2003, p. 3-7).

### 5.3. Técnicas de sampling o “muestreo”

El sampling es el método que ha conseguido un mayor éxito en términos de realismo en la emulación y sustitución de instrumentos acústicos. Este método ha propiciado a su vez la evolución y el desarrollo tecnológico del sampler como parte interna del ordenador (CUADRADO, 2017)

El término “muestreo” o sampling en inglés nos describe el proceso de tomar muestras a intervalos de tiempo regulares. Estas muestras se refieren a sonidos independientes (notas y acordes generalmente) pregrabados en diferentes contextos, empleando todas las técnicas y articulaciones del mismo con objeto de plasmar una “fotografía” que refleje las capacidades sonoras, acústicas y tímbricas del instrumento.

Al grabar una muestra de un instrumento acústico, la forma de onda muestreada cambia a lo largo del ataque, sostenimiento, decaimiento y relajación del evento, lo cual produce un sonido rico y variable en el tiempo. Es por ello que la emulación por la técnica de muestreo suele ser mucho más convincente que la síntesis de sonido, pero requiere de un gran número de muestras, de un alto presupuesto y del almacenamiento de una gran cantidad de datos y por ende de memoria RAM.

El primer paso para desarrollar un instrumento virtual que emule un instrumento acústico empleando la técnica de sampling es el proceso de preparación y planificación. En esta etapa estudiaremos a fondo el instrumento a muestrear, los medios que emplearemos en la grabación y decidiremos qué es lo que vamos a grabar y cómo. El siguiente paso se refiere a la grabación de cada una de las muestras, que generalmente se lleva a cabo en un estudio profesional. De todas las etapas que conlleva el desarrollo de un instrumento virtual de estas características, el proceso de grabación es el que más tiempo y recursos consume, por lo que las etapas de planificación y preparación previa son de vital importancia para ser eficaces y cumplir con los objetivos establecidos en un periodo de tiempo razonable. La grabación consiste en que el intérprete grabe las diferentes notas, técnicas y articulaciones del instrumento abarcando toda su tesitura o rango sonoro. Estas notas se suelen grabar empleando una duración y dinámica determinada. En el caso de una guitarra flamenca, imaginemos que hemos grabado la nota A3 *forte* empleando la técnica de picado a lo largo de aproximadamente tres segundos. Dado que la guitarra está afinada por intervalos consecutivos de cuarta (a excepción de la tercera mayor que separa a la tercera cuerda de la segunda), podemos encontrar y ejecutar una nota concreta en diferentes cuerdas y trastes del instrumento. Al cambiar de cuerda y de traste, el timbre de la nota varía significativamente, por lo que será recomendable grabar todas ellas para tener una mejor representación de las posibilidades acústicas y sonoras del instrumento.

Asimismo, le pediremos al intérprete que grabe esta nota con dos articulaciones diferentes: picado solo con uña y picado con yema y un poco de uña. Esto nos permitirá captar un sonido más percusivo y directo (con uña), y otro más cálido y redondo (con uña y yema). El siguiente paso sería el de grabar cada articulación con diferentes dinámicas (volúmenes) para dotar de mayor expresividad a nuestra guitarra flamenca. Para ello se emplean las denominadas capas de velocidad o *velocity layers*. El cambio de velocidad o *velocity switching* utiliza el valor de velocidad asignado a la nota midi para elegir entre las múltiples muestras grabadas para cada nota. Dado que el brillo del timbre de la nota cambia a medida que se presiona a un mayor volumen, el cambio de velocidad nos permite lograr un acercamiento entre ambos conceptos (HOSKEN, 2011). A mayor número de *layers* o capas, mayor precisión en la reproducción del instrumento en relación al tacto o fuerza con la que pulsamos la tecla del controlador. Considerando el alto nivel de expresividad de la guitarra flamenca, deberemos plantearnos grabar al menos tres *velocity layers* para cada sonido, si queremos conseguir una interpretación que se acerque a la realidad. Esto implicará mayor trabajo, coste económico, empleo de memoria RAM y tiempo de grabación.

