



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica e Informática

Projeto em Engenharia Elétrica
Pedal de Efeitos para Guitarras em FPGA

Hugo Gayoso Meira Suassuna de Medeiros

Campina Grande, PB
Dezembro de 2019

Hugo Gayoso Meira Suassuna de Medeiros

Projeto em Engenharia Elétrica Pedal de Efeitos para Guitarras em FPGA

Relatório do trabalho final da disciplina de
Projeto em Engenharia Elétrica submetido à
Universidade Federal de Campina Grande

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática - CEEI
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Orientador: Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior, D.Sc.

Professor Orientador

Gutemberg Gonçalves dos Santos Júnior,
D.Sc

Professor Convidado

Marcos Ricardo Alcântara Morais, D.Sc

Brasil
Dezembro de 2019

Dedico não só esse trabalho, mas toda minha trajetória acadêmica a Deus e meus pais. Os três sempre me forneceram tudo que precisei. Amo vocês.

Agradecimentos

Esse trabalho fecha um ciclo muito importante da minha vida: minha graduação em Engenharia Elétrica. Quero dedicar esse pequeno espaço para algumas pessoas que foram indispensáveis para que eu não perdesse a motivação ao longo desses últimos anos.

Sou extremamente grato ao meu núcleo familiar. Meus pais: *Alexandre* e *Cacau*; Irmãos: *Diego* e *Eduarda*. Quero também agradecer a uma pessoa que tenho um apreço muito grande: *Maria Ramos*. Todos me forneceram o ambiente perfeito para eu me dedicar aos meus estudos.

Meus professores de exatas do ensino médio, particularmente os de física: *Marcconi*, *Ednaldo* e *Jorge Beja*. Seus ensinamentos foram base antes mesmo de eu entrar na universidade.

Meus amigos mais antigos de colégio que compõem o grupo *Só Amigas*, minha grande parceira *Lara* e meu eterno baterista *Petrus*. Essas amizades fortes se mantiveram além do tempo de escola.

Meus amigos de faculdade do semestre *2013.1* em particular: *Klynger*, *Martins*, *Pablo*, *Humberto*, *Cavalcante*, *Niago* e *Arthur*.

Por fim não poderia deixar de agradecer a *Rebecca Soares de Oliveira*, minha namorada e melhor amiga. Sua paciência e palavras de conforto me ajudam até hoje a me por nos eixos.

Encerro os agradecimentos com uma frase informal que me veio à cabeça enquanto escrevo essa seção:

O diploma é meu, mas tem o dedo de muita gente.

"A vida é um eterno aposto"

Resumo

O presente documento é um trabalho de conclusão de curso. Como trabalho, o aluno propõem o projeto e execução de um pedal de efeitos implementado em *Field Programmable Gate Array* (FPGA). O *Pedal de Efeitos*, nome atribuído ao projeto, tem seu uso voltado para guitarras elétricas.

O sistema é capaz de reproduzir efeitos do tipo distorção, repetição e modulação em amplitude. O usuário dispõem de uma interface de acionamento para seleção dos efeitos.

O projeto teve seu circuito lógico descrito em linguagem *Verilog*. Um protótipo para validação foi contruído em uma placa de desenvolvimento DE-2 da fabricante *Altera*. Esse modelo usa como base um *chip* de FPGA da família *Cyclone II*.

Palavras-Chave: 1. FPGA; 2. Processamento de Áudio; 3. Linguagem Verilog

Abstract

This document is the Final Year Project Report for the course of Electrical Engineering at Federal University of Campina Grande. The student proposed the project and execution of an FPGA-based guitar pedal for electric guitars. The system emulates Distortion, Tremolo and Delay effects. It also includes a user interface for switching effects on and off.

The logic circuit was coded in Verilog description language. A prototype was built using Altera's DE-2 development board. This board uses a Cyclone II FPGA integrated circuit.

Keywords: 1. FPGA; 2. Audio Processing; 3. Verilog Language

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TECNOLOGIAS	12
2.1	Sinais Digitais de Áudio	12
2.2	Processamento Digital de Sinais de Áudio	13
2.2.1	CODECs e Comunicação	14
2.2.2	Modulação em Amplitude	14
2.2.3	Efeitos não Lineares	15
2.2.4	Filtros Digitais	15
2.3	FPGAs	17
3	DESENVOLVIMENTO	18
3.1	Interface de Áudio	19
3.2	Cadeia de Efeitos	19
3.2.1	Distorção	20
3.2.2	Tremolo	21
3.2.3	Delay	23
3.3	Interface com Usuário	25
4	RESULTADOS E TRABALHOS FUTUROS	27
5	CONCLUSÕES	29
	REFERÊNCIAS	30

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema Genérico de Processamento de Áudio Digital	13
Figura 2 – Comunicação I2S	14
Figura 3 – Distorção não linear por limitação em amplitude	16
Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema proposto	18
Figura 5 – Sequência típica de ligação de pedais de guitarra	20
Figura 6 – Fluxo de sinal da cadeia de efeitos proposta	20
Figura 7 – Diagrama de blocos do efeito de distorção	21
Figura 8 – Onda modulante do efeito <i>Tremolo</i>	22
Figura 9 – Diagrama de blocos do efeito tremolo	23
Figura 10 – Diagrama de blocos do efeito delay	24
Figura 11 – Indicação de elementos para interface com o usuário	25
Figura 12 – Diagrama de blocos de habilitação de um efeito	26
Figura 13 – Curva resposta do sistema	27
Figura 14 – Curva resposta melhorada	27

1 Introdução

Guitarras elétricas são instrumentos eletromecânicos que captam as vibrações mecânicas de suas cordas e as convertem em um sinal elétrico por meio de captadores eletromagnéticos. Embora o instrumento emita som sem o acionamento de sua parte elétrica, guitarras são construídas de maneira a serem conectadas em um amplificador de áudio, popularmente conhecido como caixa de som.

O timbre das guitarras elétricas é o resultado de uma combinação entre as particularidades construtivas do instrumento e um circuito elétrico composto pelos captadores e o amplificador na qual a mesma é ligada. Ao passo que as características do instrumento são resultado da construção do mesmo e, portanto, pouco flexíveis a variações; o circuito elétrico compõe a parcela mais significativa no timbre final do instrumento ([THE ATLANTIC, 2015](#)).

Tipicamente, músicos inserem elementos neste circuito de maneira a alterar o som limpo¹ da guitarra como uma forma de personalização. A esses elementos são denominados os nomes pedais de efeito, pedaleiras, efeitos ou pedais. As mudanças no timbre da guitarra são predominantemente resultado de diferentes pedais inseridos em seu circuito.

Os efeitos são parte integral de uma melodia tocada em uma guitarra. Alguns são mais perceptíveis por causarem alterações profundas ao som natural do instrumento, outros são mais sutis por apenas realçar o som limpo do instrumento. Guitarras em músicas do gênero *Rock*, por exemplo, apresentam um som característico muito distinto do som das guitarras em músicas do gênero *Jazz*.

