

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**



**GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS Y
SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN SOBRE FPGA DE UN
PEDAL MULTI-EFECTOS DIGITAL SOBRE
PROTOCOLO I2S2**

**EROS GARCÍA ARROYO
ENERO 2020**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Título: Diseño e implementación sobre FPGA de un pedal multi-efectos digital sobre protocolo I2S2

Título (inglés): Design and implementation on FPGA of a digital multi-effects pedal on I2S2 protocol

Autor: Eros García Arroyo

Tutor: Samuel López Asunción

Ponente: Pablo Ituero Herrero

Departamento: Departamento de Ingeniería Electrónica

MIEMBROS DEL TRIBUNAL CALIFICADOR

Presidente: —

Vocal: —

Secretario: —

Suplente: —

FECHA DE LECTURA:

CALIFICACIÓN:

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN**

Departamento de Ingeniería Electrónica
LSI



TRABAJO FIN DE GRADO

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN SOBRE FPGA
DE UN PEDAL MULTI-EFECTOS DIGITAL
SOBRE PROTOCOLO I2S2**

Eros García Arroyo

Enero 2020

Resumen

Este trabajo persigue y tiene como principal finalidad obtener un pedal multiefectos, plenamente funcional a tiempo real, para guitarras eléctricas o sistemas de captación de audio, como micrófonos, aunque el objetivo principal será la guitarra eléctrica. De esta forma lo que se pretende es que, a través de una señal de entrada, consigamos hacer variarla de manera digital y obtener a su salida otra señal modificada por el efecto seleccionado dentro de la arquitectura del pedal.

Para definir los múltiples efectos del pedal debemos tener en cuenta que vamos a tratar con 3 tipos de resultados:

- Efectos basados en retardadores.
- Efectos basados en sistemas no lineales.
- Efectos basados en sistemas lineales.

El producto de los efectos retardadores tendrán como finalidad añadir una línea de retardo o de espera sobre la señal de entrada que luego se solapará junto con la señal de salida. Los efectos no lineales se encargarán de afectar a la ganancia de la señal de entrada para obtener una modificación no lineal de ésta a la salida y, finalmente, los efectos lineales tienen una función similar a los descritos anteriormente pero, como su categoría indica, será de forma lineal.

El proyecto partirá desde la elección de la FPGA, protocolo y algoritmo de trabajo, hasta la obtención de un pedal multiefectos perfectamente implementado y funcional como prototipo y siendo este el resultado final del proyecto.

Además, debido a las características de este proyecto y al lenguaje de programación empleado (VHDL) y el entorno de desarrollo utilizado (Vivado), podrá modificarse en versiones futuras de manera muy sencilla y contener los efectos que el usuario necesite dependiendo de la aplicación profesional que se le quiera dar.

Por tanto, el prototipo desarrollado en este trabajo fin de grado me ha servido para afianzar mis conocimientos sobre electrónica digital y tratamiento/procesado de señales de audio.

Palabras clave: Pedal multiefectos, FPGA, VHDL, I2S2, Nexys A7, Tiempo real, Línea de retardo, Umbral de ganancia.

Abstract

This work pursues and has as its main purpose to obtain a multi-effects pedal, fully functional in real time, for electric guitars or audio capture systems, such as microphones, although the main object will be the electric guitar. In this way the aim is that, through an input signal, we can make it vary digitally and get at its output another signal modified by the selected effect within the pedal architecture.

To define the multiple effects of the pedal we must take into account that we will deal with 3 types of results:

- Retardant-based effects.
- Effects based on non-linear systems.
- Linear system-based effects.

The product of the retarding effects will aim to add a delay or wait line over the input signal which will then overlap along with the output signal. Nonlinear effects will be responsible for affecting the gain of the input signal to obtain a nonlinear modification of is to the output and eventually, linear effects have a function similar to the one described above but, as its category indicates, it will be linearly.

The project will start from the choice of FPGA, protocol and working algorithm, to obtaining a perfectly implemented and functional multi-effects pedal as a prototype and this being the final result of the project.

In addition, due to the features of this project and the programming language used (VHDL) and the development environment used (Vivado), it can be modified in future versions in a very simple way and contain the effects that the user needs depending on the professional application you want to give it.

Therefore, the prototype developed in this end-of-degree work has served me, to strengthen my knowledge of digital electronics and the treatment/processing of audio signals.

Keywords: Multi-effects pedal, FPGA, VHDL, I2S2, Nexys A7, Real-time, Delay line, Gain threshold.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todos aquellos que me han apoyado y ayudado desinteresadamente durante todo este tiempo sin esperar nada a cambio: mis padres y mi hermana por haberme ayudado en los momentos difíciles cuando empecé este camino universitario, a mis abuelos paternos por haberme acogido en su casa y a mi abuela materna por haberme cuidado desde que era pequeño. También quiero hacer una mención especial a mi tutor Samuel López por haberme ayudado todas y cada una de las semanas desde que decidimos llevar a cabo el proyecto y a Pablo Ituero por haberme ofrecido la oportunidad de llevarlo a cabo.