En la vida real, cuando un guitarrista flamenco interpreta notas sucesivas, cada nota repetida suena ligeramente diferente. Existen multitud de variantes que confluyen en ese fenómeno, desde variaciones en el ataque, sustain, decay y release, hasta variaciones en el timbre. Con objeto de humanizar el instrumento se emplea la técnica denominada Round Robins, que consiste en grabar diversas muestras para cada nota, articulación, técnica y *velocity layers* determinado. Esto evitará el conocido como "*machine gun effect*" y dotará al instrumento de mayor autenticidad en su ejecución. En un instrumento tan expresivo como la guitarra flamenca, recomendamos grabar (en referencia a la técnica de picado) un mínimo de cinco round robins. A mayor número de round robins, mayor trabajo de grabación, empleo de memoria RAM, edición, mezcla y programación. Esto nos da la

siguiente cantidad de muestras para plasmar con cierto realismo la nota de A3:

$$1 \text{ (nota)} \times 4 \text{ (posiciones)} \times 2 \text{ (articulaciones)} \times 3 \text{ (velocity layers)} \times 5 \text{ (round robins)} = 120 \text{ muestras}$$

Que multiplicado por el número total de notas que hay en la guitarra:  $120 \times 44 = 5280$  muestras

Este mismo proceso debería de ser aplicado a las técnicas explicadas en cuarto apartado, con las particularidades que cada una de ellas presenta. Los pasos que seguirían una vez terminada la grabación serían la edición, mezcla y programación de todas y cada una de las muestras (DALY, 2021, p. 50).

Una vez que hemos grabado el audio, debemos configurar el software o hardware de muestreo para reproducir esa muestra cuando recibe una nota MIDI entrante. Dado que la nota muestreada es A3, asignaremos la muestra a la tecla MIDI número 69, que corresponde a A3. Este número constituye la nota fundamental de la muestra: número que activará la muestra para ser reproducida sin ninguna modificación de tono o frecuencia. Este es un ejemplo del proceso conocido como *keymapping*, que no es otra cosa que la asignación de una muestra a un número o rangos de números de notas del teclado MIDI.

Al cambio de tono (ascendente o descendente) de una muestra o nota musical se le denomina *pitch shifting*. Sin embargo, cuanto empleamos esta técnica existe una pérdida de calidad considerable en el sonido, por lo que en lugar de ajustar una nota a todo el rango de un instrumento (en nuestro caso la guitarra), optaremos por grabar todas las notas o muestras por separado. A esta técnica se le denomina *multisampling*, y como su nombre indica se trata grabar notas representativas de un instrumento en todo su rango sonoro y asignar cada muestra a un *key zone* o *key range* del teclado MIDI.

Llevando el *multisampling* al extremo, cada una de las notas o semitonos del instrumento se grabarán de forma independiente. A esta técnica se le denomina *chromatic sampling*.

Debido al gran número de muestras necesarias, la técnica de *multisampling* consume mucha memoria RAM. Asimismo, puede ser difícil lograr que un intérprete toque cada una de las notas diferente con el mismo ataque, sonoridad y brillo, lo que puede llevar a inconsistencias en los timbres de las diferentes notas.

Hasta ahora, a través de la técnica de *multisampling* y *keymapping* hemos conseguido crear un instrumento que puede reproducir cualquier nota a lo largo de la tesitura del mismo, y con un buen timbre. Sin embargo, aspectos como el volumen, dinámicas, articulaciones o técnicas de ejecución no están siendo tenidos en cuenta, por lo que la representación del instrumento no se asemeja a realidad del mismo. Para ello, deberemos emplear técnicas como los *velocity layers*, *round robins* o *keyswitching*. Con todo ello, seremos capaces de construir un instrumento con un nivel de detalle que supera a las técnicas de síntesis, y nos habla del principal punto fuerte de esta técnica: su gran realismo.