Sob a ótica da engenharia, o sinal elétrico da guitarra e os pedais de efeito podem ser vistos como um par sinal-sistema. Sendo o som limpo do instrumento um sinal, e toda a cadeia que transformam o sistema que gera um outro sinal de saída.

Os primeiros pedais de efeito eram sistemas analógicos construídos a partir de válvulas e posteriormente transistores. A partir da década de 1980, a utilização de pedais de efeito que processam o áudio de forma digital passou a ser cada vez mais expressiva ([THE ATLANTIC, 2015](#)).

De acordo com [Litmanovich e Mikler \(2017\)](#), pedais de efeito digitais são, hoje, em sua maioria construídos por meio de circuitos integrados dedicados ou microcontroladores. Pedaleiras desenvolvidas em FPGAs são praticamente inexistentes no mercado consumidor. Possíveis razões são a inviabilidade econômica, tendo em vista que essa tecnologia é mais custosa que as outras duas, além da consolidação das demais opções como soluções

¹ Para tocadores de guitarras, som limpo refere-se ao som original do instrumento sem adição de quaisquer efeitos. O som puro de uma guitarra é semelhante ao de um violão.

sólidas.

Todavia, o trabalho proposto não visa explorar o viés econômico do produto final, mas sim aplicar os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação do curso de engenharia elétrica da universidade federal de campina grande, sobretudo das disciplinas de Arquitetura de Sistemas Digitais e Processamento Digital de Sinais, em um projeto que atenda os requisitos para a aprovação na disciplina Projeto em Engenharia Elétrica.

Este documento é dividido da seguinte forma. Seção 2 apresenta a fundamentação teórica básica para o entendimento do projeto. Nele são destacados conceitos de Engenharia Elétrica e Engenharia de Áudio. A seção 3 é destinada à explicação da arquitetura do sistema digital proposto. As limitações do projeto e discussões de como melhorá-lo são discutidas na seção 4. Por fim, conclusões finais são apresentadas na seção 5

2 Fundamentação Teórica e Tecnologias

2.1 Sinais Digitais de Áudio

A representação digital de um sinal de áudio é uma sequência de números equivalentes à amplitude de amostras de um sinal analógico em intervalos de tempo discretos. O processo de conversão do sinal original, analógico, para a sua representação digital é realizada por meio de um conversor analógico-digital (ADC). Tipicamente, o ADC converte o sinal analógico em digital por meio de amostras periódicas ao longo do tempo e as quantiza em valores pré-definidos. Ao fim do processo, um sinal contínuo no tempo e amplitude, $x(t)$, é convertido em uma coleção de palavras, $x[n]$, associadas à uma frequência de amostragem, f_s (OPPENHEIM; SCHAFER, 1998).

A codificação Pulse Code Modulation (PCM) é predominantemente usada no processamento de sinais de áudio. Nesse formato, as palavras digitais representam o valor quantizado da amplitude de onda do sinal analógico no instante da amostragem. Além disso, sinais de áudio costumam ser representados por um par de palavras; uma referente ao canal direito e uma referente ao canal esquerdo (ZOLZER, 2011). A depender da complexidade do sistema de áudio, os canais podem ser comprimidos em um único sinal equivalente. Sinais cujos canais direito e esquerdo são iguais são denominados *Mono*. Oposto desse tipo de sinal é denominado *Stereo*.

Dentre os demais parâmetros que caracterizam um processo de conversão analógico-digital (AD) pode-se destacar, sobretudo, a resolução e a frequência de amostragem. A resolução determina a variação mínima do sinal analógico que resulta no menor incremento da palavra convertida. Considerando que o sinal a ser convertido esteja compreendido em um intervalo de amplitude compatível com o ADC, o número de bits da conversão é diretamente proporcional à resolução da conversão. A frequência de amostragem, por outro lado, é o número de amostras coletadas em um intervalo de tempo, normalmente em segundos.

Quanto maior a resolução e frequência de amostragem, mais fiel é o processo de conversão. Contudo, existem limites práticos que limitam qual frequência e resolução adotada na conversão AD baseados no teorema da amostragem de *Nyquist* e percepção auditiva do ser humano. O ouvido humano, saudável, é sensível a uma faixa de frequência compreendida entre 20 Hz e 20 kHz. O teorema da amostragem de *Nyquist* estabelece que a frequência mínima de amostragem para que um sinal seja recuperado integralmente, seja de pelo menos duas vezes a maior frequência do sinal (OPPENHEIM; SCHAFER, 1998).

Assim, considerando o teorema de amostragem, sinais de áudio devem ser amostrados em no mínimo em uma frequência de 40 kHz. Contudo, a variação dessa frequência para valores maiores e até menores, não necessariamente comprometem a transmissão da informação. A voz humana, por exemplo, possui máxima frequência abaixo de 3 kHz. Todavia, sistemas apropriados para reprodução de música operam com frequência igual ou maior que 44,1 kHz.

2.2 Processamento Digital de Sinais de Áudio

Um sistema digital de processamento possui uma estrutura como a apresentada na Figura 1. No contexto de sinais de áudio, transdutores elétricos convertem sinais analógicos mecânicos em sinais analógicos elétricos. Esses sinais são convertidos em sinais digitais, normalmente conversores apropriados para operar em uma faixa de frequência específica (OPPENHEIM; SCHAFER, 1998).

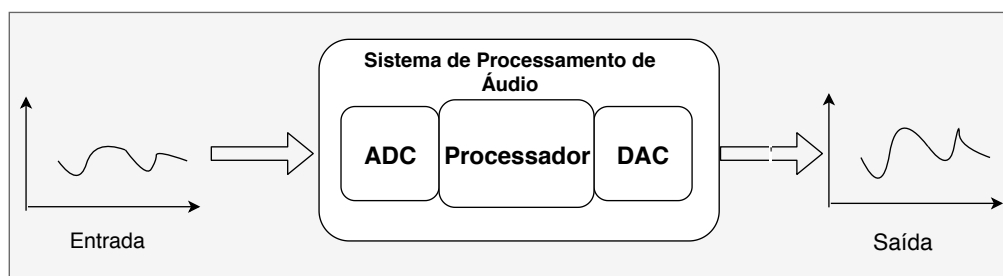


Figura 1 – Sistema Genérico de Processamento de Áudio Digital

O processamento digital de sinais (PDS) é um conjunto de algoritmos aplicado aos sinais digitais com diversos fins. Por fim, o sinal digital processado é convertido novamente em sinal elétrico analógico.

Processamento de áudio é uma categoria ampla que engloba diferentes funcionalidades. Pode-se destacar técnicas de compressão de dados, interação homem-máquina e percepção auditiva.

O processamento de áudio voltado para implementação de efeitos de guitarra apresenta diferentes classificações. Uma delas é em relação a natureza do efeito podendo ser linear ou não linear. Outra classificação pode ser feita em relação a forma de processamento que pode ser por amostra ou por blocos de amostras.

O trabalho proposto tem foco a percepção auditiva e o processamento é todo feito por amostras. As seções seguintes são destinadas à apresentação dos conceitos de comunicação e processamento utilizadas no projeto.

