

UNITAU

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

TEDDY ISAÍAS GUTIERREZ
VINÍCIUS SANTOS TOLOSA

DIGITALIZAÇÃO DE SINAIS SONOROS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE
MICROPROCESSADORES

Taubaté, SP
2018

TEDDY ISAÍAS GUTIERREZ
VINÍCIUS SANTOS TOLOSA

DIGITALIZAÇÃO DE SINAIS SONOROS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE
MICROPROCESSADORES

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica.

Orientador (a): Seide da Cunha Filho

Taubaté, SP
2018

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

T653d	<p>Tolosa, Vinicius Santos</p> <p>Digitalização de sinais sonoros por meio da utilização de microprocessadores. / Vinicius Santos Tolosa, Teddy Isaias Gutierrez. - 2018.</p> <p>67f. : il; 30 cm.</p> <p>Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica) – Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018</p> <p>Orientador: Prof. Me. Seide da Cunha Filho, Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica.</p> <p>1. Microprocessador. 2. Conversão analógico digital. 3. Amplificador operacional. 4. Arduino I. Título.</p>
-------	--

DIGITALIZAÇÃO DE SINAIS SONOROS POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DE PLACAS
DE MICROPROCESSADORES

TEDDY ISAÍAS GUTIERREZ
VINÍCIUS SANTOS TOLOSA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA”.

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

Prof. Dr. Mauro Pedro Peres
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Seide da Cunha Filho - DEE
Orientador

Prof. Rubens Castilho Júnior - DEE
Avaliador

Prof. Me. Marcelo Pinheiro Werneck – DEE
Avaliador

Junho de 2018



Universidade de Taubaté
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Reconhecida e Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

UNITAU

APÊNDICE 4

AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO – BANCA EXAMINADORA

Aluno(s)	RA
Aluno 1: <i>Teddy Isaias Gutierrez</i> Aluno 2: <i>Vinicius Santos Tolosa</i>	

Título do Trabalho
<i>Digitalização de sinais sonoros por meio da utilização de microprocessadores</i>

Professor Orientador	Data da Apresentação
<i>Seide da Cunha Filho</i>	<i>21/6/2018</i>

Banca Examinadora (nome)	Assinatura	Nota
Orientador (N1) <i>Prof. Seide</i>	<i>Seide</i>	10,0
Examinador 2 (N2) <i>Prof. Marcelo Pinheiro Werneck</i>	<i>Marcelo Werneck</i>	10,0
Examinador 3 (N3) <i>Prof. Rubens Castilho Jr.</i>	<i>Rubens Castilho Jr.</i>	10,0
MB = (N1+N2+N3)/3		10,0

Exigências da Banca Examinadora

Aprovado

Reprovado

Autorizo a publicação do trabalho na Biblioteca	
_____	_____ <i>Seide</i>
Assinatura do Aluno	Assinatura do Orientador

Homologação do Coordenador	
_____	_____
Data da entrega	Assinatura do Coordenador

DEDICATÓRIAS

A Deus, porque tem me dado o fôlego da vida, à minha esposa Patricia Ferreira Gutierrez e à minha mãe Mirian Gonçalves Gutierrez, pois sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me e incentivando-me.

Teddy Isaías dos Santos Gutierrez

Á minha esposa Helena Carpinetti Tolosa e filha Juliana Carpinetti Tolosa, as quais, apesar das dificuldades enfrentadas, sempre estiveram ao meu lado e me incentivaram em meu caminho.

Vinicius Santos Tolosa

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pois reconheço que sem Ele nada é possível na minha vida, agradeço a todos os professores que no decorrer desta caminhada, me proporcionaram através dos estudos novas perspectivas e novos objetivos.

Teddy Isaías Gutierrez

Ao meu orientador, Prof. Seide da Cunha Filho, que jamais deixou de me incentivar. Aos queridos professores que iniciaram esta jornada Armando Antônio Monteiro de Castro, Marco Richetto, Jose Valentino Volpato, e aos que me acompanham na chegada do caminho , Luiz Octávio Mattos dos Reis, Eder Salim Minhoto e Rubens Castilho Júnior, que de várias formas me incentivaram e fizeram a minha permanência na universidade uma realidade.

Vinicius Santos Tolosa

“A marca de sua ignorância é a profundidade da sua crença na injustiça e na tragédia. O que a lagarta chama de fim de mundo, o mestre chama de borboleta.”

Ricard Bach

RESUMO

Neste trabalho propõe-se o estudo e análise de um circuito de digitalização e reconstrução de sinais visando à produção de um dispositivo capaz de modificar o timbre e o formato de ondas sonoras de instrumentos musicais para a produção artística de músicos e instrumentistas. Ressalta-se no processo o uso de um microprocessador em plataforma prototipada arduino e um circuito amplificador baseado em amplificadores operacionais. A conversão de sinais com a transformação de ondas analógicas em valores digitais é uma parte importantíssima do tratamento de sinais e que engloba grande parte das técnicas de comunicação modernas. Tem-se como objetivo adquirir conhecimentos que promovam a transformação e o tratamento de sinais, bem como a programação de plataformas microprocessadas, com fins de produção em escala de distorcedores modificadores de sons para o mercado.

PALAVRAS CHAVE: Microprocessador, conversão analógico digital, amplificador Operacional

ABSTRACT

In this work we propose the study and analysis of a circuit of digitalization and reconstruction of signals aiming at the production of a device capable of modifying the timbre and the format of sound waves of musical instruments for the artistic production of musicians and instrumentalists. It is highlighted in the process the use of a microprocessor in arduino prototyped platform and an amplifier circuit based on operational amplifiers. Signal conversion with the conversion of analogue waves into digital values is a very important part of signal processing and encompasses much modern communication techniques. The objective is to acquire knowledge that promotes the transformation and the treatment of signals, as well as the programming of microprocessed platforms, for the purpose of scale production of sound-distorting distorters for the market.

KEYWORDS: Microprocessor, analogue digital conversion, Operational amplifier

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da reflexão das ondas sonoras: eco	13
Figura 2 - Reverberação do som	14
Figura 3 - Câmara de eco eletrônica	14
Figura 4 - Fluxograma do processo de sintetização do efeito sonoro	16
Figura 5 – Representação da guitarra elétrica	18
Figura 6 – Captador de guitarra	19
Figura 7 - Estágios do processamento de sinais	20
Figura 8 - Circuito RC para filtros passa baixa	21
Figura 9 - Resposta do sinal aplicado na entrada do Circuito RC	21
Figura 10 Filtros de passa alta	22
Figura 11 Resposta do sinal aplicado na entrada do circuito passa alta	23
Figura 12 Amplificador operacional	24
Figura 13 Relação entrada e saída do amplificador operacional	24
Figura 14 Amplificador operacional sem realimentação	26
Figura 15 Amplificador operacional com realimentação positiva	26
Figura 16 Amplificador operacional com realimentação negativa	27
Figura 17 Faixa de frequência de operação de instrumentos	28
Figura 18 Amplificador operacional com capacitor de acoplamento	29
Figura 19 Resistores de alta impedância e acoplamento CA	30
Figura 20 Plotagem das faixas de frequência curva de bode	30
Figura 21 Filtro de entrada semi ciclo positivo	31
Figura 22 Diodo de proteção de sobre tensão de semi ciclo	33
Figura 23 Tensão sobre o diodo D2	33
Figura 24 Amplificador operacional inversor	34
Figura 25 Onda seno e cosseno no domínio do tempo	35
Figura 26 Representação da senoide e suas propriedades	36
Figura 27 $\theta = 0^\circ$ ambos estão em fase	37
Figura 28 $\theta = +90^\circ$ adiantado	37
Figura 29 $\theta = -90^\circ$ atrasado	38
Figura 30 Plotagem do resultado dos sinais quantizados no tempo discreto	39
Figura 31 Função exponencial no tempo discreto	39

Figura 32 ADVREF do controlador	41
Figura 33 Diagrama Conversor AD Atmel SAM3X8E	42
Figura 34 Entrada de cristal oscilador	43
Figura 35 Opções de Prescaler	45
Figura 36 Controlador de máster clock	46
Figura 37 Resolução e erro amostrado	48
Figura 38 Conversor de Rampa	50
Figura 39 Resolução de conversão AD	50
Figura 40 Conversor Pipeline	51
Figura 41 Início do ciclo de conversão AD do controlador	52
Figura 42 Conversor digital analógico	53
Figura 43 Conversor DA tipo escada R-2R	53
Figura 44 Simplificação de resistores R-2R	54
Figura 45 Microcontrolador SAM3x8E	55
Figura 46 Sinal de saída do transistor sem saturação	56
Figura 47 Sinal de saída do transistor sem saturação	56
Figura 48 Forma de onda FUZZ após diodos ceifadores	57
Figura 49 Propagação das ondas sonoras	58
Figura 50 Emissão de ondas sonoras com múltiplas reflexões	59
Figura 51 Efeito do delay	59
Figura 52 Ciclo do efeito delay	60

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO	16
3.	ELEMENTOS A SEREM UTILIZADOS NO PROCESSO DE SINTETIZAÇÃO	17
3.1	GUITARRA ELÉTRICA	17
3.2	PARTES DE UMA GUITARRA ELÉTRICA	19
3.2.1	Captadores	19
4.	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS	20
4.1	ESTÁGIOS DE UM SISTEMA DSP	20
4.1.2	Filtros de passa baixa	21
4.1.3	Filtros de passa alta	22
5	AMPLIFICADORES OPERACIONAIS	24
5.1	VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL	24
5.2	MODOS DE OPERAÇÃO DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL	25
5.2.1	Modo de operação do amplificador operacional sem realimentação	25
5.2.2	Modo de Operação do Amplificador com realimentação positiva	26
5.2.3	Modo de Operação do Amplificador com realimentação negativa	27
6	PROCESSO DE FILTRAGEM	28
7	ACOPLAMENTO DO SINAL DE ENTRADA	29
8	LIMITADOR DE SEMI CICLO	33
9	TENSÃO SENOIDAL NO TEMPO CONTÍNUO	35
10	SINAL SENOIDAL NO TEMPO DISCRETO	39
11	TAXA DE AMOSTRAGEM	40
12	RESOLUÇÃO DE CONVERSÃO	41
13	CRISTAL DE QUARTZO	43
14	TEMPO DE INICIALIZAÇÃO CONVERSOR AD	44
14.1	MODOS DE CONVERSÃO AD	44
14.2	FREQUÊNCIA DE CONVERSÃO AD	45
14.3	ERROS DE CONVERSÃO	47
14.4	TEOREMA DE NYQUIST	48
14.5	CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL	49
14.6	CONVERSOR RAMPA	49

14.7 - CONVERSOR PIPELINE	51
14.8 CONVERSOR DIGITAL ANALÓGICO	52
14.9 CONVERSOR D/A DE RESISTORES COM PESOS PONDERADOS	53
14.10 CONVERSOR D/A TIPO ESCADA R-2R	53
14.11 MICROCONTROLADORES	54
14.11.1 Arquitetura RISC	55
15 EFEITO DISTORÇÃO FUZZ	56
16 O ECO E SEUS EFEITOS	58
17 METODOLOGIA	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO 1	64
ANEXO 2	65

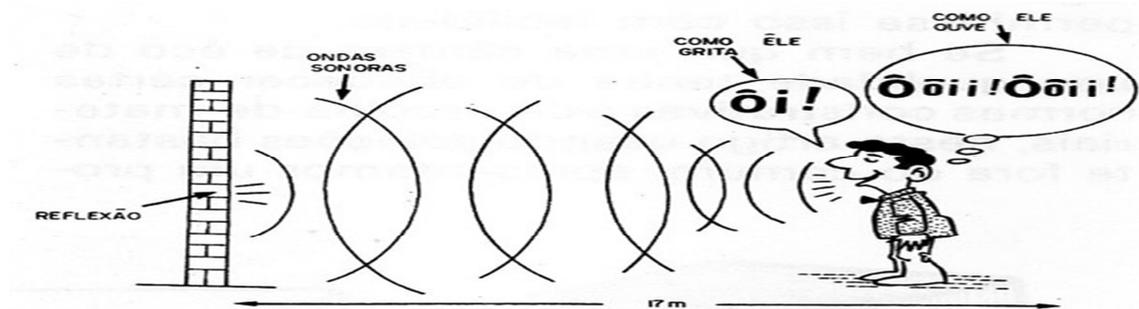
1. INTRODUÇÃO

A música sempre foi uma das expressões do ser humano mais presentes em toda sua história. Desde a antiguidade o homem procurava reproduzir os sons da natureza, imitando os animais, usando seu próprio corpo com pedras ossos ou madeira. Com o desenvolvimento de suas funções cognitivas, o homem passou a dar outros sentidos a essa forma de comunicação, agregando altura, intensidade e timbre, passando então a criar música.

No século XX o desenvolvimento da eletrônica permitiu amplificar o som dos instrumentos existentes e gravá-los para posterior reprodução. Essa evolução dos equipamentos somada à criatividade humana permitiu aos artistas descobrirem que poderia ser interessante, não só a amplificação do som, mas também sua modificação, por meio de circuitos eletrônicos. Foi dado um grande impulso na produção de música com o surgimento do gênero “Rock and Roll”, gênero que impulsionava a juventude em suas idéias criativas.

No início observou-se que ao excitar um amplificador era produzido um som distorcido, o qual a criatividade do artista conseguia transformar no que chamamos melodia, surgiam aí os primeiros “distorcedores”, ou seja, aparelhos eletrônicos que modificavam a forma de onda do instrumento e entregavam um som considerado mais ríspido aos ouvidos. Surgiram também outros efeitos sonoros, como o eco, que é originado da reflexão das ondas sobre as superfícies, conforme representado na figura 1.

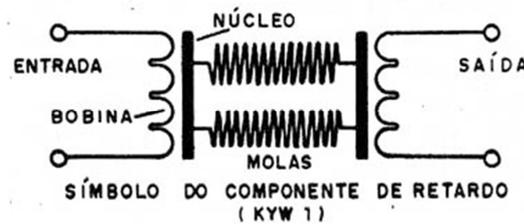
Figura 1 – Representação da reflexão das ondas sonoras: eco



Fonte: <https://newtoncbraga.com.br/index.php/eletronica/52-artigos-diversos/11858-unidade-de-eco-e-reverberacao-art2761:2015> 13/05/2018.

Esse efeito era produzido pela propagação de som por meio de molas. Na figura 2 mostra-se um componente responsável pela reverberação. Havia um pequeno transdutor que induzia pelas molas a vibração do som e outro que capturava essa vibração para amplificá-lo.