Índice general

Resumen	I
Abstract	III
Agradecimientos	V
Contents	VII
1. Introducción, estado del arte y motivación	1
1.1. Introducción y estado del arte	1
1.2. Objetivos del proyecto	3
1.3. Estructura del documento	3
1.4. Metodología	4
1.5. Resultados esperados	5
2. Interfaz de sonido externa y FPGA	7
2.1. Sistema de entrada/salida del audio	7
2.1.1. Etapa de pre-amplificación a la entrada	7
2.1.2. Etapa de amplificación a la salida	9
2.2. FPGA	10
2.3. Captación del sonido en la guitarra eléctrica	11
3. Análisis teórico de los efectos digitales	13
3.1. Teoría sobre los efectos digitales estudiados e implementados	13
3.1.1. Efectos basados en retardadores	13
3.1.1.1. Efecto retardado	14
3.1.2. Efectos basados en sistemas no lineales	14
3.1.3. Efectos basados en sistemas lineales	14
3.2. Efectos digitales estudiados pero no implementados	14
4. Architecture	15
4.1. Introduction	15

5. Case study	17
5.1. Introduction	17
5.2. Rule edition	17
6. Conclusions and future work	19
6.1. Conclusions	19
6.2. Achieved goals	19
6.3. Future work	19
A. Impact of this project	I
A.1. Social impact	I
B. Economic budget	III
B.1. Physical resources	III
Bibliography	v

Introducción, estado del arte y motivación

1.1. Introducción y estado del arte

Hoy en día se vive en un mundo donde se ha desarrollado la electrónica digital en el ámbito tecnológico, pero, a su vez y en otro ámbito paralelo, la música también ha experimentado un gran avance. Gracias a ello, la creación de un pedal de efectos es una iniciativa factible ya que se puede lograr de manera eficaz.

Un pedal de efectos es un dispositivo que se encarga de tomar una señal de entrada de audio. Una vez el dispositivo recibe esta señal de audio, deberá aplicar ciertas modificaciones sobre la misma. Normalmente estos cambios suelen ir destinados a variar el timbre, el tono, el volumen o la intensidad (e incluso, todos al mismo tiempo). Fijándose detenidamente, hablando en términos musicales, los efectos del pedal afectan a los cuatro elementos sonoros fundamentales de la música. Por ello se establece una relación directa entre el mundo musical y el mundo del tratamiento digital de audio. Finalmente, el resultado que se deberá obtener será una señal de audio, transformada oportunamente por el efecto seleccionado.

Ahora bien, debido a las características de este tipo de pedales, su uso más común es sobre instrumentos de tipo electrófono. Es decir, aquellos instrumentos que se hacen valer de un sistema electrónico para producir el sonido. Por esta razón, la idea será destinar este pedal al uso de la guitarra eléctrica debido a que es un instrumento muy empleado en la actualidad y que ofrece una gran variedad de posibilidades para sus usuarios más experimentados. De esta manera se pueden lograr distintos sonidos que son capaces de dar gran matiz a las distintas obras musicales que se decida interpretar, ya sea en directo empleando el pedal como un sistema en tiempo real, ya sea en grandes post-producciones para generar arreglos sobre pistas de audio que han sido previamente grabadas por una guitarra eléctrica sin ningún tipo de efecto.

Por tanto, el objetivo perseguido en el proyecto es la creación del pedal multiefectos partiendo de cero, pero siempre atendiendo a que todos los pasos realizados han sido previamente acordados con el profesor - tutor. El trabajo propuesto no estaba ofertado por el Departamento de Ingeniería Electrónica, aunque el tutor asignado, don Pablo Ituero accedió a esta propuesta de trabajo de fin de grado tomando en consideración mis motivaciones personales, mis conocimientos musicales y mi manejo de la guitarra eléctrica.

Para la realización del prototipo emplearemos una arquitectura de FPGA Artix-7 orientada a estudiantes y que se monta sobre la plataforma Nexys A7 [1]. Esta plataforma con la FPGA se puede encontrar en *Xilinx* con la referencia *XC7A100T-1CSG324C* (la sección previa al guión hace referencia al tipo de arquitectura que se monta sobre la plataforma y la sección posterior al guión hace referencia a la plataforma que sustenta todo el Hardware necesario para poder emplear dicha arquitectura).