2.2.1 CODECs e Comunicação

Audio CODECs, em hardware, são dispositivos que atuam como conversores ADC e DAC voltado para sinais de áudio. Esses dispositivos são normalmente encontrados em placas de áudio ou circuitos dedicados ao processamento de áudio.

O fato de serem dedicados à conversão de sinais de áudio, implica em os mesmos possuírem características de conversão consideradas padrão na indústria. Frequências de amostragem comuns nesses tipos de dispositivos costumam ser 8 kHz; 32 kHz; 44,1 kHz; 48 kHz; 88,2 kHz ou 96 kHz. A largura da palavra digital pode variar de 16 a 32 bits.

A comunicação entre dispositivos de áudio em sistemas digitais, converge para o uso do protocolo I2S e suas respectivas variantes *Left Justified* e *Right Justified*. Estes três protocolos fazem o uso de três canais destinados à transmissão do *clock* síncrono, dados e indicador de canal. A diferença entre eles se dá na relação entre qual canal de áudio, direito ou esquerdo, é transmitido primeiro e o instante de captura da primeira amostra.

No protocolo I^2S , de acordo com [Instruments \(2014\)](#), configura-se os dispositivos como um par mestre-escravo. O dispositivo mestre inicia a comunicação comutando o sinal de seleção de canal para nível lógico baixo e transmite serialmente a palavra referente ao canal esquerdo de áudio. Quando o sinal de seleção de canal é invertido para nível lógico alto, o mestre sinaliza ao escravo o início da transmissão do canal direito de áudio. Na Figura 2 é ilustrado um exemplo de comunicação no protocolo I^2S .

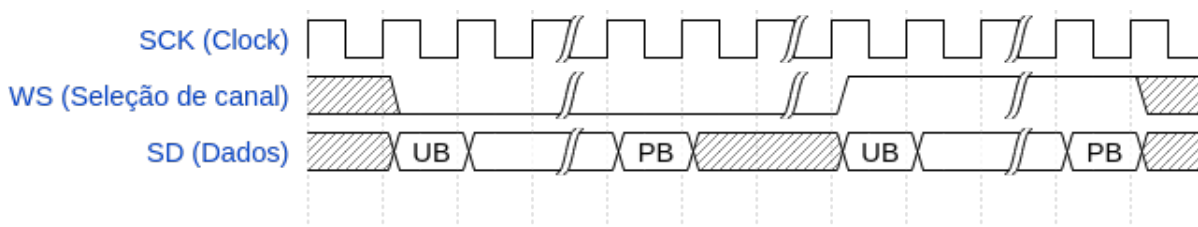


Figura 2 – Comunicação I2S

2.2.2 Modulação em Amplitude

Modulação é uma técnica de codificação em que um sinal de menor frequência (modulador) modifica a amplitude de um outro sinal de maior frequência (portador). Essa técnica é bastante usada em sistemas de comunicação ([OPPENHEIM; SCHAFER, 1998](#)).

A modulação em amplitude (AM) ocorre quando modula-se a amplitude da onda portadora. Esse tipo de modulação é normalmente associado à faixa de operação dos sinais de rádio que operam na faixa entre 540 kHz a 1600 kHz. Entretanto, a modulação em amplitude contempla uma gama de sinais mais ampla.

Em processamento de áudio, aplicação de ondas de frequências até 30 Hz são usadas como moduladoras para diversos fins. Essa faixa de frequência é denominada Baixa Frequência de Oscilação (LFO - *Low Frequency Oscillation*) (HUNTER, 2004). Diferente de uma transmissão de rádio AM em que a onda moduladora carrega a informação a ser transmitida, o sinal de áudio (informação) é a portadora do sinal modulado.

A aplicação direta da modulação em amplitude em áudio caracteriza o efeito *tremolo*. Esse efeito tem suas origens datadas do ano 900 A.C. (ZOLZER, 2011). A técnica consiste em oscilar a amplitude do som do instrumento. De forma mecânica consiste em alterar a direção do som emitido pelo instrumento. A partir da metade do século XX, essa técnica passou a ser replicada em circuitos eletrônicos.

2.2.3 Efeitos não Lineares

Efeitos ditos não lineares adicionam componentes interhamônicas de frequência não presentes no espectro do sinal original. Em outras palavras, causam distorção harmônica no sinal.

Em grande parte das aplicações musicais, não linearidades em sistema de processamento são evitadas, visto que elas mascaram um sinal de áudio original, cancelando componentes do espectro sinal, ou ainda introduzindo componentes não agradáveis ao ouvido humano (ZOLZER, 2011).

Contudo, não linearidades podem ser usadas de forma controlada para resultar em sons característicos de gêneros musicais como o som de pedais de distorção em músicas de *Rock* (ZOLZER, 2011).

O efeito *overdrive* é um tipo de efeito não linear de distorção. Originalmente implementado em circuitos analógicos, o *overdrive* amplifica um sinal até um certo limiar de distorção. Esse limiar é relacionado com dispositivo amplificador (HUNTER, 2004). Como resultado, as ondas são cortadas em um valor máximo de amplitude.

O corte no sinal de áudio tende a transformar sinais de borda suave em ondas quadradas. Naturalmente esse processo resulta em um sinal cujo espectro harmônico é mais denso do que o do sinal original. Na Figura 3 é apresentado um sinal senoidal e o mesmo sinal após um processamento não linear que limita a amplitude da onda em um mínimo e máximo (LD, -LD).

2.2.4 Filtros Digitais

Um sinal de áudio pode ser tratado como uma combinação entre sinais senoidais de frequência e amplitudes distintas. Os filtros são funções que alteram as amplitudes das funções senoidais que formam um sinal. Uma vez implementado, um filtro pode ser visto como um sistema linear (ZOLZER, 2011). Dessa forma, transformações lineares podem

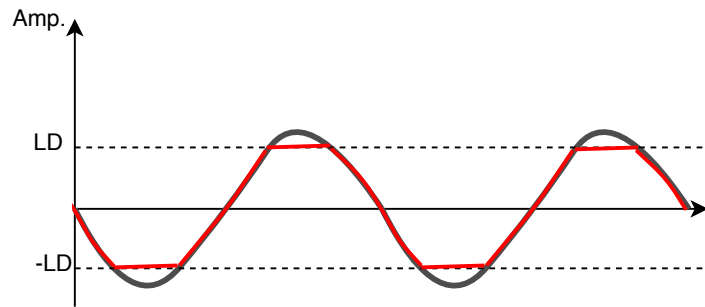


Figura 3 – Distorção não linear por limitação em amplitude

ser vistas como filtros e vice-versa. Em sistemas digitais, existem duas categorias clássicas de filtros os de resposta ao impulso finita(FIR) e resposta ao impulso infinita(IIR). Neste trabalho, apenas os IIR foram utilizados.

Nos FIR, cada amostra da sua saída é uma função exclusiva de sua entrada atual e de entradas passadas. O mesmo não ocorre nos IIR. As amostras de saída são uma combinação entre amostras de entrada e saídas passadas, caracterizando uma realimentação do sistema.