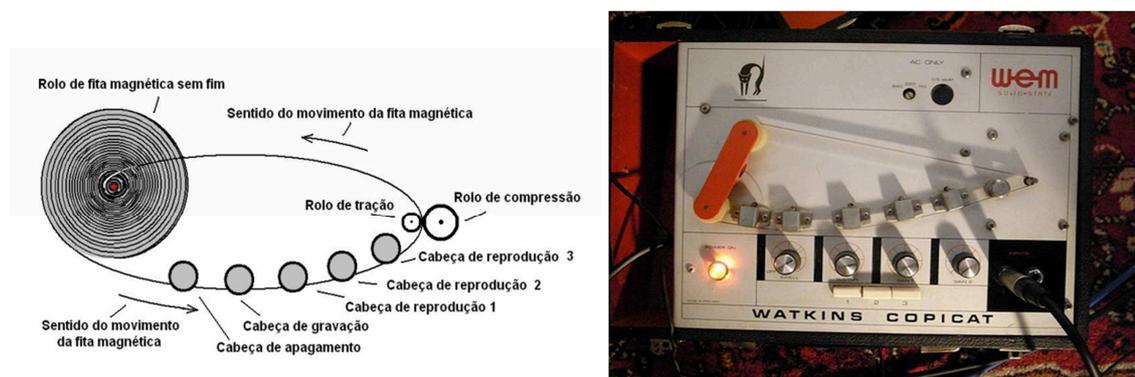
Figura 2 – Reverberação do som



Fonte: <https://newtoncbraga.com.br/index.php/electronica/52-artigos-diversos/11858-unidade-de-eco-e-reverberacao-art2761>

Com o desenvolvimento da eletrônica no início da década de 70 começaram a surgir as primeiras câmaras de eco eletrônicas, que, baseadas em propriedades magnéticas de gravação produziam o eco por meio de uma fita sem fim, o que dava ao efeito maior perfeição devido à eletrônica envolvida, conforme demonstrado na figura 3.

Figura 3 – Câmara de eco eletrônica



Fonte: <http://www.novacon.com.br/audioreverb.htm> 20:22 13/05/2018

Outro efeito muito usado pelos músicos é o chamado oitavador, o qual faz com que o som apareça na saída do amplificador com duas vezes a sua frequência fundamental, basicamente, no início, esse efeito era produzido pela retificação do sinal de áudio sobrepondo as fases negativas e positivas em um mesmo quadrante.

Com o advento da eletrônica, esses efeitos passaram a ser produzidos por circuitos dedicados que, em seu interior possuíam memórias que possibilitavam armazenar o som, modificá-lo e reproduzi-lo totalmente de forma eletrônica.

Com o advento dos microcomputadores e microprocessadores os efeitos de áudio passaram a ser controlados e modificados por circuitos computacionais, que capturam e transformam a forma de onda analógica, digitalizam-na e utilizando fórmulas matemáticas recriam essa onda com o efeito sonoro desejado. A criação de efeitos sonoros artificiais é construída a partir de fórmulas que defasam o sinal, modificam sua amplitude e sua frequência.

A esse tipo de trabalho dos sinais damos o nome de processamento digital de sinais, vulgo DSP.

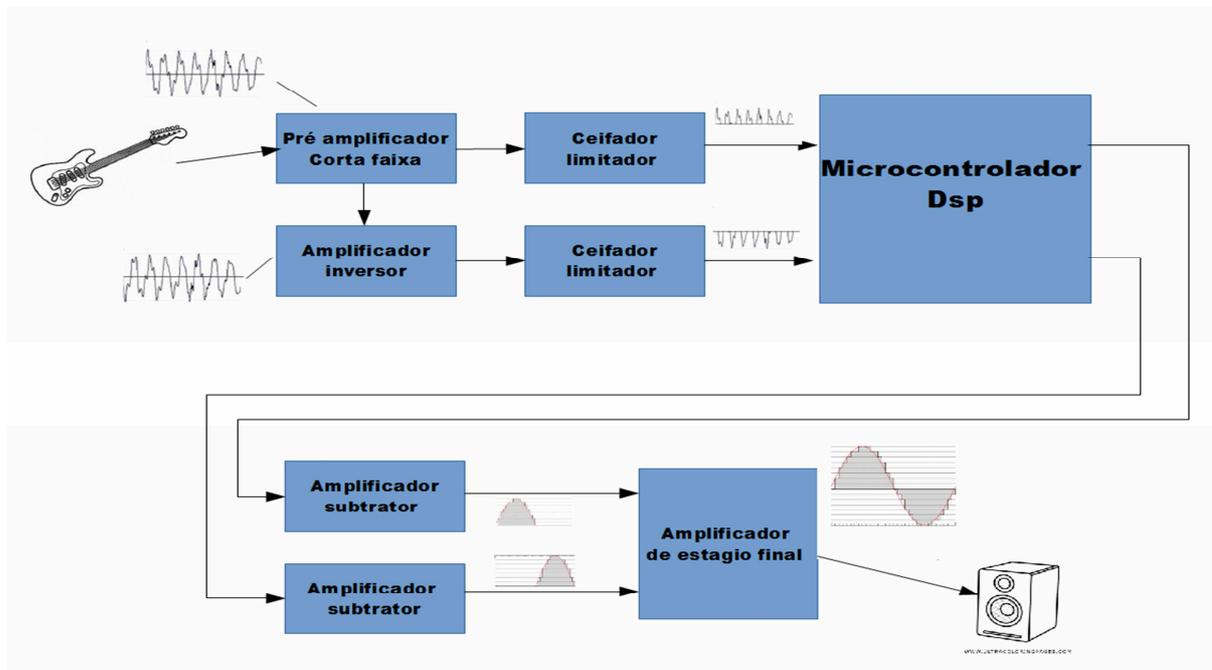
O processamento de sinais nos remete ao início da era digital, onde todos os sinais eram gravados e equalizados para serem transmitidos por rádio e televisão. Com o avanço da tecnologia, surgiram muitas outras áreas de processamento de sinais, uma dentre elas, a área de efeitos de áudio e de equalização.

O DSP (Digital Signal Processor) geralmente é feito por um circuito de microprocessador dedicado, com funções específicas para o processamento de sinais, assim como, mais memória e maior capacidade matemática de processamento.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo de caso e a demonstração do funcionamento de pedais de efeitos de guitarra micro processados, de eco e distorcedor, que recriam fielmente os efeitos sonoros físicos. Este projeto será estudado partir de conceitos já definidos e será construído um protótipo para fins de testes, no qual será implementada uma linguagem de programação em alto nível para manipular variáveis determinantes que constituirão a sintetização do efeito sonoro. Na figura 4 está demonstrado um fluxograma desse sistema.

Figura 4 – Fluxograma do processo de sintetização do efeito sonoro



Fonte: autor

3 – ELEMENTOS A SEREM UTILIZADOS NO PROCESSO DE SINTETIZAÇÃO

3.1 GUITARRA ELÉTRICA

A guitarra elétrica, também conhecida como guitarra, é um instrumento musical que pertence à família dos instrumentos de cordas. O som do instrumento pode ser amplificado por circuitos eletrônicos. O som produzido pela guitarra é proveniente da captação da vibração das cordas pelos captadores que transformam os campos eletromagnéticos produzidos pelas cordas em tensões elétricas. Estes sinais captados podem ser enviados diretamente ao amplificador, podem ser pré-amplificados ou, até mesmo modificados para a criação de novos efeitos sonoros.

Cada guitarra possui um timbre característico determinado por alguns fatores construtivos, dentre estes fatores podemos destacar os principais:

- Tipos de captadores e qualidade dos captadores
- Qualidade das cordas, o diâmetro e tempo de uso das cordas
- Os diversos tipos de madeiras que constituem o instrumento

Outros fatores externos que influenciam no timbre da guitarra podem ser definidos por:

- Qualidade do cabo que interliga a guitarra ao amplificador
- Qualidade do amplificador que será ligado a guitarra
- Qualidade e técnicas aplicadas pelo músico

Dentre as madeiras mais usadas na construção da guitarra estão:

- Maple
- Rosewood
- Mogno
- Ébano
- Alder
- Ash

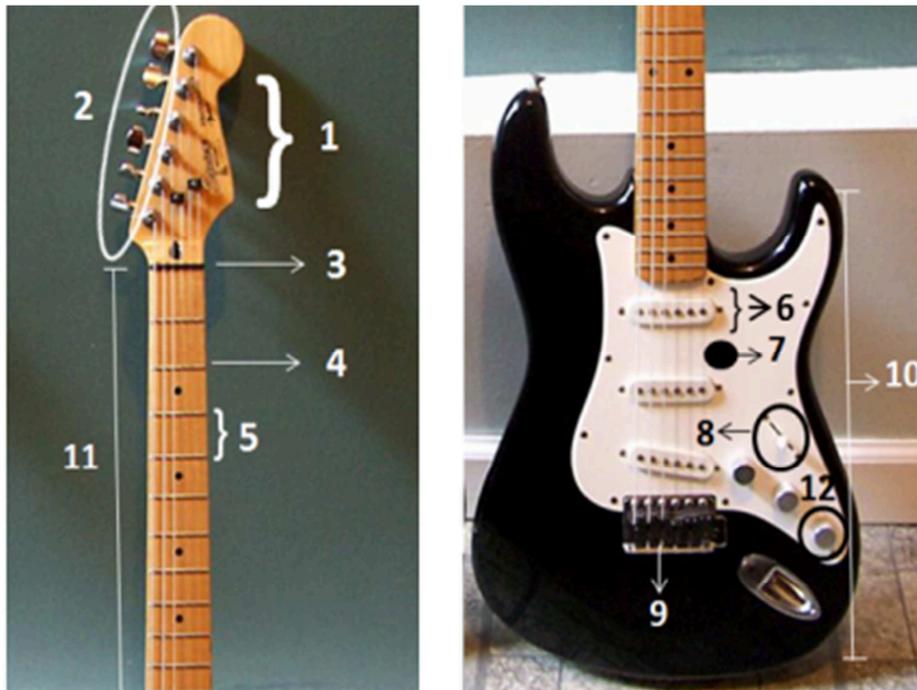
O braço da guitarra elétrica é uma de suas partes mais importantes, determinando a qualidade do instrumento, por ser a parte que sofre maior tensão devido à solicitação feita pela extensão das cordas.

O braço da guitarra geralmente é feito de madeira tipo Maple e as escalas feitas em rosewood.

A guitarra elétrica, demonstrada na figura 5, é constituída por:

1. Mão ou cabeça
2. Tarraxas
3. Pestana
4. Traste
5. Casa
6. Captador
7. Escudo
8. Chave seletora de captadores
9. Ponte
10. Corpo
11. Braço
12. Potenciômetros

Figura 5 – Representação da guitarra elétrica



Fonte:autor

3.2 PARTES DE UMA GUITARRA ELÉTRICA

3.2.1 Captadores

Os captadores são constituídos por um ímã envolvido por um indutor de cobre com centenas de voltas e ficam bem próximos às cordas metálicas para fazer a captação da vibração das cordas. Eles têm como função alterar o campo eletromagnético que foi criado pelo ímã, quando a corda vibra cria uma pequena diferença de potencial entre os polos do indutor que gera o sinal de entrada do circuito de amplificação.

A amplitude das tensões que os captadores podem gerar está em torno de 100 mil volts a 1 volt, isso pode variar em razão do tipo do captador, se o mesmo for ativo ou passivo,

Figura 6 – Captador de guitarra



Fonte: <https://www.4garage.com.br/captador-humbucker--guitarra-sergio-rosar-rock-king-ponte-preto>

Dentre as propriedades dos captadores temos:

- Resistência elétrica
- Frequência de ressonância
- Capacitância elétrica
- Indutância elétrica
- Fator de qualidade (Q)

4. PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS

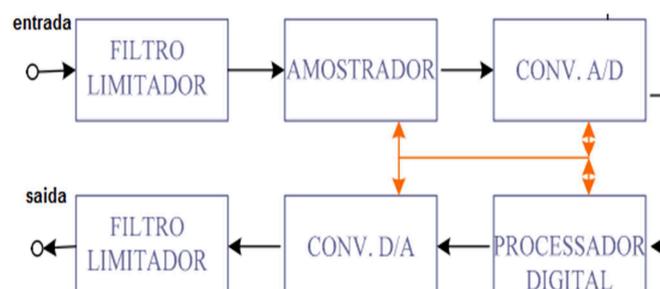
Todos os sistemas ou processos de sinais existentes antigamente eram da natureza analógica, sendo os processos de filtragem realizados com capacitores, resistores, indutores e amplificadores operacionais, conversões de sinais e as operações matemáticas das quais não havia nenhum tipo de processo digital de sinais. Os DSP (Digital Signal Processor) são microprocessadores com várias instruções especializados em processamento digital de sinais utilizados para efetuar o processamento de sinais de áudio, vídeo entre outros, em tempo real ou não. Uma das características do processador digital de sinais é a capacidade de processamento de sinais em alta velocidade comparado a outros microprocessadores. Cada sistema de processamento dos sinais é classificado por seus elementos de estágios.

4.1- ESTÁGIOS DE UM SISTEMA DSP

A arquitetura de um sistema genérico de processamento digital de sinais é constituída dos seguintes elementos.

- Sinal analógico de entrada: sinais elétricos como corrente elétrica ou tensão;
- Pré-Processamento de um sinal analógico de entrada;
- Filtros de frequência: podem ser classificados como passa baixa, passa alta ou passa faixa;
- Amostragem e Retenção: tem por função capturar todo ou parte do sinal de entrada analógico selecionado a partir de um espaço x tempo e manter esta informação fixa durante um período de tempo pré-determinado. Este processo é feito para que a amostra seja processada. Na figura 7 demonstram-se as várias etapas de um DSP.

Figura 7 - Estágios do processamento de sinais

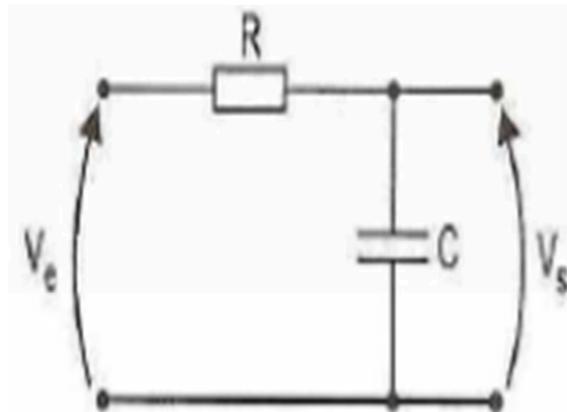


Fonte: autor

4.1.2 Filtros de passa baixa

O filtro passa baixa que será demonstrado define-se pelo circuito RC, resistor e capacitor.