La elección de esta FPGA y esta plataforma está motivada en que son las que nos puede proporcionar el Departamento de Ingeniería Electrónica para eliminar costes al alumnado ya que este tipo de dispositivos suele tener un coste elevado. Además, ofrece un entorno *Hardware* muy accesible basado en 16 *Switches*, varios diodos *LEDs*, 5 botones o pulsadores, un total de ocho *displays* de 7 segmentos y lo más importante, la incorporación de los *Pmod Headers* que serán esenciales para la interconexión de estos dos elementos: La arquitectura FPGA y la guitarra eléctrica.

Por otra parte, se necesitará una etapa que se encargue de digitalizar nuestra guitarra eléctrica para conseguir llevar la señal de salida desde el instrumento musical electrófono (guitarra eléctrica) hasta la entrada de la FPGA. Para ello se usará el *Pmod i2s2* [2] de *Digilent* el cual también será proporcionado por el Departamento de Ingeniería Electrónica. Este *Pmod* incorpora *ADC*, *DAC* y los conectores mini-jack estándar de audio, que serán de ayuda para gestionar la señal de entrada y salida de nuestra guitarra. Lo único que se deberá añadir serán unos adaptadores de mini-jack a jack-estándar debido a que la guitarra eléctrica usa entradas de jack-estándar.

Finalmente, para capturar el sonido de la guitarra eléctrica, se empleará una etapa de pre-amplificación basada en un amplificador de guitarra eléctrica de baja potencia (hasta unos 15W) y, una vez procesado el efecto del pedal en baja potencia, se colocará a la salida otro amplificador de guitarra eléctrica pero de alta potencia (puede ser un amplificador de guitarra eléctrica basado en transistores de 150W, por ejemplo).

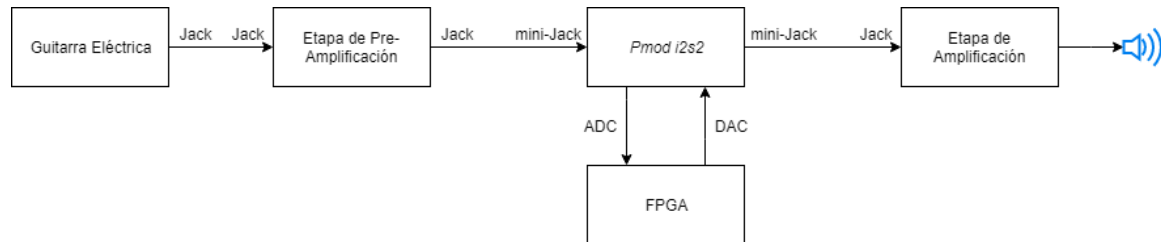


Figura 1.1: Arquitectura general del proyecto.

1.2. Objetivos del proyecto

Los objetivos que este Trabajo Fin de Grado pretende lograr son los siguientes:

- Diseñar la creación de un pedal multiefectos en su totalidad partiendo desde cero y con la finalidad de transformar diferentes sonidos.
- Comprobar y asegurar el correcto funcionamiento de cada uno de los módulos *Hardware* desarrollados a lo largo del proyecto en formato *.vhd*.
- Construir y probar el prototipo completo atendiendo a la arquitectura presentada en la figura 1.1 del punto anterior.
- Consolidar los conocimientos impartidos en los estudios de Grado de Ingeniería en Tecnologías y Servicios de la Telecomunicación en los siguientes temas: tratamiento y procesado de la señal de audio, programación de lenguaje *Hardware* en tiempo real e integración de distintos sub-módulos que engloban entre todos un prototipo funcional.

1.3. Estructura del documento

En este apartado vamos a hacer un recorrido por el desarrollo que se ha seguido para llevar a cabo el prototipo (el pedal de efectos). Para ello comenzaremos hablando del estado del arte y las motivaciones personales en este Capítulo 1.

A continuación, en el Capítulo 2, trataremos la captación de sonido de la guitarra eléctrica y cómo llevar este sonido hasta la FPGA y, una vez allí, cómo reproducirlo con una buena calidad de audio.

Seguidamente, analizaremos los efectos que vamos a implementar dentro del pedal multi-efectos. Por ello, en el Capítulo 3 se llevará a cabo un estudio teórico donde explicaremos la base teórica de todos los efectos desarrollados dentro del proyecto y a qué categoría corresponden (efectos basados en retardadores, efectos basados en sistemas no lineales y efectos basados en sistemas lineales) para luego en el Capítulo 4 explicar cómo hemos implementado estos efectos dentro del lenguaje VHDL junto con el protocolo *i2s2*, necesario para hacer funcionar correctamente el *Pmod i2s2* junto con su *ADC* y *DAC*.