Um filtro IIR pode ser descrito pela sua equação de diferenças. A expressão geral de um IIR é apresentada na expressão 2.1 (OPPENHEIM; SCHAFER, 1998). Na expressão, os coeficientes $b_0...b_M$ e $a_1...a_N$ são, respectivamente, os mesmos coeficientes do polinômio característico do numerador e denominador da transformada Z do filtro, expressão 2.2.

$$y(n) = b_0x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_Mx(n-M) - a_1y(n-1) - \dots - a_Ny(n-N) \quad (2.1)$$

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_Mz^{-M}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_Nz^{-N}} \quad (2.2)$$

Filtros digitais possuem um atraso intrínseco entre o sinal de entrada e de saída. Por isso a complexidade de um filtro digital, em geral, é avaliada para a tecnologia usada para implementá-lo.

Em sinais de áudio os filtros são usados tanto para atenuação de ruídos como também modelagem do sinal. Apesar de atuarem da mesma forma, essas aplicações possuem objetivos distintos já que atuam em faixas de frequência distintas. Ruídos são frequências próximas de 20 kHz e a modelagem do som, também conhecida como equalização, é concentrada entre 100 Hz e 10 kHz.

Além da filtragem, a estrutura dos filtros IIR permite a implementação do efeito *delay* graças ao elemento de memória. O *delay* é uma reprodução do fenômeno natural eco. Os primeiros efeitos de guitarra desse tipo faziam o uso de fitas magnéticas para gravar o áudio da guitarra e reproduzir novamente após um atraso.

2.3 FPGAs

FPGAs são dispositivos semicondutores compostos por uma matriz de blocos lógicos configuráveis conectados por uma interconexão programável. Após fabricados, os *chips* de FPGAs não possuem nenhuma lógica funcional. O usuário programa o *chip* e acordo com a aplicação desejada. A programação pode ser feita uma única vez ou mais vezes a depender da tecnologia usada na fabricação do dispositivo.

Tradicionalmente, circuitos integrados(CI) digitais são projetados em alto nível de abstração e traduzidos em transistores através de técnicas de litografia. Esse modelo de manufatura é pouco flexível visto que uma vez fabricado, o circuito possui suas funções restritas as do projeto inicial (LITMANOVICH; MIKLER, 2017).

Desenvolvedores de sistemas digitais contornam a limitação de circuitos integrados dedicados por meio de processamento via *software* em microcontroladores e DSPs. Apesar de mais flexíveis, ainda são limitados quando comparados com FPGAs. Além do mais, FPGAs operam, em geral, em frequências mais altas do que microcontroladores.

Chips FPGAs podem ser comercializados isoladamente, entretanto, é comum encontrar no mercado placas de desenvolvimento. As placas agregam em um único produto uma série de outros dispositivos periféricos de uso geral como memórias, LCDs, conectores, dentre outros. O uso dessas placas permite a implementação de protótipos funcionais em tempo reduzido.

3 Desenvolvimento

O **Pedal de Efeitos** é apresentado em forma de diagrama de blocos na figura 4. Na Figura, são ilustrados três componentes responsáveis pelo processamento do áudio, bem como o fluxo de sinais dentro do sistema.

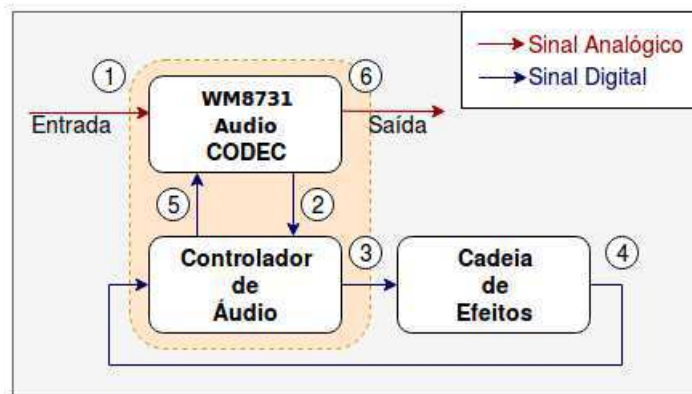


Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema proposto

O **CODEC** é o único elemento externo ao *chip* de FPGA. O **Controlador de Áudio** e **Cadeia de Efeitos** são as partes descritas em *hardware*. O fluxo dos sinais é indicado pela sequência numérica ilustrada no diagrama:

1. Sinal analógico é convertido em amostras de áudio digital pelo **CODEC**;
2. Palavras de áudio digital são enviadas por meio de protocolo I^2S do **CODEC** para o **Controlador de Áudio**;
3. Áudio digital é disponibilizado para o caminho de dados do sistema digital;
4. Áudio processado pela **Cadeia de Efeitos** é enviado de volta ao **Controlador de Áudio**;
5. Áudio digital processado é enviado para o **CODEC** em protocolo I^2S ;
6. Amostras áudio digital processado são convertidas em sinal analógico.

A área em destaque na Figura 4 corresponde a um reuso de código que fora desenvolvido pela Universidade de Toronto (UofT) como material da disciplina *ece241-Digital Systems* (UNIVERSITY OF TORONTO, 2007). Este subsistema, nomeado **Interface de Áudio**, configura e permite a comunicação entre o CODEC e FPGA da placa de desenvolvimento DE-2 da Altera.

Reutilização de código é uma prática comum no desenvolvimento de sistemas digitais, portanto a adoção de uma solução validada justifica o uso do controlador de áudio. Detalhes do funcionamento da Interface de Áudio e suas respectivas adaptações para o projeto proposto de Áudio são apresentados na seção 3.1.

O diferencial proposto por esse trabalho está presente na **Cadeia de Efeitos**. Na seção 3.2 são apresentados os módulos que compõem a cadeia de efeitos, bem como o funcionamento dos mesmos.

3.1 Interface de Áudio

A interface de áudio é a porção do pedal de efeitos responsável pela conversão dos sinais entre os domínios analógico e digital (CODEC), e a coordenação da entrada e saída do sinal de áudio digital no *chip* de FPGA (Controlador de Áudio).

A descrição de *hardware* integral do projeto da desenvolvido pela Universidade de Toronto contempla dois módulos de comunicação em protocolos I^2C e I^2S , além de um gerador de onda quadrada em frequências audíveis. Destes, removeu-se apenas o gerador de ondas, por não ser aplicável ao escopo do trabalho de conclusão de curso proposto.

O projeto original também trata os canais de áudio direito e esquerdo individualmente. Contudo, no *Pedal de Efeitos*, simplificou-se essa abordagem processando apenas o canal de esquerdo. Essa simplificação é justificável devido a natureza dos sinais provenientes de instrumentos de cordas elétricos que são *mono*.

As interfaces I^2C e I^2S são módulos distintos responsáveis, respectivamente, pela configuração inicial do *CODEC* e comunicação das amostras de áudio digital entre o *chip* de FPGA e o *CODEC*.

As configurações definidas na inicialização do sistema são os registros internos do *CODEC* que são as características do processo de conversão analógico-digital. Optou-se por manter as mesmas configurações do projeto original. Destacam-se aqui a frequência de amostragem de áudio em 48 kHz, e o tamanho da palavra digital igual a 32 *bits*.

