

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 está a la salida y, finalmente, los efectos lineales tienen una función similar al descrito 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 it 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	9
2.3. Captación del sonido en la guitarra eléctrica	9
3. Requirement Analysis	11
3.1. Introduction	11
3.2. Use cases	11
3.2.1. System actors	11
4. Architecture	13
4.1. Introduction	13
5. Case study	15
5.1. Introduction	15
5.2. Rule edition	15

6. Conclusions and future work	17
6.1. Conclusions	17
6.2. Achieved goals	17
6.3. Future work	17
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, tono, volumen o 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. 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 15 *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 electrónico (guitarra eléctrica) hasta la entrada de la FPGA. Para ello se usará el *Pmod i2s2* 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 10W) 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).

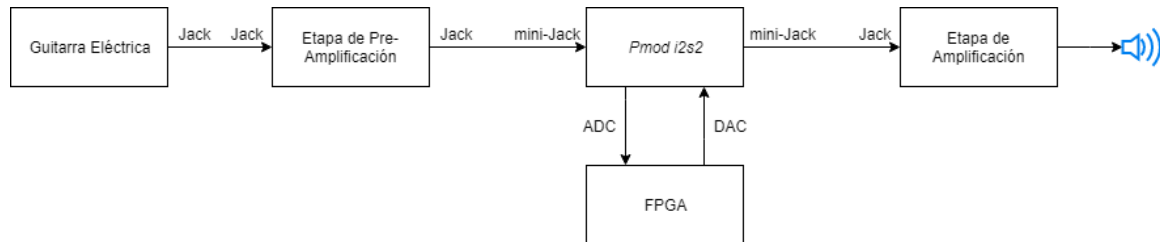


Figura 1.1: Arquitectura general del proyecto

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 l 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, funcionamiento e 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 [1] 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 a la vez.
- 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.**

Aquí va una foto de todo el sistema conectado

De esta misma 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 como 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 afirma que se han trabajado 18 semanas.

En total, un computo aproximado de 360 horas.

Interfaz de sonido externa y FPGA

Como se ha mencionado previamente, en este capítulo vamos a tratar con 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 principal función que tendrá esta etapa de pre-amplificación será captar a su entrada la señal eléctrica producida por la guitarra eléctrica y a 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 que dispone el amplificador, en el canal de entrada conectaremos la guitarra eléctrica y el canal de *Phones* se utilizará como canal de salida para llevar la señal acondicionada y adaptada a la entrada del *Pmod i2s2*.

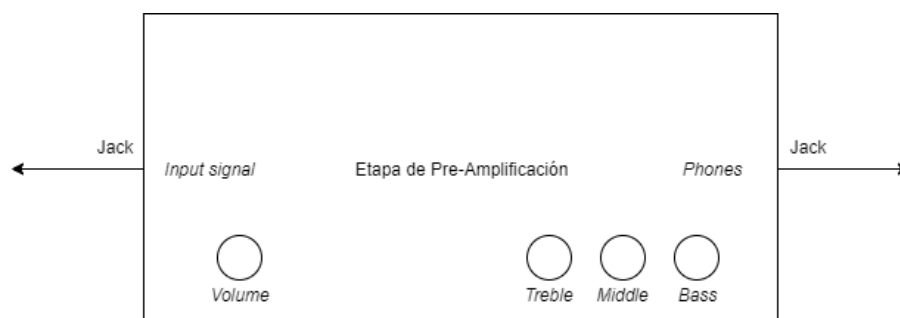


Figura 2.1: Características para la elección del amplificador de pre-amplificación

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

- No se cumple la característica principal propuesta (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.
- Por consiguiente a 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 amplificador *Yamaha GA15* que cuenta con una potencia total de 15W. En la referencia [2] se pueden ver las características más detalladas sobre este amplificador.



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

Ahora bien, 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.
- Dispone de tres controles para modificar el nivel de potencia que tendrán los sonidos agudos, medios y graves que se enviarán a la FPGA.
- Dispone de la salida auxiliar *Phones* la cual enviará la señal acondicionada a la FPGA.

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 que se necesita en este caso (proporcionar la señal adaptada y acondicionada a la FPGA) son bastante buenos ya que no trabajan en potencias muy elevadas.

2.1.2. Etapa de amplificación a la salida

2.2. FPGA

2.3. Captación del sonido en la guitarra eléctrica

Requirement Analysis

3.1. Introduction

3.2. Use cases

3.2.1. System actors

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] Udo Zölzer. DAFX: Digital Audio Effects. Second Edition. 2011.
- [2] Yamaha. Especificaciones amplificador yamaha GA15. Accedido en 27-12-2019 a https://es.yamaha.com/es/products/musical_instruments/guitars_basses/amps_accessories/ga15ii/index.html.
- [3] Eros García Arroyo & Daniel Payno Zarceño. Sistema de grabación, tratamiento y reproducción de audio. Versión 4.1. 2018.
- [4] 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.