Finalmente, en el capítulo 5 se describirán todas las pruebas llevadas a cabo para comprobar la veracidad, el funcionamiento y la implementación de cada uno de los efectos realizados atendiendo a sus criterios de diseño junto con una breve conclusión final.

1.4. Metodología

La metodología que vamos a llevar a cabo en este trabajo será la siguiente:

- En primer lugar seleccionar la categoría a la que corresponde el efecto que se quiere implementar (efecto basado en retardadores, efecto basado en un sistemas no lineales o efecto basado en un sistemas lineales). Una vez elegida la categoría del efecto que se quiere desarrollar, estudiar sobre el algoritmo que implemente la función del efecto que se desea realizar. Para esto último, será de gran ayuda la referencia [3] de la bibliografía.
- El segundo paso será buscar o desarrollar un diagrama de bloques que permita implementar tanto el efecto seleccionado como las especificaciones que el protocolo *i2s2* requiere para funcionar correctamente.
- En tercer lugar buscar dos amplificadores para la conexión de las etapas de pre-amplificación y amplificación para el montaje final.
- El cuarto paso consistirá en conseguir integrar todos los efectos con sus correspondientes algoritmos en el programa *Vivado* con el lenguaje VHDL. Todos estos efectos deberán ser capaces de convivir entre ellos dentro de la arquitectura desarrollada y se pondrá algún ejemplo de varios efectos funcionando simultáneamente.
- Finalmente, se hará uso de la herramienta de simulación de Vivado para comprobar el correcto funcionamiento de los efectos desarrollados, para ello se utilizará: un *test-bench* avanzado, la herramienta MATLAB y el propio debugging sobre la FPGA (es decir, escuchando con nuestros propios oídos el resultado obtenido).

Así bien, siguiendo todos estos pasos se debe ser capaz de montar el prototipo final entorno a la Nexys A7.

1.5. Resultados esperados

La duración del proyecto ha sido de aproximadamente 6 meses. La idea surgió a finales del mes de Junio de 2019 y se comenzó a llevar a cabo en septiembre de ese mismo año de manera práctica ya que, el mes de Julio fue destinado a estudiar y preparar el proyecto presentado.

Durante este tiempo y teniendo su finalización en Enero de 2020 se puede afirmar que se han alcanzado las diferentes metas acordadas al inicio del proyecto: **se dispone de un prototipo plenamente funcional y probado en salas de ensayo con mi propia guitarra eléctrica y pudiendo comprobar que este mismo cumple con el resultado acordado previamente en Junio de 2019.**



Figura 1.2: Montaje al completo, visto desde arriba.

De esta forma, se puede asegurar que debido al desarrollo llevado a cabo, a día de hoy se presenta el pedal con una serie de efectos finitos y previamente seleccionados, pero no habría ningún inconveniente en generar un banco de efectos y cada vez que se quiera usar el pedal, cargar los efectos que el usuario desee de una manera fácil. Todo esto se explicará más adelante cuando se trate de cómo se ha llevado a cabo la programación en el Capítulo 4 del presente documento. Cabe destacar que todo lo que se recogerá en el Capítulo 4 supone aproximadamente el 65 % del total de las horas que se han destinado a este trabajo mientras que el otro 35 % se ha destinado a la compresión de los algoritmos, redacción del documento y pruebas sobre los resultados obtenidos.

Así bien, la estimación de horas dedicadas al proyecto se estima que han sido unas 20 horas por cada una de las semanas. Si se tiene en cuenta que el proyecto se empezó a llevar a cabo de manera efectiva en septiembre de 2019 y que solamente ha habido una semana de descanso en todo este tiempo, se calcula que aproximadamente se han trabajado 18 semanas.

En total, un computo aproximado de 360 horas.

Interfaz de sonido externa y FPGA

Como se ha mencionado anteriormente, en este capítulo se tratará todo lo referido a la interconexión del *Hardware* externo que permitirá el correcto funcionamiento del pedal de efectos. Se detallará la elección de los amplificadores y se hablará un poco más a fondo de la plataforma Nexys A7.

2.1. Sistema de entrada/salida del audio

2.1.1. Etapa de pre-amplificación a la entrada

La función primordial que tendrá esta etapa de pre-amplificación será captar en su entrada la señal eléctrica producida por la guitarra eléctrica y en su salida aportar una señal adaptada y válida para ser procesada por el *Pmod i2s2*. Para ello se hará uso de los dos canales jack tipo hembra de los que dispone el amplificador; el canal de entrada conectado a la guitarra eléctrica, y el canal de *Phones* utilizado como medio de salida para conducir la señal acondicionada y adaptada a la entrada del *Pmod i2s2*.