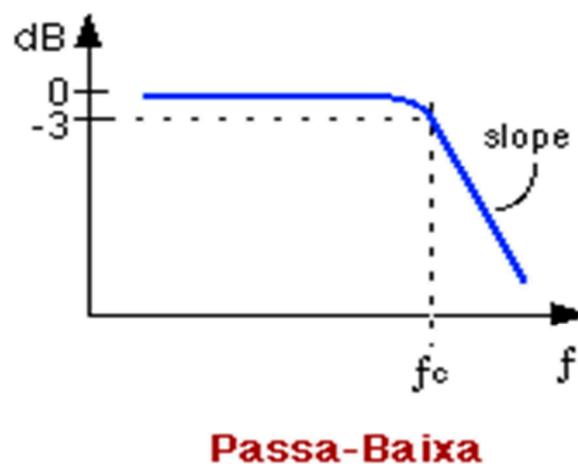
Figura 8 – Circuito RC para filtros passa baixa



Fonte: autor

Neste circuito, quando há ondas senoidais de propriedades de baixa frequência, a reatância do capacitor possui valores mais elevados em relação à impedância da resistência, de tal modo que, quando verificada a tensão na saída, pode-se observar que a mesma possui tensão praticamente igual à tensão senoidal que foi aplicada na entrada do circuito.

Figura 9 - Resposta do sinal aplicado na entrada do Circuito RC



Fonte: autor

Quando são aplicados na entrada do circuito, sinais senoidais de altas frequências, a reatância capacitiva começa a adquirir valores baixos quando comparados à impedância do resistor, isso faz com que seja atenuada a tensão de saída do circuito para tensões próximas de zero. Deste modo verificamos que o filtro permite somente a passagem de baixas frequências, por isso damos o nome de filtros passa baixa para este circuito

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * C}$$

(1)

Onde:

X_C = Reatância capacitiva

f = frequência do sistema

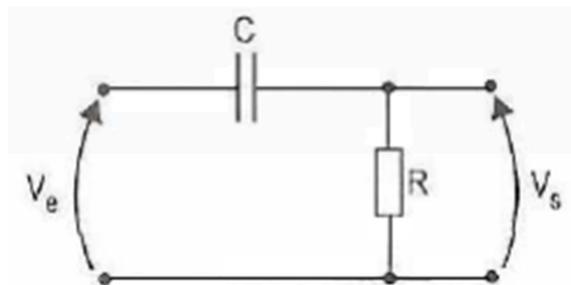
π = 3.1415926

C = valor da capacitância

4.1.3 – Filtros de passa alta

Os filtros de passa alta são constituídos pelo circuito RC em série, resistor e capacitor. Como mostra a figura 10 a tensão de saída do circuito é obtida a partir do resistor.

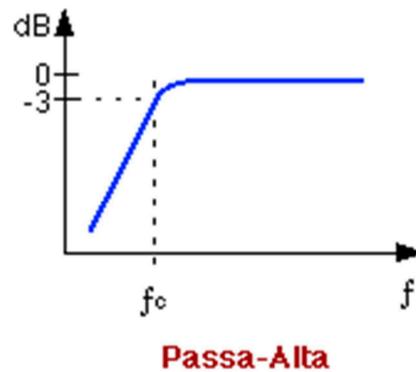
Figura 10 – Filtros de passa alta



Fonte: autor

Ao observar o princípio de funcionamento do circuito passa alta, verifica-se que neste circuito, quando há ondas senoidais de altas frequências na entrada do circuito, a reatância do capacitor atinge valores mais baixos em relação à resistência, de tal modo que, quando verificada a tensão na saída, pode-se observar tensão praticamente igual à tensão senoidal que foi aplicado na entrada do circuito.

Figura 11 – Resposta do sinal aplicado na entrada do circuito passa alta



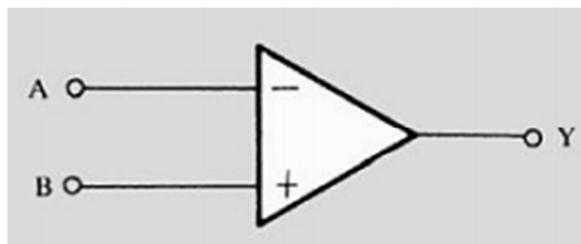
Fonte: autor

Quando aplicada na entrada do circuito sinais senoidais de baixas frequências na entrada do circuito, a reatância capacitiva passa a ter valores altos em comparação ao resistor, provocando tensão de saída do circuito para tensões próximas a zero. Deste modo verificamos que o filtro permite somente a passagem de altas frequências, por isso denominamos o circuito como filtros de passa alta.

5 - AMPLIFICADORES OPERACIONAIS

O amplificador operacional é um circuito integrado, cuja estrutura física é formada por vários componentes passivos e ativos, assim como suas características de funcionamento e aplicações. O amplificador operacional possui ganho elevado em relação à sua entrada, é um dispositivo que possui duas entradas e uma saída, como mostra a figura 12.

Figura 12 – Amplificador operacional



Fonte: autor

Na figura 12, temos:

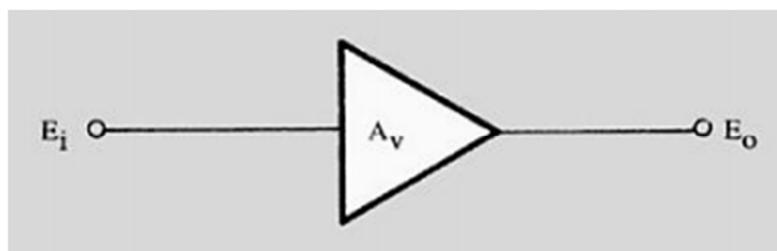
- A entrada A é uma entrada inversora
- A entrada B é uma entrada não inversora

A tensão de saída do circuito é o resultado da diferença de tensão aplicada nas portas de entradas, inversora e não inversora, sendo multiplicado pelo ganho (A_V)

5.1 – VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

O ganho do amplificador operacional é dado pela razão da saída pela razão de entrada do circuito como mostra a imagem da figura 13.

Figura 13 - Relação entrada e saída do amplificador operacional



Fonte: autor

$$AV = \frac{Eo}{Ei} \quad (2)$$

Onde:

Ei é o sinal de entrada no amplificador operacional

Eo o sinal de saída no amplificador operacional

Em decibéis podemos expressar esta função como:

$$AV[db] = 20 \log \frac{Eo}{Ei} \quad (3)$$

5.2 - MODOS DE OPERAÇÃO DO AMPLIFICADOR OPERACIONAL

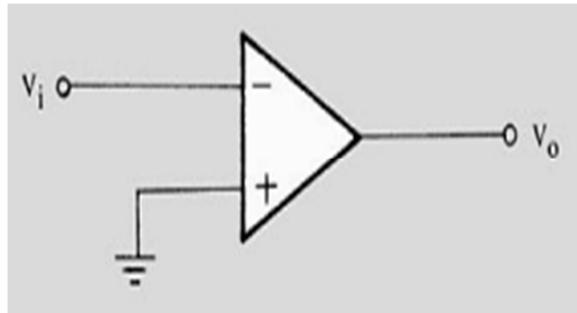
Os modos de operação do amplificador operacional podem ser classificados de três tipos:

1. Sem realimentação
2. Com realimentação positiva
3. Com realimentação negativa

5.2.1 – Modo de operação do amplificador operacional sem realimentação

Este modo também é conhecido como amplificador com malha aberta, o ganho do amplificador operacional será então estipulado por seu fabricante, de modo que não há controle sobre o ganho do amplificador operacional. Este modo de operação pode ser utilizado em circuitos comparadores. Na figura 14 pode-se observar um amplificador operacional de malha aberta.

Figura 14 – Amplificador operacional sem realimentação

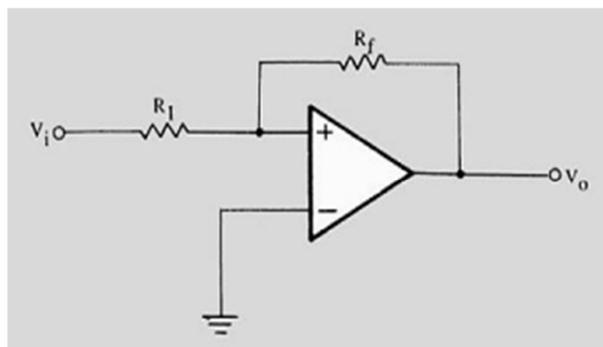


Fonte: autor

5.2.2 – Modo de Operação do Amplificador com realimentação positiva

Este modo também é conhecido como amplificador com malha fechada. O mesmo apresenta um fator inconveniente que é levar o circuito à instabilidade.. A figura 15 mostra um amplificador operacional com sua realimentação positiva.

Figura 15 - Amplificador operacional com realimentação positiva



Fonte: autor

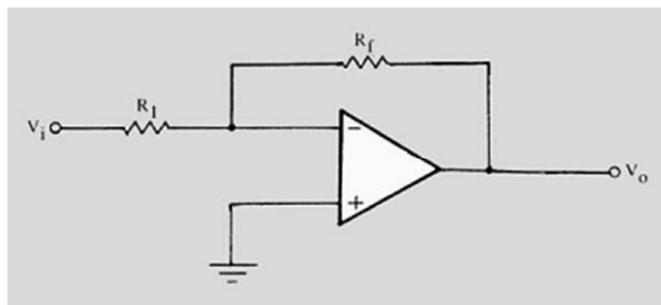
Analisando-se a figura 15, pode-se observar que o amplificador operacional está sendo realimentado pela porta não inversora, por meio do resistor de realimentação R_f . Neste modo de operação do amplificador operacional, o mesmo não funciona como amplificador, pois a resposta do circuito não é linear.

5.2.3 Modo de Operação do Amplificador com realimentação negativa

Este modo de operação dentre os demais modos é o mais importante nos circuitos com amplificadores operacionais. Nele, a saída é replicada na entrada inversora do amplificador operacional por meio do resistor R_f . São inúmeras as aplicações dos amplificadores operacionais sendo:

- Seguidor de tensão (buffer)
- Somador
- Amplificador não inversor
- Amplificador inversor
- Amplificador diferenciador
- Amplificador integrador
- Filtros ativos, dentre outros

Figura 16 - Amplificador operacional com realimentação negativa



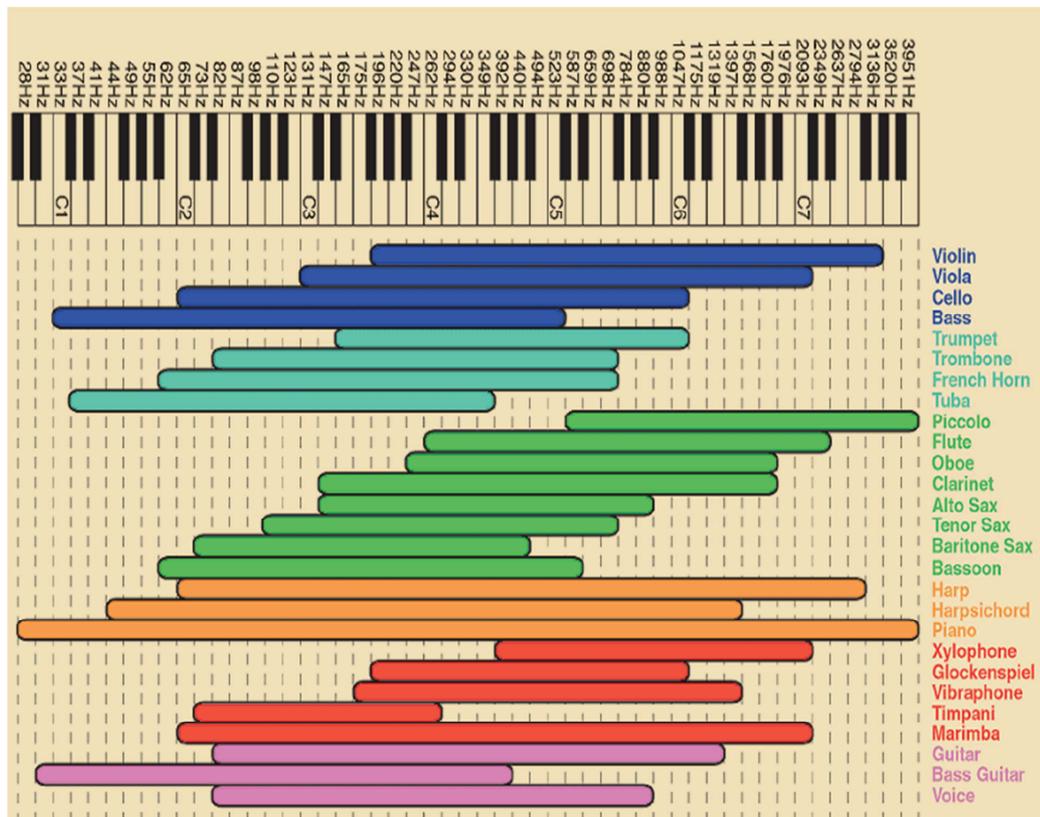
Fonte: autor

Diferente do modo de operação do amplificador exemplificado na figura 16, este modo de operação também é em malha fecha, mas este possui resposta linear e também seu ganho de tensão em malha fechada pode ser controlado pelo projetista.

6 - PROCESSO DE FILTRAGEM

Para que seja determinada a faixa de frequência passante ou a faixa de frequência a ser atenuada no primeiro estágio do processo de filtragem é preciso que se saiba qual é a frequência de operação de uma guitarra elétrica, possibilitando o cálculo do range de frequências de operação do circuito. A guitarra trabalha em uma faixa de frequência de 82hz a 1319hz como mostra a figura 17.

Figura 17 - Faixa de frequência de operação de instrumentos



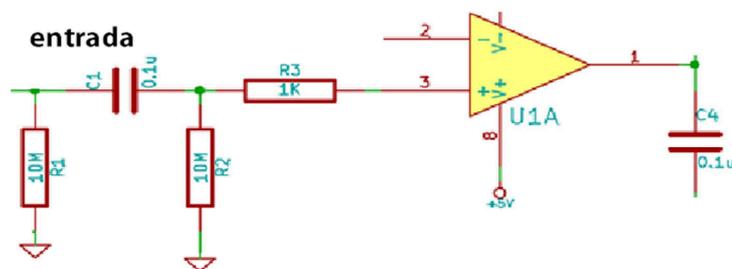
Fonte: <http://obiaudio.com/eq-chart/> 20:25 15/05/2018

Também se faz necessário saber qual a amplitude do sinal senoidal que o captador da guitarra elétrica disponibiliza para se possa sensibilizar o sinal de entrada do circuito de amplificação na sua entrada.