## Conclusiones

El timbre de la guitarra flamenca se caracteriza por ser un sonido fuerte, rajado y brillante, con un ataque rápido en la vibración de la tapa armónica y una fuerte presencia en el rango medio de frecuencias. Este sonido se produce fruto de que los guitarristas flamencos, a diferencia de los guitarristas clásicos, posicionan la mano derecha más cerca del puente que de la boca de la guitarra. Las técnicas propias del género como la alzapúa, el golpe o el rasgueo dotan al instrumento de un carácter rítmico y percusivo fundamental, lo cual está condicionado por su labor histórica de acompañamiento al cante y al baile. Su capacidad expresiva hace que genere un rango dinámico muy amplio, con la interacción de pasajes que van desde el *piano* al *forte* en

un muy corto espacio de tiempo. Es un instrumento de mucha personalidad, cuyo sonido se irradia como resultado de un componente vibratorio y acústico.

La tapa armónica es el elemento más importante de la guitarra en lo que a la propagación del sonido se refiere, el cual comienza en las cuerdas, que actúan como osciladores. Las cuerdas pulsadas generan energía vibratoria que se transmite a la tapa armónica y al puente, que, a su vez, comparten esta energía con el fondo, los aros y la caja de resonancia, la cual en última instancia sale por la boca. En este proceso se produce una interacción entre muchas de las partes de la guitarra, lo cual hace que el modelado de este instrumento sea especialmente complejo.

A día de hoy y considerando las posibilidades que la tecnología nos ofrece, pienso que las técnicas de síntesis no generan un sonido lo suficientemente realista como para sustituir a una guitarra flamenca en su versión acústica. Esto se debe a que estas técnicas emplean una descripción matemática del sonido basada en algoritmos y modelos matemáticos que no han conseguido plasmar el comportamiento e imagen real del instrumento en su totalidad. La guitarra flamenca presenta numerosas variables en cada nota, entre las cuales destacan la cantidad de uña y yema que empleemos en el ataque de la cuerda, cambios en la envolvente sonora, distintas dinámicas y articulaciones, posición y comportamiento de la mano derecha en función de la técnica de ejecutemos, y el hecho de que una misma nota se encuentre en tres o cuatro puntos diferentes del diapasón. Esto ocasiona que si queremos modelar el instrumento a través de alguna de las técnicas de síntesis analizadas necesitaríamos una cantidad ingente de algoritmos que acabarían por agotar la memoria y capacidad de procesamiento del ordenador. Asimismo, el problema de los modelos de síntesis radica en el control del proceso de síntesis, sobre todo en lo que se refiere a parámetros que intervienen en el discurso musical, dado que la mayoría de algoritmos se derivan heurísticamente y no guardan relación alguna con el proceso real de generación del sonido. Es por ello que las técnicas de síntesis generan resultados menos satisfactorios para la interpretación musical que aquellos generados

con técnicas de sampling. Esta es el motivo principal por el cual es más difícil sintetizar sonidos emitidos por instrumentos acústicos como los de la guitarra, que producir sonidos abstractos. Por otra parte, las técnicas de síntesis nos permiten generar nuevos timbres desde cero o manipular y moldear, con la imaginación como único límite, sonidos preexistentes. La flexibilidad y versatilidad de estas son, por tanto, una de las ventajas de las técnicas de síntesis con respecto a la técnica de sampling. Esto explica que las técnicas de síntesis se utilicen en mayor medida en géneros musicales como la música electrónica, Hip Hop o EDM entre otros.

Por otro lado, las principales ventajas de la técnica de sampling sobre las técnicas de síntesis son su realismo y “fidelidad estática”. Esto significa que la calidad del sonido que genera está únicamente limitada por la calidad del sonido grabado. Dado que cualquier sonido producido por un instrumento puede ser grabado, no existen limitaciones en este sentido. La naturaleza misma de este tipo de síntesis alberga al mismo tiempo sus principales inconvenientes, que la tecnología existente a día de hoy no es capaz de solventar de la manera deseable. El principal inconveniente radica en que el resultado sonoro es poco natural y difícilmente puede ser asociado al sonido producido por un instrumento acústico cuando éste es ejecutado por un ser humano y no un ordenador. Debemos tener en cuenta que cuando un guitarrista ejecuta una frase, la pulsación de cada nota es única y está sujeta al contexto musical. Asimismo, el hecho de que cada muestra contenga únicamente de cinco a diez segundos implica que, tras el ataque, la forma de onda tenga que ser reconstruida mediante repetición de la sección estacionaria del tono. Por consiguiente, la amplitud y la evolución del timbre deberán ser simuladas mediante un generador de envolvente y un filtro variante con el tiempo.