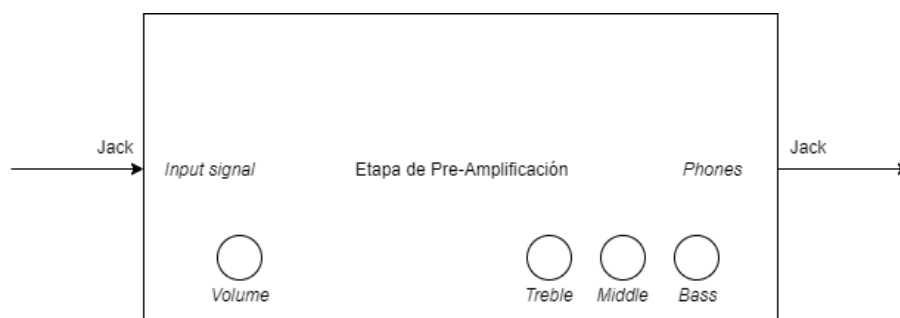


Figura 2.1: Características para la elección del amplificador de pre-amplificación

En una primera instancia se planteó realizar una pequeña etapa de *Hardware* externa donde se pudiera conectar la guitarra a través de un conector tipo jack-XLR, evitando tener que colocar este amplificador, pero rápidamente fue descartada por varios motivos:

- No cumple la característica primordial de este proyecto (tener todo integrado dentro de la FPGA).
- Las posibles implementaciones de este tipo de etapas requieren fuentes de alimentación complejas que rara vez se podrán encontrar en locales de ensayos o salas de conciertos, ya que su uso está más orientado a aplicaciones de laboratorio.
- En congruencia con la razón anterior, se plantea que es mejor emplear un amplificador previo de baja potencia que será más común en los lugares previamente mencionados.

Así bien, el amplificador elegido para esta aplicación será el *Yamaha GA15* que cuenta con una potencia total de 15W. En la referencia [4] se pueden ver las características de este de forma más detalladas.



Figura 2.2: Amplificador empleado en la etapa de pre-amplificación del prototipo.

Fijándose en la figura 2.2 se puede ver que cumple con las características mostradas en la figura 2.1:

- Dispone de la entrada de *Input* general.
- Cuenta con tres controles para modificar el nivel de potencia que tendrán los sonidos agudos, medios y graves que se enviarán a la FPGA y con el controlador de volumen para regular la ganancia de señal de audio que se quiera a la entrada de la FPGA.
- Tiene la salida auxiliar *Phones* la cual enviará la señal acondicionada a la FPGA.
- Es de baja potencia (15W).

Por lo tanto, para finalizar esta sección, se puede llegar a la conclusión siguiente: debido a las especificaciones con las que se desarrollará el prototipo y en los lugares donde se utilizará, es mejor ayudarse de un pequeño amplificador y emplear el conector auxiliar de *Phones* para enviar la señal de audio hasta la FPGA (a pesar de no utilizar el cono amplificador para reproducir el sonido), ya que lo que se hace es **emplear los componentes analógicos internos del amplificador como etapa acondicionadora** siendo esta capaz de alimentarse a través de la red eléctrica común sin necesidad de fuentes de alimentación complejas.

Además, este tipo de amplificadores no suelen ser muy molestos de transportar y para la aplicación necesaria (en este caso, proporcionar la señal adaptada y acondicionada a la FPGA) resultan ser bastante buenos, ya que no trabajan en potencias muy elevadas.

2.1.2. Etapa de amplificación a la salida

La principal función que tendrá esta etapa de amplificación será tomar la señal modificada por el pedal de efectos y reproducirla a un volumen adecuado y óptimo para el entorno en el que se encuentre el pedal multiefectos montado. Para ello se hará uso del canal jack de entrada tipo hembra del que disponga dicho amplificador y, en este mismo canal, se conectará la señal de salida proveniente de la FPGA. Así bien, a diferencia de la sección anterior, ahora sí que se hará uso del cono amplificador para desencapsular el audio contenido dentro de todo el sistema y hacerlo sonar hacia el exterior.

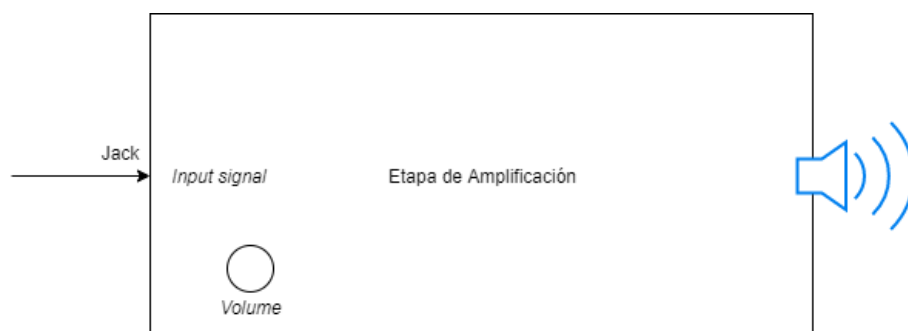


Figura 2.3: Características para la elección del amplificador en la etapa de amplificación.