A frequência de amostragem do áudio é diferente da frequência de operação do sistema. O *clock* dos elementos sequenciais que compõem o sistema digital é 50 MHz. Isso implica que embora amostras de áudio sejam recebidas e enviadas à 48 kHz, o fluxo de dados de processamento é realizado em frequência superior.

3.2 Cadeia de Efeitos

A cadeia de efeitos possui três efeitos nomeados: *Distorção*, *Tremolo* e *Delay*. A seleção dos efeitos foi feita a fim de se obter pelo menos um dos tipos *distorção*, *modulação*

e repetição.

A sequência da série de efeitos é particular de cada músico. Entretanto, existem convenções típicas entre os que fazem uso de pedais. Uma topologia convencional é apresentada na Figura 5. Na figura, os efeitos são agrupados de acordo com sua classificação com relação a sua funcionalidade. Os efeitos de compressão e tratamento de áudio devem ser os primeiros, seguido por distorções, alteração, modulação e por último os efeitos de repetição.

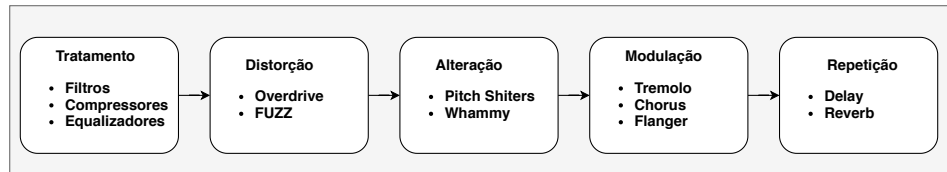


Figura 5 – Sequência típica de ligação de pedais de guitarra

A fim de seguir essa ordem convencional, a cadeia de efeitos é implementada conforme ilustrado na Figura 6.

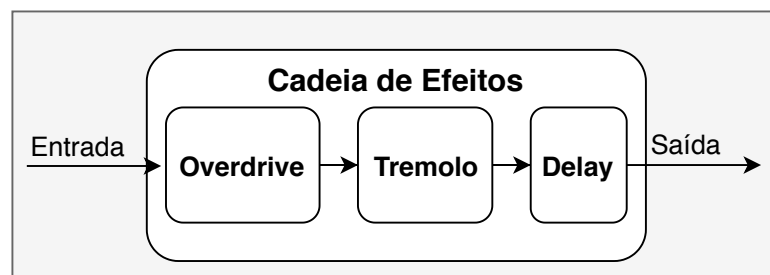


Figura 6 – Fluxo de sinal da cadeia de efeitos proposta

A seguir são apresentados detalhes construtivos do funcionamento de cada um dos efeitos que compõem o *Pedal de Efeitos*.

3.2.1 Distorção

A distorção implementada emula o comportamento de efeitos do tipo *overdrive*. No correspondente analógico desse efeito, o sinal de áudio é amplificado ao ponto de atingir a região de saturação de um circuito eletrônico amplificador. A reprodução do efeito é obtida a partir de um comparador e um valor de referência constante, definido por **Limiar de Distorção** (LD).

Na figura 7 é apresentado um diagrama de blocos em alto nível de abstração do módulo de distorção implementado. A saturação é obtida por meio de uma comparação entre a amostra de entrada e LD. Amostras cujo valor absoluto está compreendido no intervalo $(-LD, +LD)$ são replicadas na saída do módulo sem alteração; em caso contrário, a amostra de saída respectiva possui valor igual LD. Esse comportamento é descrito na expressão 3.1.

$$y[k] = \begin{cases} LD & \text{se } x \geq LD \\ x[k] & \text{se } -LD < x < LD \\ -LD & \text{se } x \leq -LD \end{cases} \quad (3.1)$$

A intensidade de distorção é inversamente proporcional ao valor LD. LD é inserido no sistema por meio de um parâmetro definido no instante de síntese lógica do módulo. O grau de distorção do efeito pode ser mensurado de pela razão entre LD e o máximo valor absoluto do sinal áudio de entrada. Esse métrica corresponde a uma normalização de LD em relação a amostra de maior amplitude aplicada à entrada do sistema.

Como consequência do módulo usar uma constante para comparação, o grau de distorção é dependente da amplitude do sinal de entrada. Na implementação proposta, adota-se uma constante igual a 32'h01000000. Esse valor é suficiente para distorcer sinais de áudio provenientes de instrumentos de captação passiva como guitarras elétricas. Essa constante foi obtida experimentalmente.

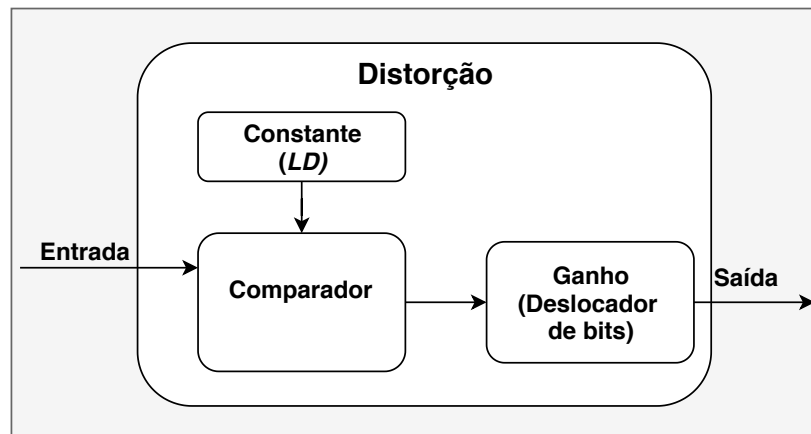


Figura 7 – Diagrama de blocos do efeito de distorção

Após a distorção, a amostra de áudio é amplificada por um fator de ganho de 2^2 . A razão pela qual o fator de ganho é expresso em potência de dois é devido fato que o módulo usa um deslocador de dois *bits* para esquerda para efetuar essa operação. Essa operação compensa a redução de volume do som decorrente da limitação em amplitude do comparador.

3.2.2 Tremolo

O tremolo modula o sinal de áudio de entrada de forma semelhante a uma de transmissão de rádio AM. Dentre os fatores que influenciam o resultado do efeito, destacam-se a forma da onda moduladora, sua frequência e o coeficiente de modulação máximo— definido aqui como sendo o valor máximo de atenuação do sinal de áudio da entrada.

Em sistemas de comunicação, utiliza-se uma função trigonométrica como onda modulante; no efeito implementado, a onda modulante possui uma forma de escada com quatro níveis, como ilustrado na Figura 8.