7 - ACOPLAMENTO DO SINAL DE ENTRADA

Neste projeto é necessário bloquear toda tensão DC na entrada do amplificador operacional e permitir a passagem somente das componentes de corrente alternada que passamos então a chamar de amplificador CA (corrente alternada), para isso, basta acrescentar capacitores na entrada e na saída do amplificador operacional para que seja permitida apenas a passagem do sinal senoidal, pois quando aplicada corrente contínua em um capacitor, o mesmo se comporta como um circuito aberto. Na figura 18 o projeto mostra os capacitores de acoplamento e desacoplamento do próximo estágio de amplificação.

Figura 18 - Amplificador operacional com capacitor de acoplamento



Fonte: autor

É conveniente que seja projetado o circuito de tal modo que os capacitores de entrada e saída do amplificador operacional não apresentem reatâncias suficientes à passagem do sinal de entrada CA. Sendo assim, costuma-se adotar como regra um valor para R1 que seja 10 vezes maior do que Xc1 de tal modo que:

$$R1 > \frac{10}{(2\pi f c)} \quad (4)$$

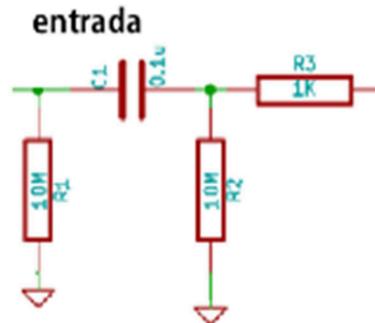
Onde:

f é a frequência do sinal aplicado na entrada.

Um bom valor prático para C1 que pode ser adotado é entre 0,1uF e 1uF, da mesma maneira, se uma carga for ligada na saída do amplificador operacional, o mesmo pode ser calculado da mesma forma que o resistor e capacitor de entrada.

Após o acoplamento do sinal de CA existe resistor R2 e R3 na entrada do circuito utilizado para deixar a entrada do circuito em alta impedância.

Figura 19 - Resistores de alta impedância e acoplamento CA

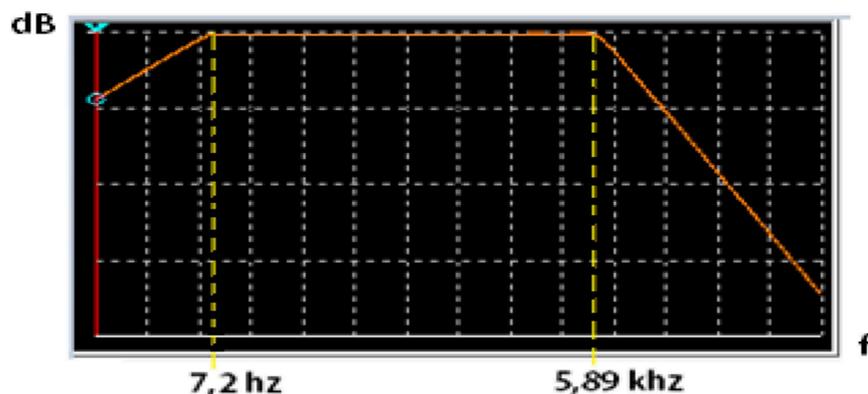


Fonte: autor

O amplificador de estágio de entrada está sendo utilizado como amplificador não inversor, para gerar referência de sinal de entrada do semi-ciclo positivo para o conversor analógico – digital do controlador. Também existe um circuito capaz atenuar as frequências de ruídos indesejáveis na entrada do circuito antes do processamento do sinal, para isso são inseridos na realimentação do amplificador operacional 2 resistores e 2 capacitores, que farão a seleção da frequência necessária e a filtragem da frequência indesejada.

São necessários filtros de frequências de ruídos indesejáveis projetados na entrada do amplificador operacional para que os ruídos não sejam amplificados, pois podem comprometer o desempenho do amplificador operacional. Existem na rede elétrica várias cargas e até mesmo fontes de alimentação que são capazes de gerar harmônicos, fazendo com que essas frequências atrapalhem o sinal de saída do circuito. Os filtros também são usados para que o sinal de amostragem e retenção tenha êxito em sua função no processo de conversão analógico para digital. Na figura 20 está sendo representado o gráfico de bode com as frequências de ruído atenuadas pelos filtros.

Figura 20 - Plotagem das faixas de frequência curva de bode



Fonte: autor

A equação de corte das baixas frequências do primeiro estágio de filtragem é dada pela equação:

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R1 * C1} \quad (5)$$

Onde :

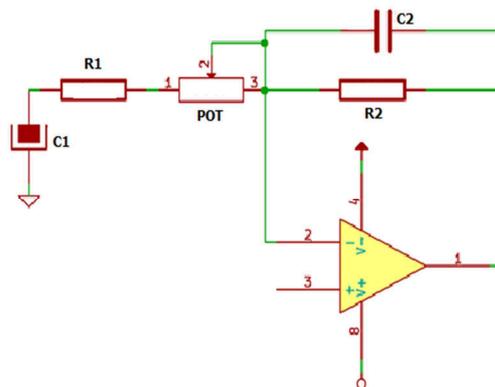
f_c = frequência de corte de baixas frequências

A equação de corte das altas frequências do segundo estágio de filtragem é dada pela equação:

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R2 * C2} \quad (6)$$

O amplificador operacional não inversor demonstrado na figura 21, exemplifica todas as equações citadas acima e sua forma de ligação do circuito.

Figura 21 - Filtro de entrada semi ciclo positivo



Fonte:autor

A equação do fator de amplificação na saída do amplificador operacional em sua forma não inversora com realimentação é dada por:

$$V_o = v_{in} \left(1 + \frac{R_2}{POT} \right)$$

(7)

Onde:

V_o = tensão de saída do amplificador operacional

V_{in} = tensão de entrada do amplificador operacional

R_2 = resistor de realimentação do amplificador operacional

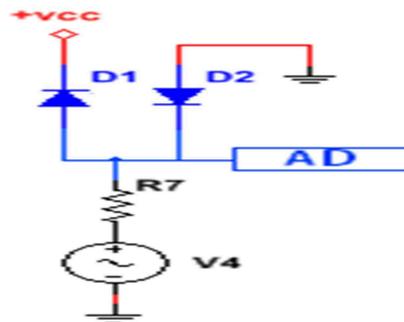
POT = resistor variável a fim de ajustar o ganho do amplificador operacional para o valor desejado na saída.

Nesta forma de realimentação do amplificador operacional o mesmo não apresentará inversão do sinal de saída v_o .

8 - LIMITADOR DE SEMI CICLO

O sinal de amostragem do AD proveniente do amplificador operacional passa por um limitador de tensão para que a porta do controlador que receberá o sinal de semi ciclo positivo não exceda seu valor de tensão máxima, assim evitando a queima da porta do controlador.. Também conta com um segundo diodo que cortará o semi ciclo negativo para que o controlador processe somente o sinal de semi ciclo positivo como mostra a figura 22.

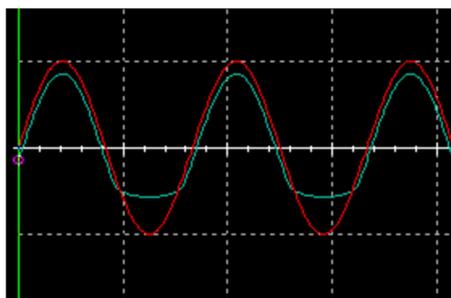
Figura 22 – Diodo de proteção de sobre tensão de semi ciclo



Fonte: autor

Um inconveniente encontrado no circuito, na fase de entrada do sinal no processo de conversão de analógico para digital foi no diodo D2 responsável por cortar o semi ciclo negativo. Por ser de silício, estava deixando passar uma tensão indesejada na entrada do controlador, fazendo com que o semi-ciclo negativo não fosse completamente extinguido e para solucionar esse problema, foi utilizado um diodo de germânio, de tensão de polarização direta de 0.2v.

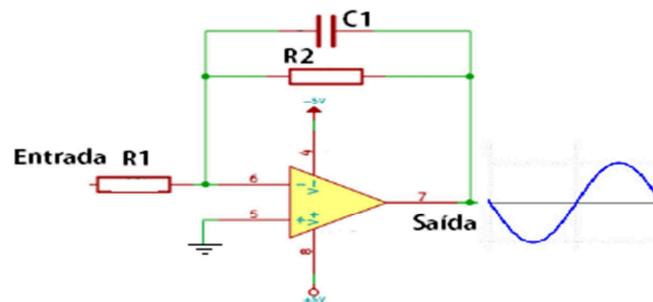
Figura 23 – Tensão sobre o diodo D2



Fonte: autor

Na figura 24, o sinal em vermelho representa a tensão de entrada proveniente da fonte de alimentação e o sinal verde representa o valor recorrente ao diodo de silício, sendo volts de tensão de polarização direta. Para que o controlador tenha maior resolução em taxa de amostragem e melhor qualidade sonora foram utilizados dois amplificadores operacionais, um já apresentado e outro com realimentação negativa, invertendo em 180 graus a fase em relação ao sinal de entrada, isto é, para que se tenha melhor resolução em bits, ou seja, quanto maior a resolução do conversor analógico - digital melhor é a qualidade do sinal de saída, então, duplica-se o sinal de entrada a ser lido, utilizando-se duas portas de conversão analógico – digital.

Figura 24 – Amplificador operacional inversor



Fonte: autor

A equação do fator de amplificação na saída do amplificador operacional em sua forma inversora com realimentação negativa é dada por:

$$V_o = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) * v_{in}$$

(8)

Onde :

V_o = tensão de saída do amplificador operacional

V_{in} = tensão de entrada do amplificador operacional

R_2 = resistor de realimentação do amplificador operacional

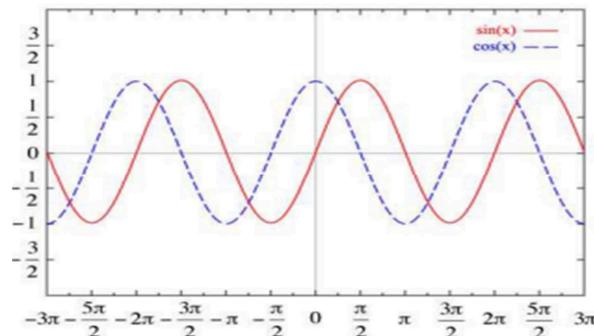
R_1 = Resistor de entrada

Nesta forma de realimentação do amplificador operacional, o mesmo apresentará inversão de 180 graus do sinal de saída em V_o em relação ao sinal de entrada V_{in} como demonstrador na figura 25.

9 - TENSÃO SENOIDAL NO TEMPO CONTÍNUO

Os sinais que são definidos para o instante de tempo, são denominados sinais de tempo contínuo. Um grande exemplo a ser dado é a onda senoidal no domínio do tempo. Para que a onda seja denominada senoidal, deve possuir uma forma característica e sua amplitude deve variar no tempo, de um valor positivo a um valor negativo. A fonte de tensão quando varia no tempo, pode ser representada por um sinal representativo da senoide em função da frequência angular ωt e também pode ser representada em função do tempo (t). A figura 25 exemplifica as formas de onda cosseno e seno.

Figura 25 - Onda seno e cosseno no domínio do tempo



Fonte: autor

Em geral, o sinal senoidal pode ser demonstrado em modo gráfico, por funções matemáticas senoidais, modo analítico, periódico ou em variação no tempo. As expressões para representar os sinais de corrente e tensão senoidal podem ser dadas por:

$$v(\omega t) = V_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_v)$$

$$i(\omega t) = I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \theta_i)$$

(9)

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$ = Tensão elétrica de valor de máxima amplitude ou tensão de pico

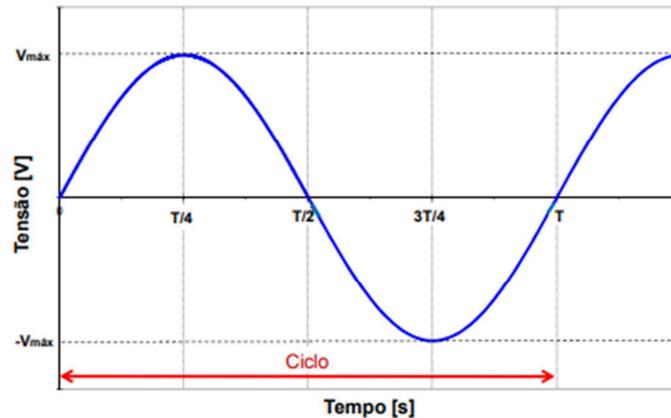
$I_{m\acute{a}x}$ = Valor de corrente elétrica de valor de máxima amplitude ou corrente de pico

ω = Frequência angular elétrica

θ = Ângulo de fase

Na figura 26 apresentam-se graficamente os parâmetros do sinal apresentado:

Figura 26 - Representação da senoide e suas propriedades



Fonte: autor

$V_{m\acute{a}x} = V_p = A$ = valor máximo que o sinal pode alcançar

Esta relação pode ser representada por :

$$V_{m\acute{a}x} = V_{rms} * \sqrt{2} \quad (10)$$

Onde :

V_{rms} = Tensão eficaz

T = período, Quando o sinal apresentado completa um ciclo, este é representado pela letra T e pode ser representado por:

$$T = \frac{1}{f} \quad (11)$$

Onde:

f = frequência do sistema do projeto pode variar de 82hz a 1400hz e também a frequência é o inverso do período e pode ser dado por :

$$f = \frac{1}{T}$$

(12)

Frequência angular = ω [rad/s] = é o tempo de variação do sinal, também pode ser definido como a velocidade com que o sinal elétrico realiza um ciclo completo, ou seja 2π radianos onde é o mesmo que 360° .

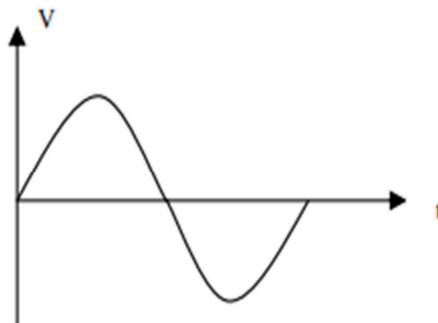
Ângulo de fase – θ° - O ângulo de fase pode ser expressado em graus, onde sua posição relativa no tempo está a uma certa posição em relação a outro sinal de referência.