Así bien, el amplificador elegido para esta aplicación será el *Combo Line 6 Spider III 75W x2*. El motivo de la elección de este se debe a que dispone de dos conos de amplificación y por lo tanto reproduce cada una de las señales que componen el estéreo del audio por cada uno de los conos. En la referencia [5] se pueden ver las características de forma más detallada.



Figura 2.4: Amplificador empleado en la etapa de amplificación del prototipo.

Fijándose en la figura 2.4 se puede ver que cumple con las características mostradas en la figura 2.3:

- Dispone de la entrada de *Input* general.
- Cuenta con el controlador de volumen para regular la magnitud de señal que queremos a la salida.
- Es de alta potencia (75W x2).

Por consiguiente, para finalizar esta sección, se puede llegar a la conclusión siguiente: es **necesario disponer de un amplificador que tenga dos conos de amplificación y sea estéreo**. Si esto último no fuera posible y se tuviera que montar una etapa con solo un cono puede que se lleguen a experimentar ciertos problemas con la calidad del audio debido a que el *Pmod i2s2* trabaja en estéreo.

2.2. FPGA

Tal y como ha sido comentado, la placa que se va a emplear para montar todo el diseño del pedal multiefectos será la plataforma *Nexys A7* de *Digilent*.

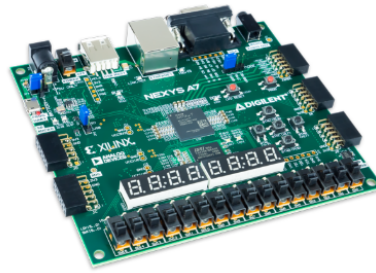


Figura 2.5: Placa Nexys A7 de *Digilent*.

La arquitectura FPGA que incorporará esta plataforma [2.5] es una FPGA *Artix-7*. Además, esta plataforma incorporará gran cantidad de recursos internos dentro de la FPGA.

Para estudiar el número de recursos del que se dispone, se pueden seguir dos métodos:

- Emplear la herramienta Vivado [6] (antes de iniciar el proyecto, Vivado permite seleccionar previamente con qué plataforma y arquitectura FPGA se desea trabajar y por lo tanto podemos ver dentro del programa la cantidad de recursos totales).

Search: (1 match)

Part	I/O Pin Count	Available IOBs	LUT Elements	FlipFlops	Block RAMs	Ultra RAMs	DSPs	Gb Transceivers	GTPE2 Transceivers	GTXE2 Transceivers	GTHE2 Transceivers	GTZE2 Transceivers	GTHE3 Transceivers	GTYE3 Transceivers	GTHE4 Transceivers	GTYE4 Transceivers	PCIe	MMCMs
xc7a100tcsq324-1	324	210	63400	126800	135	0	240	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	6

Figura 2.6: Recursos disponibles dentro de la plataforma Nexys A7.

- Analizar la documentación ofrecida por *Digilent*. [7]

Así bien, tal como se puede ver en la figura 2.6 o accediendo a la documentación de *Digilent*, los recursos disponibles serán: **63400 LUTs** (*Look-up Table*) de las cuales **19000** son de tipo **LUTRAMs**, **126800 FF** (*Flip-Flops*), **135 BRAMs** (*Block RAM*), **240 DSPs Slices** (*Demand Side Platform*) y **6 MMCMs** (*Clock Management Tiles*).

2.3. Captación del sonido en la guitarra eléctrica

La guitarra eléctrica, como ya se ha mencionado, es un instrumento electrófono [8] y por lo tanto emplea elementos electrónicos capaces de capturar y producir el sonido del instrumento en cuestión. El elemento electrónico que emplea la guitarra eléctrica, concretamente, es una **pastilla electromagnética** [8] (en la figura 2.7 se puede ver un ejemplo de este tipo de pastillas).



Figura 2.7: Ejemplo de una pastilla para guitarra eléctrica.