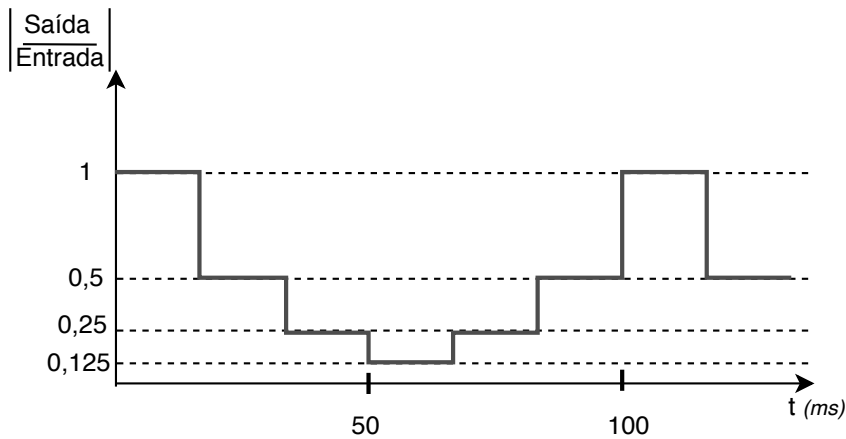


Figura 8 – Onda modulante do efeito *Tremolo*

A arquitetura implementada é ilustrada no diagrama de blocos na Figura 9. Os principais elementos que compõem o módulo são o contador bidirecional, o divisor de *clock* e o deslocador de bits variável, que, em conjunto, determinam a forma, frequência e os coeficientes de modulação do efeito.

A ação combinada do contador bidirecional alimentado pelo do divisor de *clock* é a maneira adotada para obtenção de uma onda periódica ilustrada em 8. O deslocamento de *bits* age como um multiplicador em que uma das suas entradas é uma potência de dois inversa, coeficientes de modulação. O deslocador de bits é usado pelos motivos expostos na seção 3.2.1.

O uso do deslocador de *bits*, justifica a forma da onda modulante. A modulação em amplitude, portanto, é realizada multiplicando a amostra de entrada por um coeficiente de modulação correspondente ao inverso de uma potência de dois, i.e., 1; 0,5; 0,250; 0,125.

O fato do primeiro coeficiente de modulação diferente de 1 ser 0,5, resulta em uma percepção de corte do som. Isto é, a variação de volume do som não é suave. Todavia, essa característica se faz presente em alguns estilos musicais, como o *Rockabilly*.

Os parâmetros de arquitetura foram definidos empiricamente. Pontos a serem ressaltados em relação a essa seleção são:

- O efeito de tremolo para frequências de oscilação da onda modulante maiores que 30 Hz são imperceptíveis;
- Deslocamento de dois *bits* é o limite de atenuação perceptível.

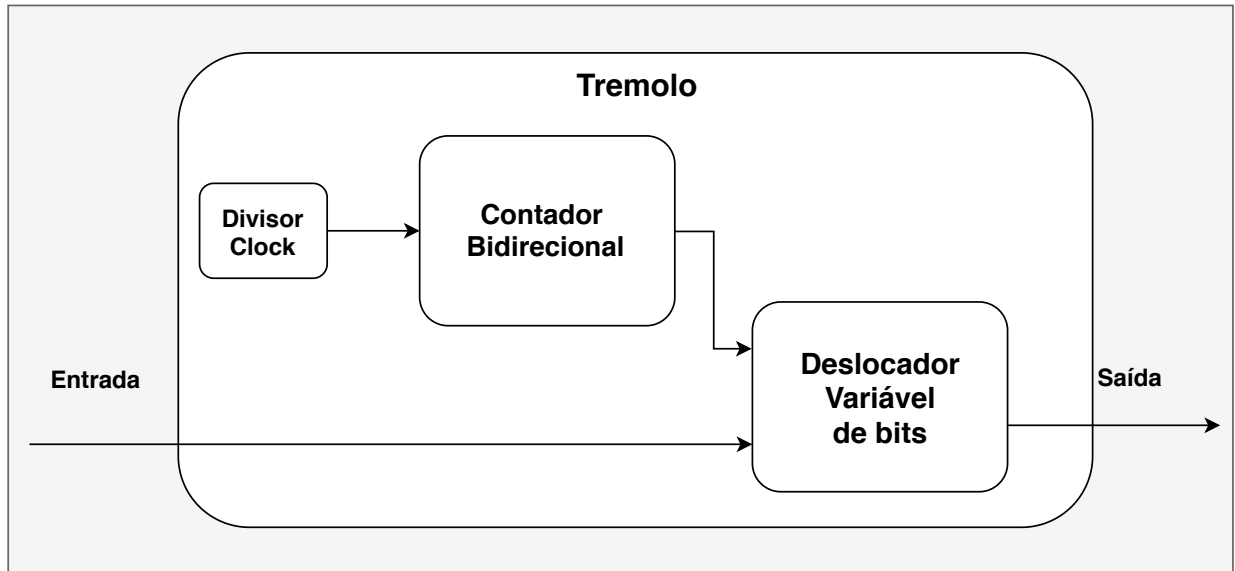


Figura 9 – Diagrama de blocos do efeito tremolo

No projeto proposto, o contador bidirecional opera em um intervalo de $[0, 3]$. Isso implica em quatro coeficientes de modulação. Portanto o período da onda modulante final equivale ao quádruplo do período do *clock* após ser dividido.

Sabendo que a frequência do *clock* após a divisão é de 40 Hz, a caracterização final do efeito é de uma modulação por uma onda escada de quatro níveis periódica em 10 Hz com coeficiente máximo de modulação de 0,125 e operação do sistema é de 50 MHz, o resultado final é uma onda modulante de frequência igual a 10 Hz e coeficiente de modulação máximo de 0,125.

3.2.3 Delay

O efeito *delay* caracteriza-se pela repetição de um sinal sonoro aplicado à sua entrada. A caracterização desse efeito por ser feita por uma constante de tempo, D , e um fator de decaimento, b . A expressão que modela o comportamento desse efeito é apresentada em 3.2. Observa-se que a expressão é equivalente à de um filtro IIR, expressão 2.1.

$$y[n] = x[n] + b \cdot y[n - D] \quad (3.2)$$

O diagrama de blocos ilustrado na Figura 10 contém os elementos chave que compõem esse módulo. Essencialmente o bloco combina uma amostra de entrada atual com uma amostra de saída por meio de um somador. Cada amostra de saída é armazenada em uma memória após passar por uma filtragem.

A memória desempenha um papel fundamental para implementação da arquitetura proposta. O funcionamento do sistema requer que a memória armazene uma quantidade