Esses valores podem variar em:

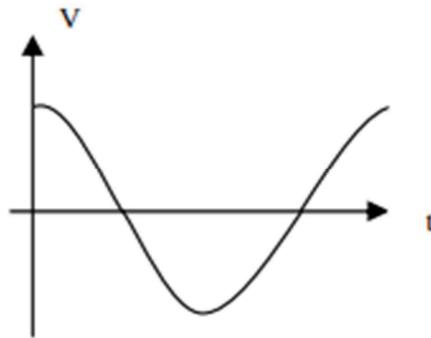
$$\left\{ \begin{array}{l} \theta > 0^\circ \text{ (positivo) - sinal adiantado} \\ \theta = 0^\circ \text{ - sinal em fase} \\ \theta < 0^\circ \text{ (negativo) - sinal atrasado} \end{array} \right.$$

Graficamente podem ser representados por:

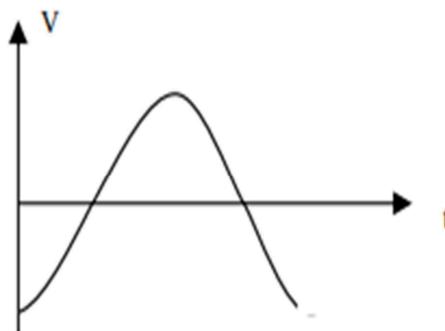
Figura 27 - $\theta = 0^\circ$ ambos estão em fase



Fonte: autor

Figura 28 - $\theta = +90^\circ$ adiantado

Fonte: autor

Figura 29 - $\theta = -90^\circ$ atrasado

Fonte: autor

10 - SINAL SENOIDAL NO TEMPO DISCRETO

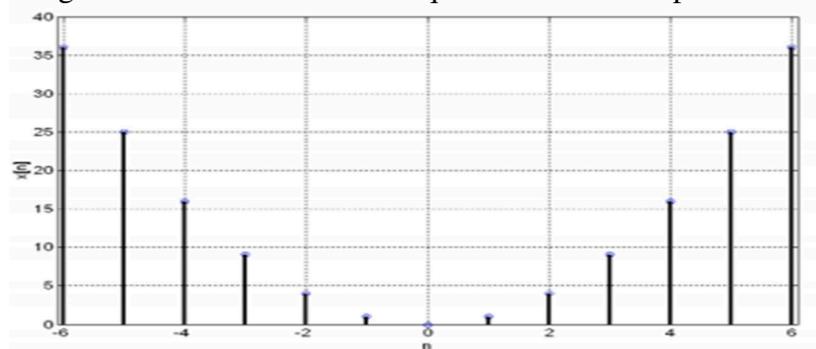
O sinal de tempo discreto é um sinal basicamente definido em frações de tempos isolados, ou seja, podem ser definidos por números em distâncias distintas assim como: 2, 5, 8, 11, 13, 15, 16 etc...

O sinal de tempo discreto pode ser apresentado por $x[n]$ onde são definidos números inteiros e cada valor $x[n] = n^2$, $-6 \leq n \leq 6$

para x pode ser chamado de sinal de amostragem, seja o exemplo dado como para este sinal, foram quantizados os seguintes valores de amostragem onde temos a seguinte representação gráfica:

$$\{x[n]\} = \{36,25,16,9,4,1,0,1,4,9,16,25,36\}.$$

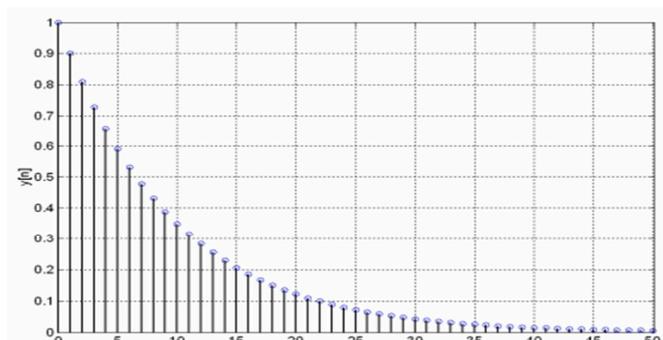
Figura 30 - Plotagem do resultado dos sinais quantizados no tempo discreto



Fonte: autor

Os sinais de tempo discreto podem ter sua sequência de amostragem finita ou infinita. Um exemplo da finita é o da figura 30 e um exemplo infinito pode ser dado por uma equação exponencial como mostra a figura 31.

Figura 31 - Função exponencial no tempo discreto



Fonte: autor

11 - TAXA DE AMOSTRAGEM

A taxa de amostragem, também chamada de frequência de amostragem, é a quantidade de amostras de um sinal analógico comparadas em um intervalo de tempo definido por parâmetros internos do controlador e da frequência do cristal de quartzo.

O processo de captura e de quantificação do sinal, conforme todas as características internas do controlador, é chamado de amostragem de sinal.

Um bom exemplo que pode ser dado para melhor compreensão é o de um CD de música. Digamos que sua taxa de amostragem é 44khz, ou seja, a cada segundo, a variação de tensão gera uma frequência de amostragem de 44khz, os parâmetros que determinam a frequência de amostragem, serão fornecidos pelos fatores que compõem o sistema.

Com isso podemos observar que, quanto maior a taxa de amostragem do sistema, maior a quantidade de sinais quantificados e medidos, e, por sua vez, a saída do sinal terá melhor rendimento ou em outras palavras, o som ficará mais agradável aos ouvidos. Deve ser dada a devida atenção à determinação da taxa de amostragem, pois é ela que definirá a qualidade do sinal de saída.

Para a devida compreensão do conceito de taxa de amostragem do projeto e a forma pela qual cada efeito será implantado, deve-se compreender primeiramente quais fatores influenciam a taxa de amostragem, posteriormente será abordado de modo geral o funcionamento do conversor analógico digital.

Todos os dados mencionados a seguir são para que se possa ter claro conhecimento e entendimento do funcionamento de todo processo de amostragem do sinal até sua conversão.

O controlador usado para na conversão do sinal analógico para digital é o Atmel SAM3X8E. A partir daí, serão demonstrados todos os parâmetros e especificações do controlador para a especificação do projeto.

12 - RESOLUÇÃO DE CONVERSÃO

O controlador Atmel SAM3X8E possui um conversor analógico para digital de até 12 bits e também integra um multiplexador analógico de 16x1 que traz a possibilidade de conversões de 16 linhas analógicas. As conversões podem variar de 0 volts até a tensão ADVREF.

O ADVREF é a tensão de referência para o correto funcionamento do sistema de ADC. A tensão de referência pode ser selecionada via software para o valor de tensão de referência interna do controlador, ou pode-se colocar uma tensão de referência externa no controlador no pino 53.

O ADVREF também é referência de tensão para a operação de conversão Digital para analógico.

Figura 32 - ADVREF do controlador



Fonte: autor

O conversor suporta uma resolução de 10 ou 12 bits e seus resultados de conversão são relatados em um registro comum para todos os canais, bem como em um registro dedicado ao canal.

O ADC também integra um modo Sleep e um sequenciador de conversão e se conecta a um canal PDC. Estes recursos reduzem o consumo de energia e a intervenção do processador.

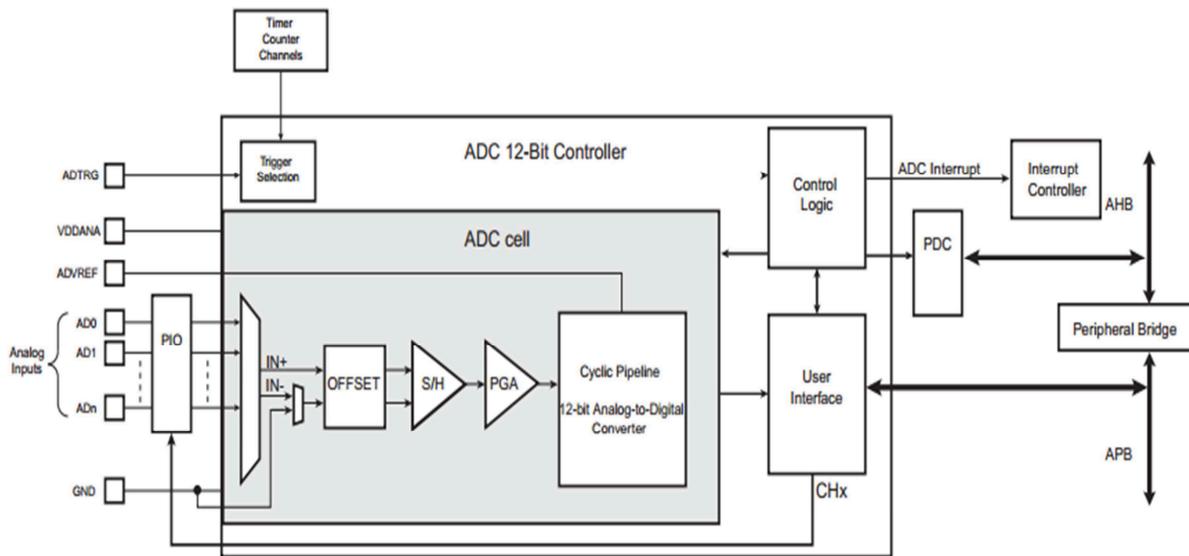
O ADC tem uma entrada selecionável de terminação única ou totalmente diferencial e se beneficia de um ganho programável de 2 bits. (conversor pipeline)

Um conjunto inteiro de tensões de referência é gerado internamente a partir de um único nó de tensão de referência externa que pode ser igual à tensão de alimentação analógica.

Uma capacitância de desacoplamento externa é necessária para filtragem de ruído e um circuito de correção de erro digital baseado no algoritmo de dígitos assinados redundantes de múltiplos bits (RSD) é empregado para reduzir erros.

O usuário pode configurar os TIMERS do ADC, como Tempo de inicialização e Tempo de rastreamento.

Figura 33 - Diagrama Conversor AD Atmel SAM3X8E



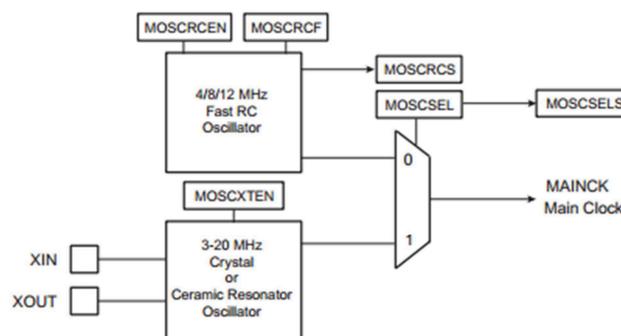
Fonte: autor

13 - CRISTAL DE QUARTZO

O componente eletrônico cristal de Quartzo ou oscilador de cristal gera uma tensão elétrica em uma frequência determinada pelos seus componentes internos. O cristal de quartzo tem a capacidade de gerar tempos numa frequência precisa, por meio das propriedades piezo elétricas do cristal. Dentre os tipos de cristais, o mais comum é o cristal de quartzo, mas também podem ser usados outros tipos de cristais, sendo cerâmicas e também policristalinas.

O motivo do uso de um cristal no controlador é a geração de uma estampa de tempo precisa para que todas as operações do controlador sejam realizadas com sucesso e para que não ocorram erros de leitura e de processo, dentre outros. A figura 34 mostra a pinagem de entrada de um gerador de cristal externo e os parâmetros internos que podem ser configurados pelo programador, assim como a resposta de saída desse bloco, que é o sinal de tempo gerado pelo cristal externo.

Figura 34 - Entrada de cristal oscilador



Fonte: autor

No controlador Atmel SAM3X8E é possível inserir um cristal oscilador de quartzo de frequências entre 3 a 20 Mhz. Podemos também optar por um gerador de frequências com resistor e capacitor onde possa gerar frequências fixas para o controlador. Esta é uma opção de baixo custo para projetos de baixo custo e frequências de operação menores em relação à

capacidade de frequências aceitáveis pelo controlador em relação ao cristal de quartzo. Então, pode-se escolher entre o cristal de quartzo e o circuito com resistor e capacitor externo, ambos apresentam portas separadas umas das outras, ativando diferentes áreas do circuito como a figura 34 demonstrou.

14 - TEMPO DE INICIALIZAÇÃO CONVERSOR AD

Cada conversor AD tem seu próprio tempo de inicialização mínimo que é programado por meio do campo STAR UP no registrador ADC_MR.

É necessário um tempo mínimo de acompanhamento para que o ADC garanta o melhor valor final convertido entre a seleção de dois canais. Este tempo tem que ser programado por meio do campo de bits TRACKTIM no registrador ADC_MR.

A equação abaixo determina os parâmetros necessários para se calcular o tempo mínimo de inicialização do conversor AD.

TRACKTIM: TRACKING TIME

$$\mathbf{Tracking\ Time = (TRACKTIM + 1) * ADCClock\ periods}$$

(13)

14.1 - MODOS DE CONVERSÃO AD

Existem dois modos de conversão AD, o modo de conversão simples e o modo de conversão contínua.

- Modo de conversão simples:

Neste modo é necessária a inicialização de cada conversão individual. Quando é completada toda conversão ocorre o preenchimento do registrador de dados e um bit de um registrador responsável passa a ser 1.

- Modo de conversão contínua:

Neste modo, o programador inicia a primeira conversão, o mesmo processo como na conversão simples, mas a diferença é que o próprio conversor irá iniciar automaticamente as próximas etapas de conversões assim que terminam as anteriores.

No caso do controlador utilizado, o mesmo não possui modo de conversão contínua,, então o programador deve primeiramente ativar o MCK no controlador de gerenciamento de energia, antes de usar o controlador ADC, pois com o cristal de quartzo de 20Mhz não selecionado e se nenhum cristal for selecionado o conversor Analógico para digital não irá funcionar.

14.2 - FREQUÊNCIA DE CONVERSÃO AD

A frequência do clock ADC é selecionada no campo PRESCAL no registrador ADC_MR. A etapa de rastreamento começa durante a conversão do canal anterior e se o tempo de rastreamento for maior que o tempo de conversão, a fase de rastreamento só será efetuada após a conclusão do sinal anterior.

O tempo de startup para o conversor AD de um cristal de 20mhz é de 1mili-segundo.

As opções de configuração do Prescaler são as mostradas na Figura 35.