Estas pastillas electromagnéticas están formadas por un imán permanente rodeado por un bobinado de alambre de cobre. Por lo tanto, cuando un cuerpo metálico ferromagnético (las cuerdas) se mueve dentro del campo magnético de un imán permanente, se produce una corriente inducida en el bobinado de frecuencia igual a la de la oscilación del objeto y proporcional a la amplitud del movimiento. Esta corriente es muy débil, por ello el cableado interno del instrumento y el cableado hasta la amplificación, debe estar perfectamente apantallado para reducir y evitar en todo los posibles ruidos parásitos. [9]

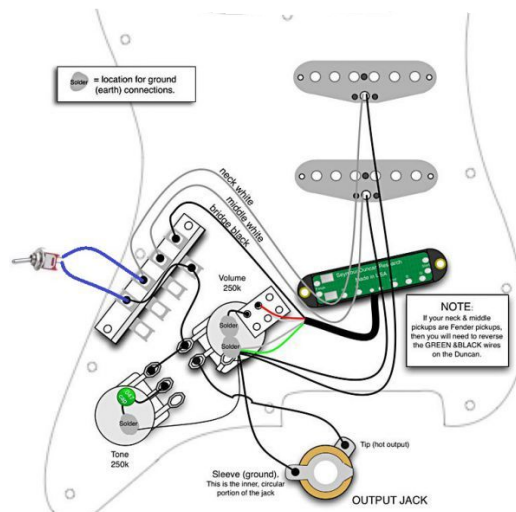


Figura 2.8: Circuito electrónico interno de una guitarra eléctrica.

Fijándose en la figura 2.8 se puede ver el lugar donde iría colocada la pastilla y que la manera de procesar la señal de audio hacia el exterior de la guitarra eléctrica será a través un conector Jack (tal y como se podía ver con anterioridad en la figura 1.1).

Análisis teórico de los efectos digitales

El objetivo de este capítulo será exponer el fundamento teórico de cada uno de los efectos estudiados a lo largo de estos meses. El capítulo se segmentará en 2 partes: efectos digitales que se han implementado dentro de la arquitectura FPGA para esta versión del prototipo y por otro lado, los efectos que han sido estudiados pero no han sido incluidos dentro de la arquitectura.

3.1. Teoría sobre los efectos digitales estudiados e implementados

En esta primera parte del capítulo se hará un recorrido por cada una de las categorías a las que puede pertenecer un efecto digital de audio. Estas tres categorías de efectos serán las siguientes:

3.1.1. Efectos basados en retardadores

Los efectos basados en retardadores serán aquellos que se encarguen de **añadir al audio original una muestra de este mismo (o varias muestras) un tiempo después del audio original** [10]. Cuando se habla de un efecto retardador, hay que tener en cuenta que la señal demorada se verá afectada por hasta 3 parámetros:

- **Tiempo del retardo o línea de retardo.** Este parámetro hará referencia al tiempo que existe entre el audio original y la primera muestra retardada. Este valor se dará en milisegundos.
- **Número de retardos.** Esta variable cuantificará el número de veces que se retarda el sonido original (dicho de otra forma, la cantidad de versiones que habrá a la salida del audio original). El valor estará acotado entre 1 e infinito.
- **Atenuación.** Determina cuanto disminuye la intensidad sonora con respecto a la muestra principal de audio.

Dependiendo del valor que tome cada uno de estos parámetros se definirá un tipo de retardador concreto. Este retardador será el encargado de dar nombre a nuestro efecto digital. A continuación se muestra la lista de los retardadores implementados con su correspondiente explicación:

3.1.1.1. Efecto retardado

Es el efecto más básico dentro de esta categoría. Su retardador esta basado en un único retardo, es decir, el **número de retardos es igual a uno**. La **atenuación suele ser de un medio** y por ello, la muestra retardada se escuchará con la mitad de intensidad que la muestra original (pese a mencionar estos valores, no quiere decir que deba ser siempre así ya que, se pueden llegar a aplicar atenuaciones de un cuarto o simplemente mantener al mismo nivel de intensidad sonora entre la muestra retardada y la muestra original y por lo tanto tener una atenuación nula. Así bien, el nivel de atenuación variará con respecto a la aplicación que se quiera desarrollar). El **tiempo de retardo suele ser más flexible e indeterminado** ya que, depende de la aplicación para la que se vaya a usar; por ejemplo si este tiempo es inferior a $10ms$ se puede considerar el retardador como un *doubling* y si, esta entre $25ms$ y $50ms$ se considera un *slapback*. Más allá de este rango de valores simplemente será un *delay*.

3.1.2. Efectos basados en sistemas no lineales

3.1.3. Efectos basados en sistemas lineales

3.2. Efectos digitales estudiados pero no implementados

Architecture

4.1. Introduction

In this chapter, we cover the design phase of this project, as well as implementation details involving its architecture. Firstly, we present an overview of the project, divided into several modules. This is intended to offer the reader a general view of this project architecture. After that, we present each module separately and in much more depth.

5.1. Introduction

In this chapter we are going to describe a selected use case. This description will cover the main Wool features, and its main purpose is to completely understand the functionalities of Wool, and how to use it.

5.2. Rule edition

...

Conclusions and future work

In this chapter we will describe the conclusions extracted from this project, and the thoughts about future work.