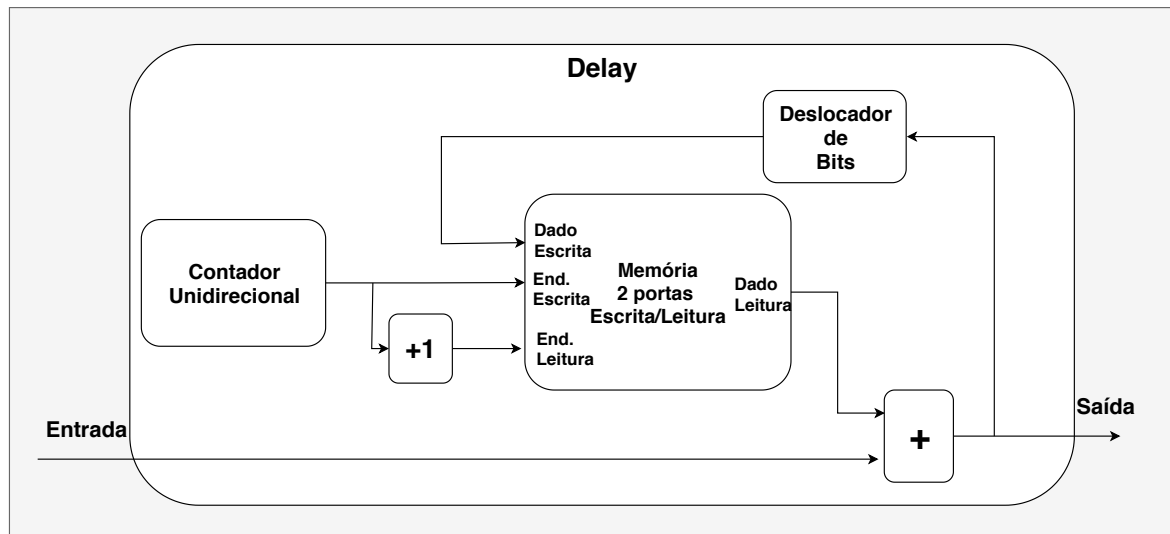


Figura 10 – Diagrama de blocos do efeito delay

de palavras equivalente a pelo menos 25 milisegundos¹ de áudio além de permitir escrita e leitura em endereços distintos em um mesmo instante de tempo.

A implementação da memória faz o uso de células de *RAM* estática disponíveis no *chip* da FPGA adotada. O uso desses elementos se fez necessário já que o número de *flip-flops* disponível na matriz programável da FPGA não atende aos requisitos de tempo propostos.

Considerando a frequência de amostragem de 48 *kHz* e com tamanho de palavra de 32 *bits*, são necessários 384 *kBits*, 145% da quantidade de elementos lógicos disponíveis no modelo adotado. Considerando a quantidade de memória *RAM* interna da FPGA, os 384 *kbits* correspondem a aproximadamente 80% do total de memória estática dedicada.

O armazenamento e leitura dos dados na memória é feito de maneira que o endereço de leitura é sempre uma posição à frente daquela em que é feita a escrita. Isso garante que a amostra, após escrita, seja lida apenas quando todos espaços de memória forem percorridos.

O controle de endereçamento da memória é feito por meio de um contador unidirecional cuja frequência de operação é igual ao período de amostragem do sistema, 48 *kHz*. A saída do contador é o endereço de escrita na memória; a mesma saída é incrementada e usada como entrada do endereço de leitura. Dessa forma, o tempo necessário para preencher toda a memória corresponde ao período de repetição do efeito.

A saída do efeito que é gravada na memória é atenuada por meio de um deslocador de *bits*. Essa operação corresponde a dividir o valor da amostra por dois. A atenuação garante que realimentação do filtro gere estabilidade no sistema, já que uma amostra aplicada ao sistema tende a ser atenuada por um fator de 0,5 a cada ciclo de

¹ A unidade de tempo é arbitrária com base em valores de pedais de efeito comerciais

processamento.

3.3 Interface com Usuário

O *Pedal de Efeitos* é um projeto de sistema digital baseado em FPGA. Apesar de ser compatível com múltiplas plataformas, o projeto foi desenvolvido com o uso de uma placa de desenvolvimento DE-2 da fabricante Altera. Isso implica que além do *chip* de FPGA e CODEC, outros recursos integrados à placa foram disponibilizados para interface com o sistema proposto. Dentre estes destacam-se as chaves (*switches*), botões (*push-buttons*) e *LEDs* presentes da placa.

Um pedal de efeitos comercial, usualmente, possui elementos de ajuste e acionamento dos efeitos que o compõem. Embora o primeiro elemento seja desejável, não é um item que compromete a funcionalidade do dispositivo; o segundo, em contrapartida, é intrínseco ao sistema já que fornece ao usuário o controle de formar combinações de efeitos, incluindo o não acionamento de nenhum efeito.

No projeto proposto, optou-se por implementar uma interface básica de acionamento via chaves em conjunto com *LEDs* indicativos. O mecanismo de operação consiste em o usuário selecionar qual efeito o mesmo deseja acionar, fazendo o uso das chaves *SW[2,0]* indicadas na figura 11. Ao acionar uma chave, o usuário pode confirmar a ativação do efeito por meio do respectivo *LED* posicionado acima da chave comutada.

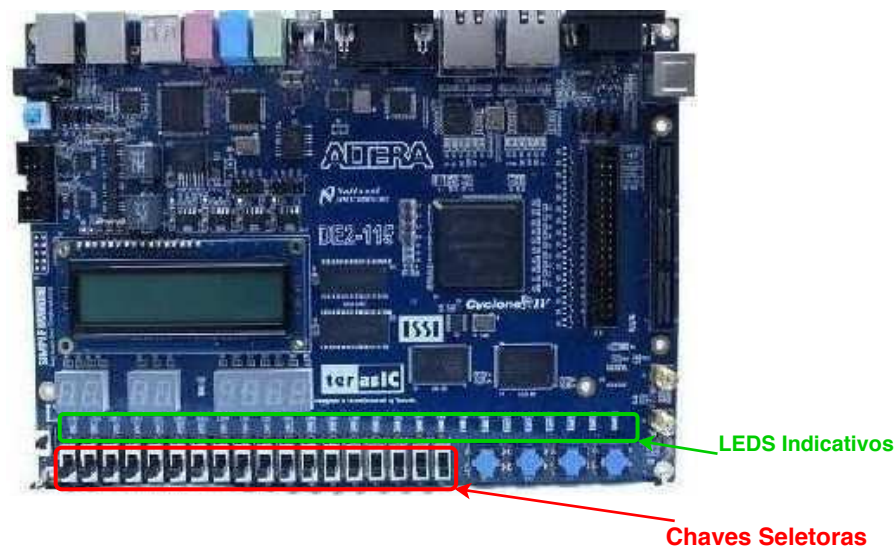


Figura 11 – Indicação de elementos para interface com o usuário

Do ponto de vista lógico. O sinal lógico indicado pela chave é conduzido ao respectivo módulo sob forma de habilitador do módulo lógico. Isso implica que cada um dos módulos descritos na seção **Cadeia de Efeitos** possui em sua interface de entrada um sinal de entrada que habilita ou desabilita o efeito.

Um diagrama de blocos em alto nível de abstração é ilustrado na Figura 12. Na figura é indicado como cada uma das chaves seletoras atuam nos blocos que compõem a cadeia de efeitos proposta. Note que interno à cada módulo, o sinal de habilitação seleciona a saída do efeito. Assim, se desabilitado, a saída do bloco de efeito corresponde à amostra de entrada do sistema; caso contrário, a saída corresponde à amostra processada pelo módulo.