Figura 35 - Opções de Prescaler

• PRES: Processor Clock Prescaler

Value	Name	Description
0	CLK	Selected clock
1	CLK_2	Selected clock divided by 2
2	CLK_4	Selected clock divided by 4
3	CLK_8	Selected clock divided by 8
4	CLK_16	Selected clock divided by 16
5	CLK_32	Selected clock divided by 32
6	CLK_64	Selected clock divided by 64
7	CLK_3	Selected clock divided by 3

Fonte: autor

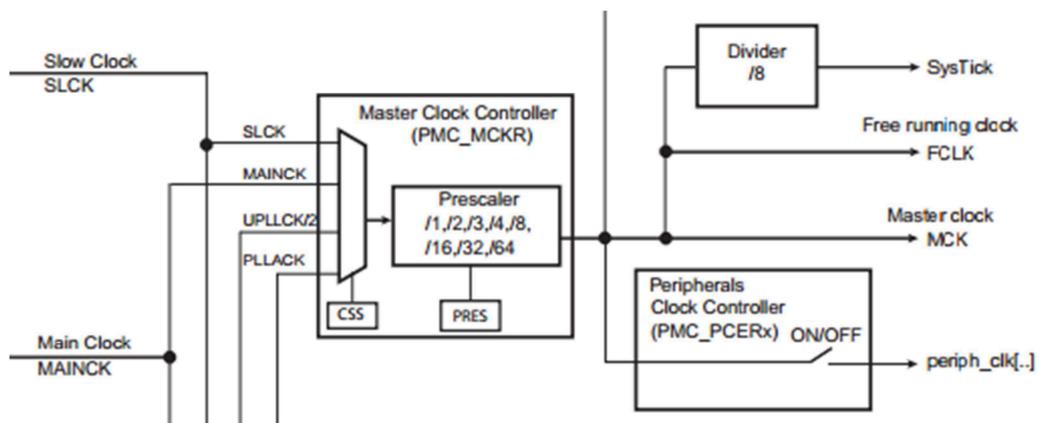
O intervalo de clock do ADC é entre $MCK/2$ se o PRESCAL for 0 e $MCK/512$ se o PRESCAL estiver definido como 0xFF.

O PRESCAL deve ser programado para fornecer uma frequência de clock do ADC.

Na tabela da figura 35 tem-se 8 configurações de clock que o prescaler oferece, podendo-se dividir a frequência de cristal de quartzo pelas frequências de prescaler.

A figura 36 ilustra o sinal da frequência de Mainck que vem do cristal de quartzo e passa pelo prescaler selecionado pelo programador, também exemplificado na tabela da figura 36. Após esse processo obtém-se o máster clock ou MCK que será usado para definir a frequência de conversão AD do controlador.

Figura 36 - Controlador de máster clock



Fonte: autor

Enfim, tem-se os fatores necessários para definir qual a frequência de clock do conversor AD, onde a mesma depende do máster clock proveniente ao cristal de quartzo e também do prescaler. A equação que define a frequência de clock do ADC é dada por:

$$ADCLOCK = \frac{MCK}{(PRESCAL+1)*2} \quad (14)$$

A resolução do AD0 que recebe o sinal do captador da guitarra e é limitada pela tensão do ADREF onde o mesmo foi selecionado com 3,3v como já visto.

A resolução do AD0 é dada pela equação:

$$Resolução = \frac{vrefmax}{n \text{ de combinações}} \quad (15)$$

Onde :

Vrefmax = ADREF sendo 3.3volts

Numero de combinações é a resolução de bits selecionado para o projeto sendo 12bits

A equação fica então:

$$\mathbf{Resolução} = \frac{3.3v}{2^{12}bits} = \frac{3.3v}{4096 bits} = \mathbf{805.664} \left[\frac{micro\ volts}{bit} \right] \quad (16)$$

Ou seja, a cada unidade de 805.664 micro volts equivale a 1 bit.

Isso quer dizer que o processador tem a capacidade de processar 4096 pontos digitais de resolução digital e, quanto maior a resolução, melhor a qualidade do sinal de saída.

14.3 ERROS DE CONVERSÃO

A principal característica quando se converte um sinal é o erro inserido por sua conversão, o que geralmente provoca no sinal uma deformidade e adiciona ruído.

Observa-se no primeiro caso o erro de resolução. Em geral o conversor AD utiliza uma referência para conversão que usualmente é a tensão de alimentação, ou ADREF que é um pino do controlador usado exclusivamente para inserir uma tensão de referência para conversão AD.

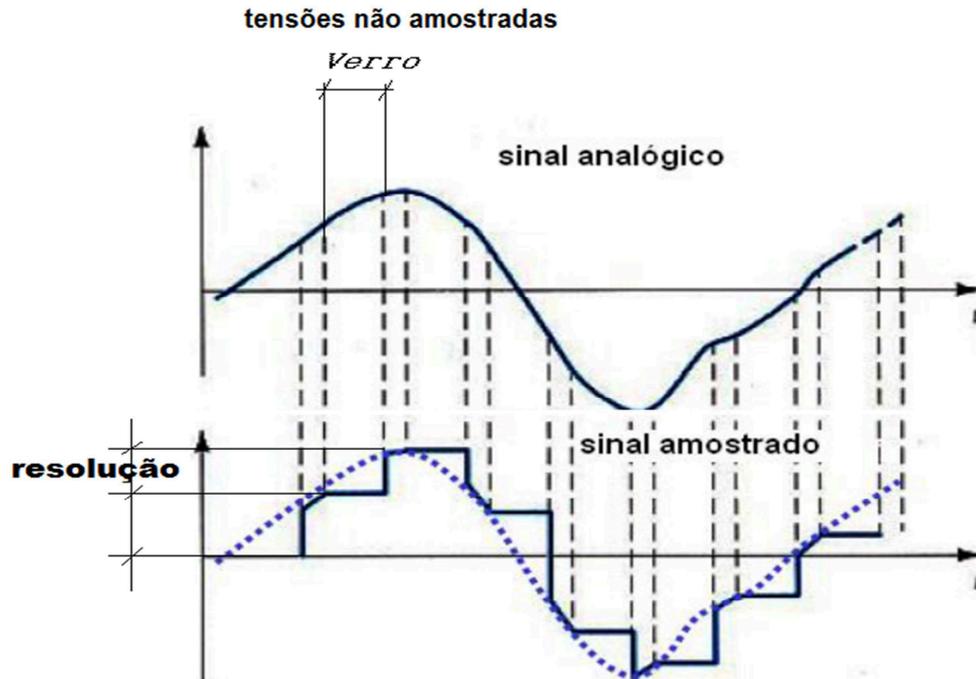
O erro pode ser dado por

$$\mathbf{erro} = \frac{\mathbf{resolução}}{2} \quad (17)$$

Nesta tensão lida pelo conversor AD, o mesmo pode entender bit1 ou bit2 caso haja uma variação que seja equivalente a ½ bit, ou seja :

$$\mathbf{erro} = \mathbf{805.664} + \frac{\mathbf{805.664}}{2} \quad (18)$$

Figura 37 - Resolução e erro amostrado



Fonte: autor

14.4 - TEOREMA DE NYQUIST

Também conhecido como teorema de Nyquist Shannon, é fundamental para o entendimento de frequências de amostragem aplicadas a sistemas de processamento de sinais, de telecomunicações e todo tipo de aquisição de sinais. Para que o processo de amostragem aconteça, é necessário que o sinal seja convertido de tempo contínuo para tempo discreto.

Basicamente, o teorema de Nyquist consiste no maior sinal FM, onde a unidade é dada em Hertz do sinal a ser analisado. O sinal de entrada é limitado em uma banda, com sua resolução dividida em partes iguais e cada subdivisão da resolução obtém um intervalo de T onde:

$$T = \frac{1}{f}$$

(19)

Onde:

f = Frequência do sistema [Hertz]

$T = \text{Período [segundos]}$

O período T é menor que $\frac{1}{2} FM$. Escolhendo-se arbitrariamente uma amostra instantânea de cada subintervalo, observa-se que o resultado na saída será a reconstrução do sinal de entrada. Pode-se, então, observar que a partir da amostragem do sinal de entrada que foi selecionado para amostragem, pode ser reconstruída na saída se a taxa de frequência de amostragem for:

$$\text{frequencia amostragem} \geq 2 \times \text{Sinal entrada}$$

Conforme o teorema de Nyquist, a quantidade de amostragem por ciclos ou unidade de tempo de um sinal, denominado frequência de amostragem, deve ser maior que o dobro da maior frequência de entrada a ser amostrado, para que o mesmo possa ser reconstruído sem nenhum erro na saída do circuito.

14.5 - CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL

Os conversores analógicos digitais são os principais responsáveis por transformar os sinais analógicos em sequências numéricas discretas, para que sejam utilizadas dentro dos processadores e em uma sequência conhecida e previsível no tempo, possibilitando tratar o sinal de forma a modelá-lo e utilizá-lo na aplicação a que se propõe.

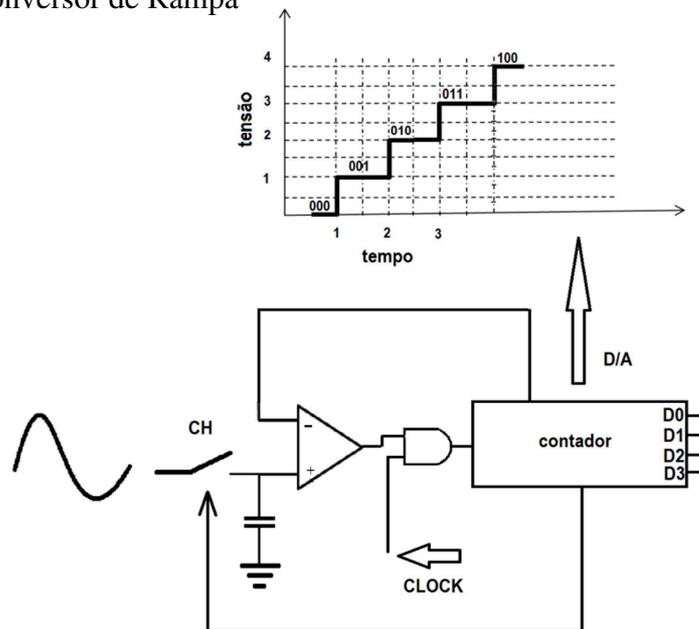
Existem diversos tipos de conversores analógico-digitais, tais como, o conversor de rampa, o integrador, o conversor de aproximação sucessiva e o conversor paralelo. Será abordado o funcionamento de dois desses circuitos, o conversor de rampa, que elucidará o funcionamento do tipo de bloco e do conversor “pipeline”, o qual será utilizado e que está implementado no processador a ser utilizado para o presente trabalho.

14.6 - CONVERSOR RAMPA

Na entrada de um conversor AD é injetado um sinal, em geral de um transdutor como no caso deste projeto, um captador magnético, e na saída tem-se um número digital correspondente à sua intensidade.

O mais simples conversor digital que se pode ter é o conversor tipo rampa. No conversor tipo rampa tem-se como parte do circuito um comparador responsável pelo disparo do processo de conversão, uma porta comparadora tipo AND, um contador e um circuito conversor digital analógico.

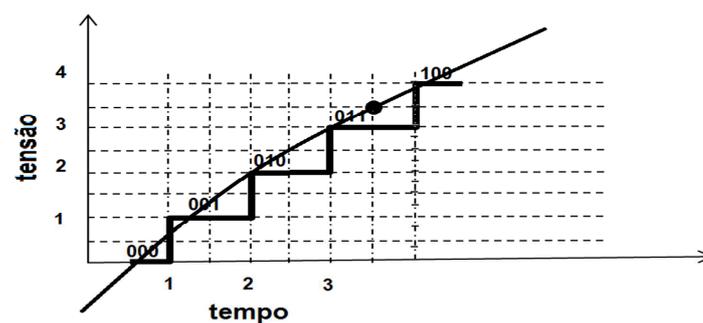
Figura 38 – Conversor de Rampa



Fonte: autor

Para compreender melhor o funcionamento do circuito tem-se a figura 39, na qual observa-se que, na entrada do comparador injeta-se o sinal analógico a ser convertido, o circuito começa a conversão a partir do instante inicial do contador, do instante em que houve o início do processo a contagem do clock, se inicia a cada pulso um incremento da tensão na entrada do comparador modificando assim o nível de tensão responsável pela comparação, quando o circuito atinge a referência da entrada do amplificador, o estado da saída muda parando o processo de contagem. Com a paralisação da contagem, tem-se o valor digital correspondente equivalente ao de entrada na saída do circuito contador. Por esse processo podemos notar que existe um ponto crítico na operação.

Figura 39 - Resolução de conversão AD



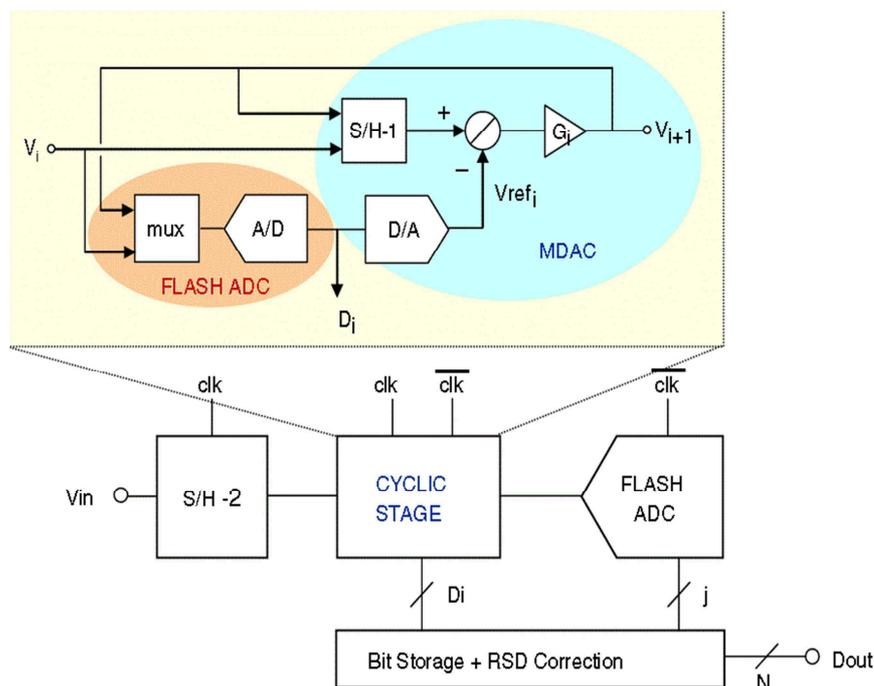
Fonte: autor

Na figura 40, se a tensão analógica tem o valor de 3,5v, a mesma ainda não é suficiente para mudar o estado do comparador, porem é mais alta que 3v, então é introduzido no circuito um erro de resolução, no qual tem-se intervalos entre 3 e 4 que o circuito não diferencia. Outra característica do circuito é que ele não suporta taxas de conversão muito altas devido à própria característica dos comparadores.