6.1. Conclusions

6.2. Achieved goals

N1

6.3. Future work

- F1

Impact of this project

This appendix reflects, quantitatively or qualitatively, on the possible impact...

A.1. Social impact

Economic budget

This appendix details an adequate budget to bring about the project...

B.1. Physical resources

Bibliografía

- [1] Digilent. Nexys4 DDR FPGA Board Reference Manual, Abril 2016.
- [2] Digilent Scott Larson. I2s Pmod Quick Start (VHDL).
Accedido en 8-10-2019 a [https://www.digikey.com/eewiki/pages/viewpage.action?pageId=85295576#I2SPmodQuickStart\(VHDL\)-CodeDownload](https://www.digikey.com/eewiki/pages/viewpage.action?pageId=85295576#I2SPmodQuickStart(VHDL)-CodeDownload), Octubre 2019.
- [3] Udo Zölzer. DAFX: Digital Audio Effects. Second Edition. 2011.
- [4] Yamaha. Especificaciones amplificador yamaha GA15.
Accedido en 9-11-2019 a https://es.yamaha.com/es/products/musical_instruments/guitars_basses/amps_accessories/ga15ii/index.html.
- [5] Line6. Spider III User Manual.
Accedido en 9-11-2019 a <https://line6.com/legacy/spideriii75/>.
- [6] Xilinx. Vivado Design Suite.
Accedido en 23-9-2019 a <https://www.xilinx.com/products/design-tools/vivado.html>, 2019.
- [7] Digilent. Nexys A7 Reference Manual.
Accedido en 18-9-2019 a <https://reference.digilentinc.com/reference/programmable-logic/nexys-a7/reference-manual>.
- [8] Enciclopedia. Instrumento electrófono.
Accedido en 28-12-2019 a http://enciclopedia.us.es/index.php/Instrumento_electr%C3%B3fono, Febrero 2017.
- [9] Wikipedia. Pastilla (micrófono).
Accedido en 28-12-2019 a [https://es.wikipedia.org/wiki/Pastilla_\(micr%C3%B3fono\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Pastilla_(micr%C3%B3fono)), Septiembre 2012.
- [10] Helenca Duxans Barrobés & Marta Ruiz Costa-jussà. Efectos digitales de la señal de audio.
Accedido por última vez en 27-12-2019 a [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Audio/Procesamiento_de_audio/Procesamiento_de_audio_\(Modulo_5\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Audio/Procesamiento_de_audio/Procesamiento_de_audio_(Modulo_5).pdf).
- [11] Eros García Arroyo & Daniel Payno Zarceño. Sistema de grabación, tratamiento y reproducción de audio-Versión 4.1. Diciembre 2018.
- [12] Javier Otero. Diseño e implementación sobre fpga de un pedal de efectos digital. Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Telecomunicación, June 2019.
- [13] John Michael Espinosa Durán & Pedro P. Liévano Torres & Claudia P. Rentería Mejía & Jaime Velasco Medina. Diseño De Un Microsistema Programable Para Efectos De Audio Digital

BIBLIOGRAFÍA

- Usando FPGAs. Accedido en 16-9-2019 a http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372014000200011, Diciembre 2014.
- [14] Examples of VHDL Conversions. Accedido en 24-10-2019 a <https://www.nandland.com/vhdl/tips/tip-convert-numeric-std-logic-vector-to-integer.html>.
- [15] Como generar números aleatorios en vhdl con un LFSR. Accedido en 30-10-2019 a <https://vhdl.es/lfsr-vhdl/>.
- [16] Doulos Ltd. Synthesisable Sine Wave Generator. Accedido en 26-11-2019 a https://www.doulos.com/knowhow/vhdl_designers_guide/models/sine_wave_generator/, Agosto 2003.
- [17] Wikipedia. Diseño de filtros de respuesta finita al impulso. Accedido en 27-11-2019 a https://es.wikipedia.org/wiki/Dise%C3%B1o_de_Filtros_de_Respuesta_Finita_al_Impulso, Septiembre 2019.
- [18] EUM. Introducción a los filtros digitales-Clase 10. Accedido en 27-11-2019 a <https://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/electivas/dsp/presentaciones/clase10.pdf>, 2011.
- [19] Timur. Conversion of fractional numbers between numeral systems. Accedido en 26-12-2019 a <https://planetcalc.com/862/>, 2011.
- [20] Micromodeler. Micromodeler DSP. Accedido en 26-12-2019 a <https://www.micromodeler.com/dsp/>.
- [21] Cardiff University. Digital Audio Effects. Accedido en 2-2-2019 a http://users.cs.cf.ac.uk/Dave.Marshall/CM0268/PDF/10_CM0268_Audio_FX.pdf.