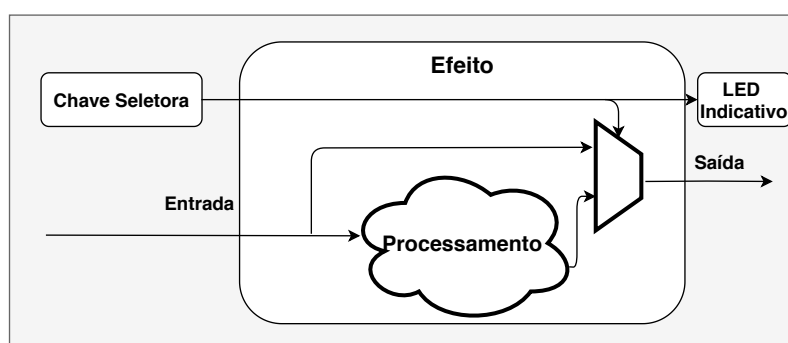


Figura 12 – Diagrama de blocos de habilitação de um efeito

4 Resultados e Trabalhos Futuros

O resultado do projeto proposto atende aos requisitos mínimos presentes apresentados na proposta original.

Por outro lado, a avaliação das funcionalidades e qualidade sonora final do protótipo final indica algumas limitações que podem ser aperfeiçoadas em futuros.

Nesta seção são indicadas as limitações do ponto de vista de um músico usuário do pedal. São apresentadas, ainda, aqui possíveis soluções no contexto da engenharia do sistema.

Distorção

A principal limitação desse efeito é a ausência de regiões de transição para amostras que estão próximas à região do limiar de saturação. Na implementação final, a função que relaciona amostra de saída com a amostra de entrada tem um comportamento como o descrito na Figura 13. Contudo, outras implementações digitais do efeito buscam suavizar a curva da Figura 13 como o apresentado na Figura 14.

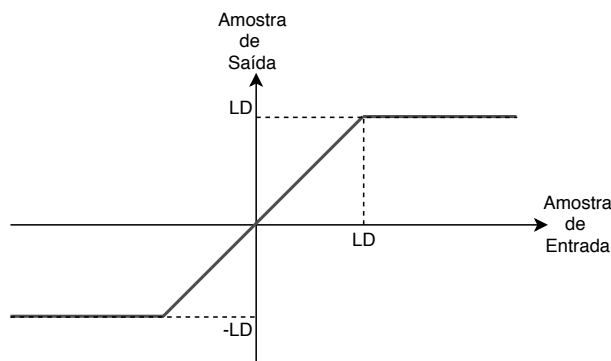


Figura 13 – Curva resposta do sistema

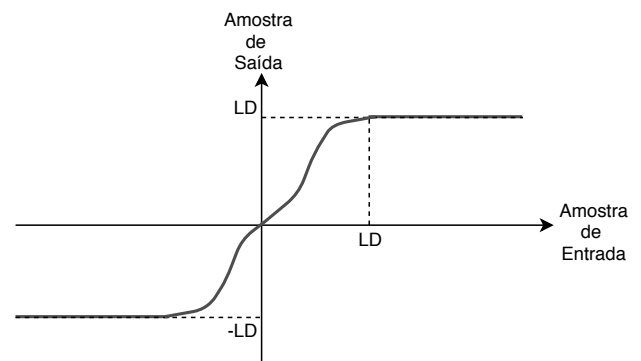


Figura 14 – Curva resposta melhorada

Por fim, a etapa de ganho final do efeito realça a presença de ruídos resultantes do sinal analógico que são representados no domínio digital. O uso de um filtro para atenuação dessas componentes de frequência mais altas realçaria o efeito como um todo.

Tremolo

O uso da operação de deslocamento de bits implica em uma variação muito abrupta na amplitude da onda. o aumento de níveis da onda modulante é uma alternativa para resolução dessa limitação. Contudo, ao implementar essa alternativa, é necessário alterar a arquitetura de maneira que seja contemplada operações de multiplicação.

A frequência da onda modulante é outro aspecto que pode ser aperfeiçoado no efeito. Essa melhoria pode ser obtida alterando o contador presente na arquitetura que atua como um divisor de *clock*.

Delay

Implementações comerciais de *delay* possuem um subsistema para processamento do sinal em sua malha de realimentação. Esse processamento é feito tipicamente por um filtro passa baixas. O uso desse artifício torna o decaimento do som mais natural à percepção humana. A arquitetura proposta apenas atenua o som, o que assemelha a um som projetado em um longo cilindro.

Outra limitação do *Pedal de Efeitos* é a ausência de controle no tempo de repetição. Da forma como este efeito é implementado, variar o máximo endereçamento de escrita e leitura na memória é uma alternativa para obter-se frequências mais altas. Para diminuir a frequência de repetição, seria necessário dispor de mais memória.

5 Conclusões

Projeto em Engenharia Elétrica é uma oportunidade ímpar para o graduando em Engenharia Elétrica aplicar os conhecimentos construídos ao longo do período acadêmico de forma prática.

O *Pedal de Efeitos* implementa em FPGA Distorção, *Tremolo* e *Delay*. Tipicamente produtos comerciais fazem o uso de microcontroladores devido ao baixo custo e por atenderem a demanda de *dados* para esse tipo de processamento. Entretanto, este trabalho de conclusão de curso realiza uma prova de conceito que FPGAs também são alternativas para esse tipo de aplicação.

O resultado final do projeto é satisfatório embora pouco flexível do ponto de vista de alteração de parâmetros. Contudo, a arquitetura proposta viabiliza a escalabilidade do projeto.

O desenvolvimento deste projeto requiriu conhecimentos de sistemas digitais, como descrição em *hardware* e protocolos de comunicação entre periféricos. Além destes, uma sólida base em sinais e sistemas para processamento de sinais digitais foram imprescindíveis para o objeto final fosse concretizado.

Devido ao embasamento necessário, pode-se afirmar que o *Pedal de Efeitos* se enquadra como um objeto de estudo de disciplinas práticas da grade curricular de disciplinas do profissional básico e ênfase em Eletrônica.

Por fim, a capacidade de avaliação e resolução de problemas, bem como a gerência de tempo, inerentes à formação de um engenheiro eletricista, são habilidades fruto de longas horas de estudo na escola de Engenharia.

Referências

- HUNTER, D. *Guitar Effects Pedals - the Practical Handbook*. [S.l.]: Hal Leonard, 2004. ISBN 1617747025. Citado na página 15.
- INSRUMENTS, T. *Manual do Usuário Inter-IC Sound (I2S)*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado na página 14.
- LITMANOVICH, V.; MIKLER, A. Fpga design and implementation of electric guitar audio effects. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 17.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 870 p. ISBN 0-13-754920-2. Citado 4 vezes nas páginas 12, 13, 14 e 16.
- THE ATLANTIC. *What Makes an Electric Guitar Sound Like an Electric Guitar*. 2015. Disponível em: <<https://www.theatlantic.com/technology/archive/2015/03/what-makes-an-electric-guitar-sound-like-an-electric-guitar/386441/>>. Acesso em: 30 Nov. 2019. Citado na página 10.
- UNIVERSITY OF TORONTO. *Audio Controller*. 2007. Disponível em: <http://www.eecg.toronto.edu/~jayar/ece241_08F/AudioVideoCores/audio/audio.html>. Acesso em: 30 Nov. 2019. Citado na página 18.
- ZOLZER, U. *DAFX: Digital Audio Effects*. [S.l.]: John Willey & Sons, Ltd, 2011. ISBN 978-0-470-66599-2. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.