14.7 - CONVERSOR PIPELINE

Os conversores analógicos digitais tipo pipeline são muito utilizados quando é necessária alta velocidade de conversão para aplicações em áudio vídeo e rádio frequência. Seus blocos internos são mostrados na figura 40.

Figura 40 – Conversor Pipeline



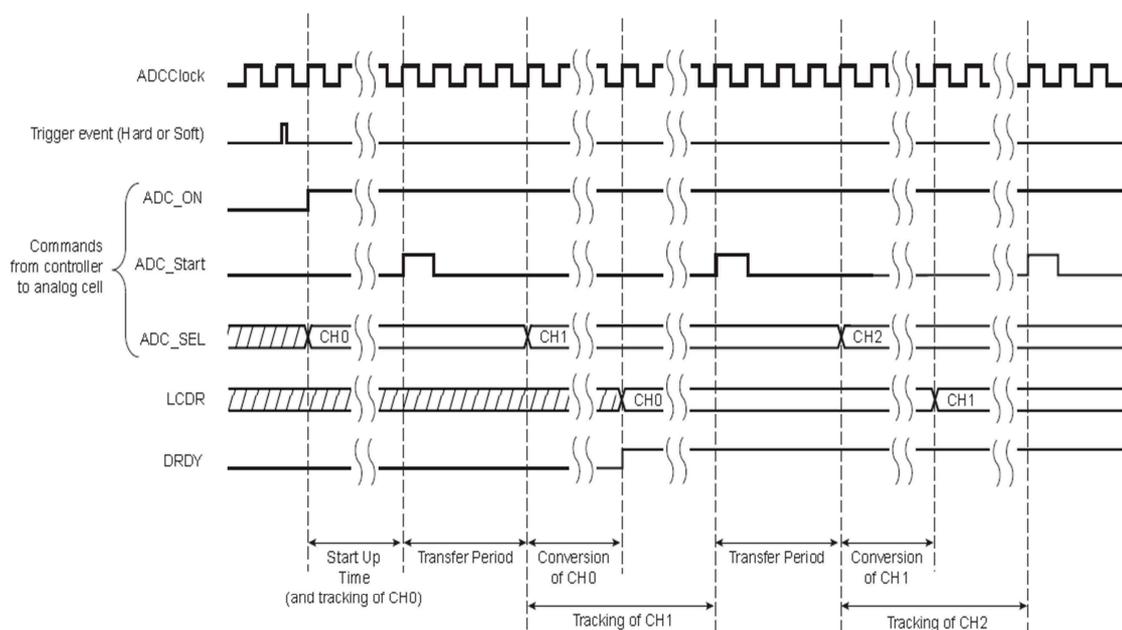
Fonte: Microcontrolador SAM3X-SAM3A Datasheet

A conversão do sinal é feita da seguinte forma: inicialmente o sinal analógico é aplicado na entrada do circuito. Quando ele entra no primeiro estágio é amostrado e retido no primeiro bloco (S&H sample and hold), o mesmo é convertido por uma pequena célula que contém um conversor analógico de três bits.

Esses três bits são armazenados em um buffer, ao mesmo tempo esses três bits são reconvertidos em sinal analógico e subtraídos do sinal principal, entrando, em seguida, em um segundo estágio que executa o mesmo processo, e assim sucessivamente até chegar ao último conversor que escreve diretamente no buffer de saída do circuito. Nota-se que ao subtrair-se do sinal principal o resultado da conversão, é entregue para o estágio seguinte o erro de conversão. Se somar-se este valor ao resultado final, podem-se minimizar os erros de leitura.

Um ponto importante da conversão AD é o de máquina do conversor AD, ou seja, são os ciclos nos quais o circuito demora para converter um sinal que chega em sua entrada até o registro de buffer, no caso do processador usado, o conversor utiliza de 20 ciclos de clock para capturar e determinar o valor do conversor.

Figura 41 - Início do ciclo de conversão AD do controlador

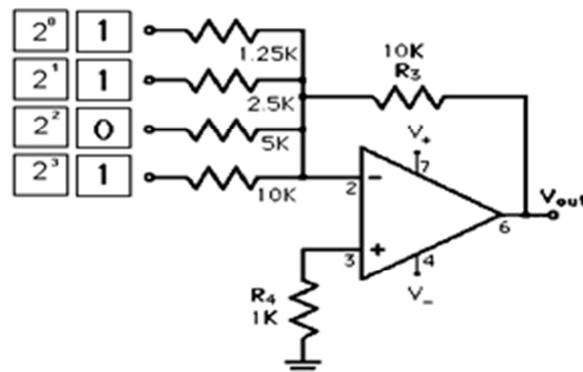


Fonte: Microcontrolador SAM3X-SAM3A Datasheet

14.8 - CONVERSÃO DIGITAL ANALÓGICO

Do ponto de vista construtivo a conversão digital analógica é mais simples, o circuito é mais comum e é construído com um amplificador operacional somador e resistores com valores escalonados.

Figura 42 - Conversor digital analógico



Fonte: autor

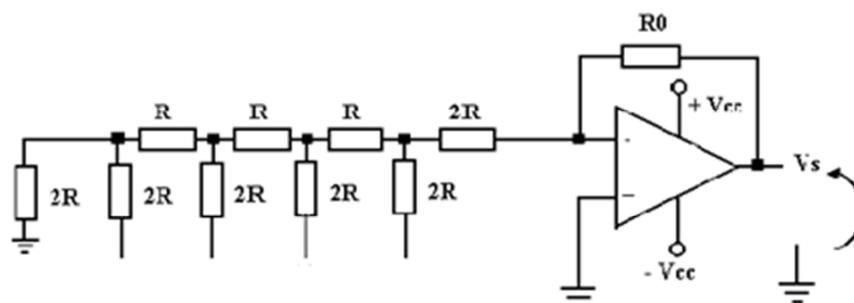
14.9 - CONVERSOR D/A DE RESISTORES COM PESOS PONDERADOS

Nesse tipo de conversor, os valores são calculados para que na saída do amplificador operacional obtenham-se os valores diretamente proporcionais à tensão desejada, quando injetamos os bits na entrada do amplificador, o mesmo insere na saída o valor requerido pelo escalonamento da rede. Esse tipo de conversor não é muito prático, pois quanto maior o número de bits, mais altos serão os valores de R . Tem-se também o problema da tolerância que influencia negativamente a tensão de saída e por fim, os valores dos resistores não são comerciais, exigindo uma associação de vários resistores para chegarem-se às resistências necessárias para o projeto.

14.10 - CONVERSOR D/A TIPO ESCADA R-2R

Também amplificador operacional, tem como característica principal sua rede de resistores de somente dois valores.

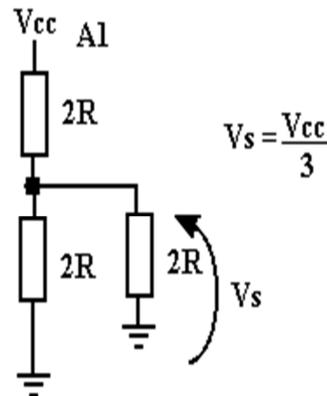
Figura 43 - Conversor DA tipo escada R-2R



Fonte: autor

Conforme pode-se observar pelo circuito simplificado, a associação de resistores resulta em um proporcional para a tensão de saída v_s .

Figura 44 - Simplificação de resistores R-2R



Fonte: autor

Quando são inseridos resistores em paralelo, esse proporcional vai sendo somado, oferecendo na saída a tensão convertida.

Assim como o conversor analógico digital, o conversor DA tem uma resolução que deve ser levada em consideração, pois influencia diretamente na reconstrução do sinal desejado na saída, com 8 bits um conversor terá uma resolução de 0,0197V, no entanto o de 12 bits terá uma resolução de 0,001220703125 V, ou seja, muito mais preciso para retratar a reconstrução do sinal de entrada do projeto.

14.11 – MICROCONTROLADORES

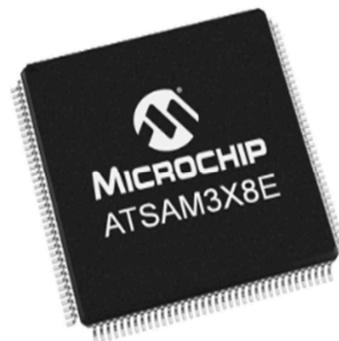
Microcontroladores são circuitos eletrônicos que possuem em seu núcleo uma unidade lógica e aritmética, que pode executar um programa. Possuem também todos os periféricos necessários para entrada e saída de sinais e dados e seu armazenamento.

Os microcontroladores surgiram da necessidade de se possuir um componente flexível que pudesse exercer funções complexas, por isso os microcontroladores possuem arquitetura RISC

O Atmel série A SMART SAM3X/A é um membro de uma família de Flash microcontroladores baseados no ARM Cortex-M3 RISC de 32 bits de alto desempenho.

Opera a uma velocidade máxima de 84 MHz e apresenta até 512 Kilobytes de Flash e até 100 Kbytes de SRAM. O conjunto periférico inclui uma Porta USB e dispositivo de alta velocidade com transceptor incorporado, uma porta Ethernet MAC, 2 CANs, um MCI de alta velocidade para SDIO / SD / MMC, interface de barramento externo com NAND Flash Controller (NFC), 5 UARTs, 2 TWIs, 4 SPIs, bem como um PWM timer, três temporizadores de 32 bits de uso geral de 3 canais, um RTC de baixo consumo de energia, um RTT de baixo consumo de energia. Possui também ADC de 12 bits e um de 12 bits DAC. A série SAM3X/A está preparada para toque capacitivo graças à biblioteca qtouch, oferecendo uma maneira fácil de instalação de botões e controles deslizantes. A arquitetura do SAM3X/A é projetada para sustentar a transferência de dados de alta velocidade. Inclui uma matriz de barramento multi-camada, bem como vários bancos SRAM, Canais PDC e DMA que permitem executar tarefas em paralelo e maximizar os dados Taxa de transferência. O dispositivo opera de 1.62V a 3.6V e está disponível em 100 e 144 derivações LQFP, o dispositivo SAM3X / A são particularmente adequados para aplicativos de rede podendo ser automação industrial e residencial / predial, gateways.

Figura 45 - Microcontrolador SAM3x8E



Fonte: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATsam3x8e> 20:30 12/06/2018

14.11.1 - Arquitetura RISC

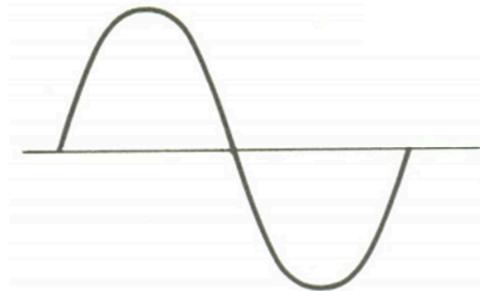
RISC que significa “Reduced Instruction Set Computer” ou computador de conjunto de instruções reduzidas. Pela abreviatura podemos entender que computador denominado RISC possui um conjunto de instruções reduzidas, executa poucas tarefas e não é capaz de executá-las ao mesmo tempo.

15 - EFEITO DISTORÇÃO FUZZ

O efeito de distorção “fuzz” originou-se da tentativa de se obter por meio de dois transistores, o som parecido com a distorção de um amplificador valvulado, tentando excitar ao máximo os transistores, mas foi apenas uma tentativa. A partir dessa tentativa originou-se o efeito de distorção característico chamado “fuzz”.

O efeito “fuzz” é obtido por uma pré-amplificação elevada do sinal de entrada do primeiro transistor de estágio, sinal este proveniente da guitarra elétrica, injetando então no transistor um nível acima do limite admitido para uma reprodução linear. O sinal que originalmente na saída do transistor seria como o da figura 46. Sinal este que não estaria saturado.

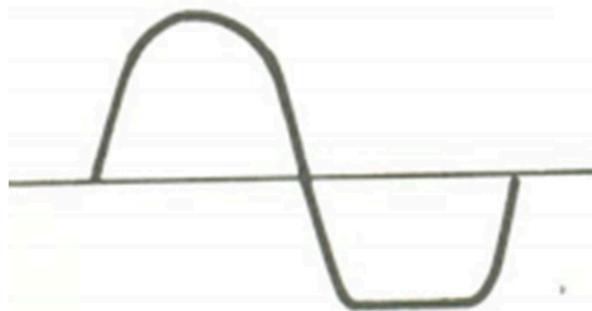
Figura 46 – Sinal de saída do transistor sem saturação



Fonte: autor

Passaria a ter então, com a saturação deste sinal parecido como o da figura 47.

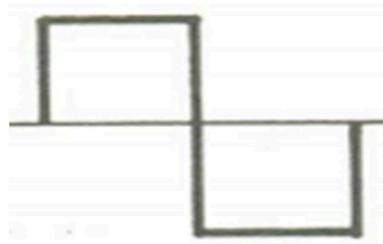
Figura 47 - – Sinal de saída do transistor sem saturação



Fonte: autor

O achatamento da forma de onda visto na figura 48 é o que produz os chamados harmônicos. Para conseguir maior achatamento e um sinal mais simétrico, podem-se utilizar diodos ceifadores, ou seja, dois diodos em paralelo e, polarizados reversamente, um em relação ao outro, obtendo-se então a seguinte forma de onda.

Figura 48 - Forma de onda FUZZ após diodos ceifadores



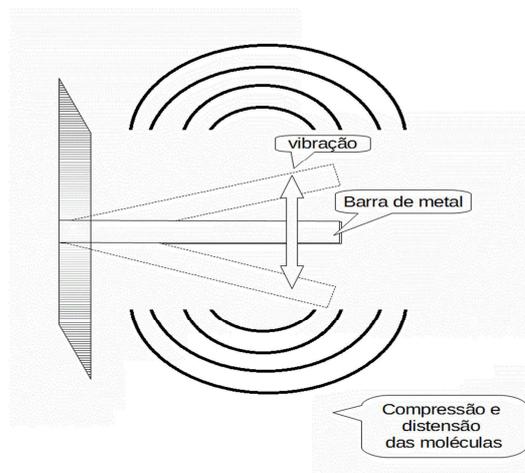
Fonte: autor

Todas essas formas de onda são exageradamente achatadas para que o som saia “limpo” apesar de enriquecido em harmônicos. Daí o nome “Fuzz”, distorcedores que produzem este tipo de achatamento ou “ceifamento”.