Dado que mediante esta técnica se sintetizan las notas separadamente, los fenómenos físicos como la transferencia de energía entre cuerdas y la interacción de armónicos entre las

mismas no son tenidos en cuenta. Asimismo, dada su naturaleza estática, es incapaz de recrear la interacción tan profunda que existe entre el instrumentista y el instrumento, más allá de la simple recreación de un sonido invariable. Otras de las desventajas de esta técnica incluyen el alto consumo de memoria RAM y el altísimo coste o inversión económica necesaria para conseguir un control total sobre el instrumento. En nuestro proceso de grabación de una guitarra hemos comprobado que solo para plasmar la técnica del picado necesitamos 5280 muestras. Si quisiéramos plasmar toda la guitarra deberíamos de rondar alrededor de 25.000 – 30.000 muestras. Esto supondría una gran cantidad de trabajo, tiempo y energía por parte del intérprete para conseguir dotar al instrumento virtual de las propiedades expresivas del instrumento real en toda su tesitura o rango sonoro. Estos son, a mi entender los motivos por los cuales hasta el día de hoy ninguna compañía del sector ha encarado el proceso de grabar un instrumento de estas características.

A pesar de los inconvenientes que plantea la técnica de sampling y considerando el punto en el que se encuentra la síntesis a día de hoy, considero que esta es la técnica más adecuada para generar un instrumento virtual de guitarra flamenca, dado que genera resultados más realistas y con mayor fidelidad que aquellos generados a partir de la síntesis del sonido. Una posible solución para subsanar la necesidad de un gran número de muestras necesarias sería la de desarrollar dos instrumentos virtuales independientes pero complementarios; el primero de ellos que plasme la guitarra flamenca en segundo plano, que albergue técnicas relacionadas con el acompañamiento como rasgueos, golpes y arpegios; y otra guitarra en primer plano en la que sean protagonistas las técnicas de índole más melódica como el picado, el tremolo y el pulgar. De esta manera disminuiríamos la cantidad de muestras necesarias y en procesamiento. Así, ahorraríamos en tiempo de grabación y recursos necesarios para cada librería. Esta fórmula ha sido seguida recientemente por la compañía Native Instruments en su serie *Session Guitarist* con librerías de guitarra

acústica como *Strumming Acoustic* (para acompañamiento) y *Picked Acoustic* (carácter más melódico y de guitarra solista).

Sin embargo, el mero hecho de emplear esta técnica no nos garantiza el éxito, ya que sin un profundo conocimiento del sonido, interpretación, técnicas, comportamiento y contexto musical del propio género flamenco no llegaremos a plasmar la realidad de este instrumento. A su vez, en el proceso de grabación y programación de la librería estaremos supeditados a las limitaciones tecnológicas del momento, por lo que deberemos de hacer uso de los medios, formatos y técnicas más avanzadas que nos permitan subsanar dichos errores en la medida en la que nos sea posible.

## Referencias

BAKOGIANNIS, Konatantinos, POLYCHRONOPOULOS, Spyros, MARINI, Dimitra, KOUROUPETROGLOU, Georgios. Audio Enhancement of Physical Models of Musical Instruments Using Optimal Correction Factors: The Recorded Case. **MDPI**, 2021. p. 3

BOULLOSA RUIZ, Ricardo. Algunas notas sobre la acústica de la guitarra clásica. Universidad Nacional Autónoma de Méxic. **Revista Mexicana de Física nº 43** (No2), 1996. p. 303-304.

BUSTINS MOLINA, Denis. 2017. Estudio Cuantitativo de la Calidad Sonora de una Guitarra Española. UPC. Trabajo de Final de Grado, **Universidad Politécnica de Catalunya**. 2017. p. 48.

CUADRADO MÉNDEZ, Francisco José. 2017. Nuevas Tendencias en la Creación Musical propiciadas por las Nuevas Tecnologías. **Fundación Telefónica**. TELOS, 2017. p. 2-4.

DALY, Camden. Recording Sounds and Instruments for Sample Libraries. **California State University**. 2021. p. 50.

FUENTES CUESTA, Jose María. Introducción al Varetaje de la Guitarra Moderna em la Segunda Mitad del Siglo XX. Conservatorio Cristóbal Halffter. **Guitarrasfuentes.com**, 2021. p. 3-8.

HOSKEN, Dan. An Introduction to Music Technology. Routledge. **California State University**, Northridge. 2011. p. 103-125.

H. ROBERTS, Wiliam. Physics and Psychoacoustics of Plucked-String Instruments. Thesis, **University of Cardiff**. 2015. p. 25

J. LEWIS, Wanda y R. SMITH, James. The Effect of String Tension Variation on the Tonal Response of a Classical Guitar. University of Warwick. In Exchanges: **The Warwick Research Journal**, 2014. Vol. p. 2, 3-9.

McKAY, Cory. A Survey of Physical Modelling Techniques for Synthesizing the Classical Guitar. **McGill University**. 2003. p. 3-7

OLAND, Anders y DANNENBERG B., Roger. FM Synthesis. **Carnegie Mellon University**. 2017. p. 37.

PEDROSA PARRA, Ginés. La Influencia de la Guitarra Flamenca en la Clásica. Sinfonía Virtual, **Revista de Música y Reflexión Musical** (Edición 28), 2015. p. 5.

PERRY, Ian. Sound Radiation Measurements on Guitars and other Stringed Musical Instruments. Thesis, **University of Cardiff**. 2014. p. 78-102.

ROMANILLOS, José Luis. Antonio de Torres Guitarrero, su vida y obra. Almería. **Instituto de Estudios Almerienses**, 2020. p. 126.

RUSS, Martin. Sound Synthesis and Sampling (Third Edition). **Focal Press**, 2009. p. 150-160.

SALMI, Julio. Using Sample-Based Virtual Instruments to Produce Orchestral Strings in Film Music. Thesis, 4. **Tampere University of Applied Sciences**. 2018. p. 39.

TAVEV, George & BOZINOVSKI, Adrijan. Virtual Studio Technology and its Application in Digital Music Production. **University American College Skopje. The 10th Conference for Informatics and Information Technology** (CIIT 2013), 2013. p. 182-186.

THÉBERGE, P. 2012. The end of the world as we know it: The changing role of the studio in the age of the Internet. London: S. Frith y S. Zagorski-Thomas (Eds), "The Art of Record Production: An Introductory Reader for a New Academic Field", **Ashgate**, 2012. p. 77-90.

TORRES, Jesús Alejandro. Changes in wave propagation in a guitar top plate due to the fan bracing and the bridge. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, 2015. p. 228-234.

TORRES, Norberto. 2009. De lo Popular a lo Flamenco: Aspectos Musicológicos y Culturales de la Guitarra Flamenca (siglos XVI-XIX). Universidad de Almería: **Dialnet. Journal of the American Musicological Society**, 2009. p. 38.

VALIMAKI, Vesa and TAKALA, Tapio. Virtual Musical Instruments; Natural Sound Using Physical Models, Organized Sound, **Helsinki University of Technology, Department of Computer Science**, 1996. p. 75-86.

YUN, Yoemun y CHA, Si-Ho. Designing Virtual Instruments for Computer Music. Chungwoon University. **International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering** (Vol.8, No5), 2013. p. 173-178.

## Agradecimientos

Me gustaría agradecer a New York University por haberme facilitado el acceso al conocimiento que este artículo científico requiere. Sus recursos humanos y tecnológicos me han servido de gran ayuda. Asimismo, agradecer a mi director de tesis Carlos Duque

y mi supervisor en NYU Tae Hong Park por su apoyo incondicional. Por último, me gustaría apuntar que la investigación en la que está basada esta publicación fue posible gracias al apoyo de una beca concedida por el Programa Fulbright España-EE. UU.

## Publisher

Universidade Federal de Goiás. Escola de Música e Artes Cênicas. Programa de Pós-graduação em Música. Publicação no Portal de Periódicos UFG.

As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.