16 - O ECO E SEUS EFEITOS

Para se explicar o efeito eco, é necessário primeiramente conhecer a natureza dos sons. Os sons são vibrações que se propagam em meio material, resultado da compressão e distensão das ondas sobre o ar. No vácuo, por exemplo, não há sons, pois não existem meios da onda se propagar. Supondo que se tenha um ponto vibrante, qualquer um pode imaginar as ondas se propagando no ar conforme a Figura 49.

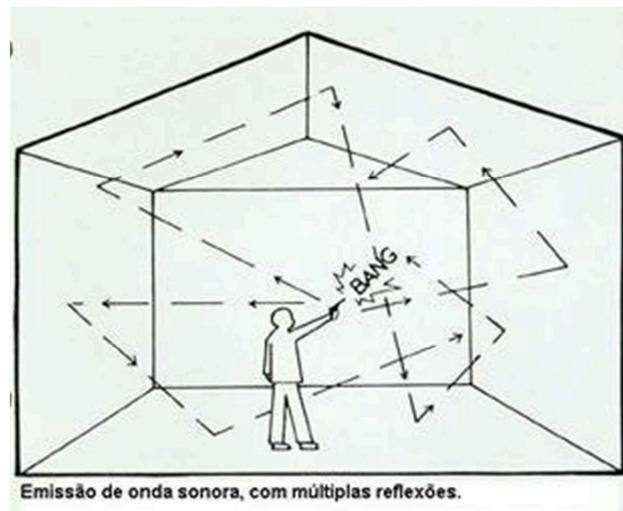
Figura 49 – Propagação das ondas sonoras



Fonte: autor

Não havendo nada que impeça o percurso das ondas, elas irão se propagar para cada vez mais longe, perdendo gradativamente sua intensidade quanto mais distante do ponto de origem. O eco e a reverberação são fenômenos ligados diretamente à persistência auditiva do ser humano. Uma pessoa não consegue distinguir dois sons sucessivos, se estes estiverem separados por um espaço de tempo inferior a 0,1 segundo. Isso quer dizer que, se tivermos dois sons consecutivos, em menos de 0,1s, nossos ouvidos não perceberão a diferença entre um e outro, sendo estes interpretados pelo nosso cérebro como um único som. Agora se estes sons estiverem separados um pouco mais, aproximando-se do 1/10 s o som é interpretado pelo nosso cérebro como sendo um som só, mas a sensação é de que o som se prolongou. A esse efeito damos o nome de reverberação, devido à característica do som de se propagar para várias direções, podemos em grandes salas sentir o efeito da reverberação, sendo que um som quando emitido se propaga até chegar a um obstáculo que o reflete e, havendo várias reflexões dando a sensação ao ouvinte do som prolongado natural desse efeito Figura 50.

Figura 50 – Emissão de ondas sonoras com múltiplas reflexões

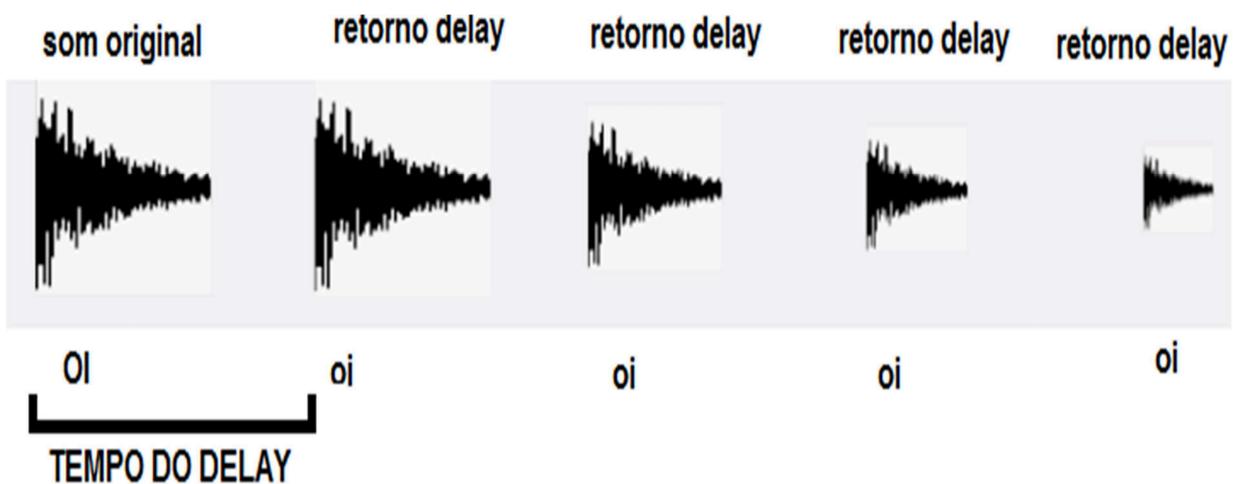


Fonte: <http://www.byknirsch.com.br/artigos-06-01-salaviva2.shtml> 12/06/2018

O eco ocorre quando o som retorna ao ouvinte em um intervalo maior que $1/10$ s, dando a nítida sensação de descontinuidade entre a emissão e sua percepção.

O *delay* é um efeito de áudio que pode ser reproduzido várias vezes a partir da nota fundamental amostrada e sem que haja perdas, em geral, o *delay* é um efeito onde ocorre sua repetição de forma análoga ao eco natural, ou seja, conforme as repetições vão acontecendo, a mesma vai perdendo a intensidade.

Figura 51 – Efeito do delay

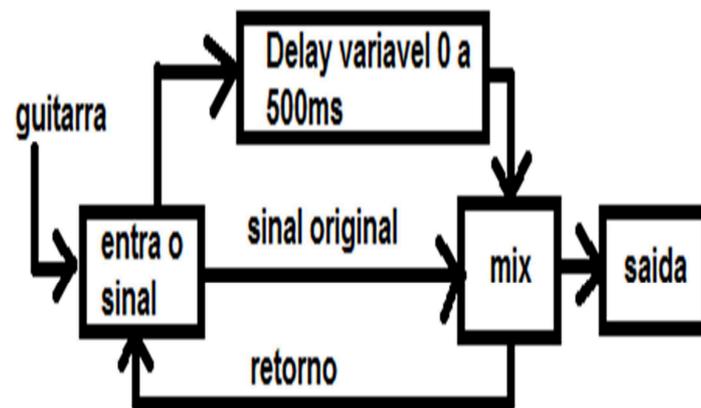


Fonte: autor

Uma forma de se realizar o *delay* simples é fazendo a soma do sinal original com o sinal já atrasado, sendo que o sinal atrasado é armazenado em um banco de memórias. Outra forma

é fazendo a reinserção do sinal repetido junto ao sinal de entrada usando vários locais da memória em diferentes instantes de tempo.

Figura 52 - Ciclo do efeito delay



Fonte: autor

Este trabalho foi desenvolvido a partir de conceitos de eletrônica e métodos já estabelecidos da atualidade. Na prática, foi utilizada a teoria dos filtros para determinar a faixa de frequência de operação do pedal de efeitos sonoros, sendo esta uma etapa importante para que o circuito seja imune a interferências externas de frequências indesejáveis. Para esta etapa foram utilizados capacitores e resistores e amplificadores operacionais. Após a filtragem é feita a conversão do sinal contínuo no tempo para discreto por meio do conversor Analógico para Digital do próprio microcontrolador, onde são aplicadas as teorias de resolução das informações a serem lidas, conforme a capacidade de conversão do microcontrolador.

Neste projeto é utilizado um conversor AD de 12bits, então é feita a amostragem e retenção deste sinal, utilizando o teorema de Nyquist Shannon. Após a amostragem do sinal, o mesmo é movido em bancos de memórias internas do microcontrolador para que se possam utilizar essas informações quando necessário.

Por meio de uma interface de controle do microcontrolador podendo ser o Atmel Studio ou Sketch do Arduino é feita toda a configuração dos efeitos sonoros conforme necessidade, utilizando então os componentes eletrônicos adjacentes somente para receber o sinal e enviar para o amplificador de som, sendo então o software responsável pela criação dos efeitos sonoros como echo, delay, reverb, overdrive, fuzz. Após a criação do efeito sonoro via programação, é configurado o conversor Digital para analógico que também é feito via programação em linguagem de alto nível, coloca na saída selecionada o efeito criado, após esta etapa, são utilizados amplificadores operacionais para colocarem na entrada do amplificador de som o sinal modificado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATMEL, M. **Datasheet**. Disponível em:

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2018.

BRAGA, N. C. Câmara de eco integrada. **Revista Saber Eletrônica**, n. 193, p. 84, 1988. **CONVERSOR DIGITAL**. Disponível em:

<<http://endigital.orgfree.com/sequencial/conversorDA.htm>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

Conversores A/D D/A. Disponível em:

<<http://www.din.uem.br/sica/material/adda/adda.html>>. Acesso em: 8 abr. 2018a.

Conversores A/D D/A. Disponível em:

<<http://www.din.uem.br/sica/material/adda/adda.html>>. Acesso em: 8 abr. 2018b.

conversores ad da teoria - Pesquisa Google. Disponível em:

<<https://www.google.com/search?client=firefox-b&q=conversores+ad+da+teoria&sa=X&ved=0ahUKEwi545m33d3aAhXBvJAKHXDJB2MQ1QIIdygB&biw=1280&bih=884>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

CONVERSORES ANALÓGICOS DIGITAIS. Disponível em:

<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:So6PUOck7cIJ:paginapessoal.utfpr.edu.br/demantov/eletr.-digital-2-el05et11/7-conversores-ad/Aula%252025-Teoria-ED2-Convorsor_AD_Aluno_20161S.pdf/at_download/file+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br&lr=lang_en%7Clang_pt&client=firefox-b>. Acesso em: 28 abr. 2018.

COOK, M. **Arduino Music and Audio Projects**. 1. ed. [s.l.] Apress, [s.d.].

Delay-Based Audio Effects - MATLAB & Simulink - MathWorks America Latina.

Disponível em: <https://la.mathworks.com/help/audio/examples/delay-based-audio-effects.html?s_tid=gn_loc_drop#d119e1379>. Acesso em: 13 mar. 2018.

Dia Diagram Editor download | SourceForge.net. Disponível em:

<<https://sourceforge.net/projects/dia-installer/>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

Draw | LibreOffice - A melhor suite office livre. Disponível em: <<https://pt-br.libreoffice.org/descubra/draw/>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

Echo and Reverberation | Matlab Projects..... Disponível em: <<https://matlab-project-codes.blogspot.com.br/2011/01/echo-and-reverberation.html>>. Acesso em: 13 mar. 2018.

ElectroSmash - Electro Smash :: Topic: Best pedalSHIELD DUE Topics (1/1).

Disponível em: <<https://www.electrosmash.com/forum/software-pedalshield/233-best-pedalshield-due-topics?lang=en>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

ElectroSmash - Electro Smash :: Topic: Double Span and Digitize Signals Using Two ADCs (1/1). Disponível em: <<https://www.electrosmash.com/forum/hardware->

[pedalshield/22-double-span-and-digitize-signals-using-two-adcs?lang=en](#)>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ElectroSmash - Electro Smash :: Topic: How to Build pedalSHIELD in 5 steps. (1/4). Disponível em: <<https://www.electrosmash.com/forum/hardware-pedalshield/20-how-to-build-pedalshield-in-5-steps?lang=en>>. Acesso em: 10 mar. 2018a.

ElectroSmash - Electro Smash :: Topic: How to Build pedalSHIELD in 5 steps. (1/4). Disponível em: <<https://www.electrosmash.com/forum/hardware-pedalshield/20-how-to-build-pedalshield-in-5-steps?lang=en>>. Acesso em: 10 mar. 2018b.

ElectroSmash - Electro Smash :: Topic: pedalSHIELD Bill of Materials and Alternatives (1/3). Disponível em: <<https://www.electrosmash.com/forum/hardware-pedalshield/17-pedalshield-bill-of-materials-and-alternatives>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ElectroSmash - Electro Smash :: Topic: Several Codes based on PedalSHIELD Library (1/1). Disponível em: <<https://www.electrosmash.com/forum/software-pedalshield/133-several-codes-based-on-pedalshield-library?lang=en#481>>. Acesso em: 12 mar. 2018.
EYGLYS, K. Conversão Analógica - Digital. p. 20, [s.d.].

HUBER, D. M.; RUNSTEIN, R. E. **Técnicas Modernas de Gravacao de Audio.** [s.l.] Taylor & Francis, 2011.

KiCad EDA. Disponível em: <<http://kicad-pcb.org/>>. Acesso em: 16 jun. 2018.
MELLO, C. A. Processamento Digital de Sinais. p. 335, [s.d.].

MONK, S. **Programação com Arduino II passos avançados com Sketches.** 1. ed. [s.l.] Bookman, 2015.

Música eletrônica. , 22 jan. 2018. (Nota técnica).
OBI. **EQ ChartObiAudio**, 11 jul. 2010. Disponível em: <<http://obiaudio.com/eq-chart/>>. Acesso em: 16 jun. 2018

OSMAIR REZENDE VASCONCELOS. **LibreOffice Writer Criando um fluxograma, conhecendo a barra de desenho,** [s.d.]. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=W93hHqBsnnY>>. Acesso em: 13 maio. 2018

pedais de eco - Pesquisa Google. Disponível em: <[PERTENCE JUNIOR, A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos.** 8. ed. \[s.l: s.n.\]. v. único](https://www.google.com/search?client=firefox-b&biw=1280&bih=884&tbm=isch&sa=1&ei=jsz4WrC4McSIwgTR4aC4Bw&q=pedais+de+eco&oq=pedais+de+eco&gs_l=img.3...61728.62626.0.63028.3.3.0.0.0.140.380.0j3.3.0....0..1c.1.64.img..0.1.132...0j0i30k1j0i24k1.0.eNzCHg-y9Zs#imgsrc=TPhSS7gzbtjKuM:>.>. Acesso em: 13 maio. 2018.</p>
</div>
<div data-bbox=)

PLX-DAQ | Parallax Inc. Disponível em: <<https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>>. Acesso em: 26 fev. 2018.

SANTOS, N. Arduino e Aquisição de Dados. **Programar**, n. 20, p. 27, jun. 2009.

SCHROEDER, M. R. Natural Sounding Artificial Reverberation. **J. Audio Eng. Soc**, v. 10, n. 3, p. 219–223, 1962.

SMASH, E. **pedalshield: pedalSHIELD Arduino Guitar Pedal**. [s.l: s.n.].

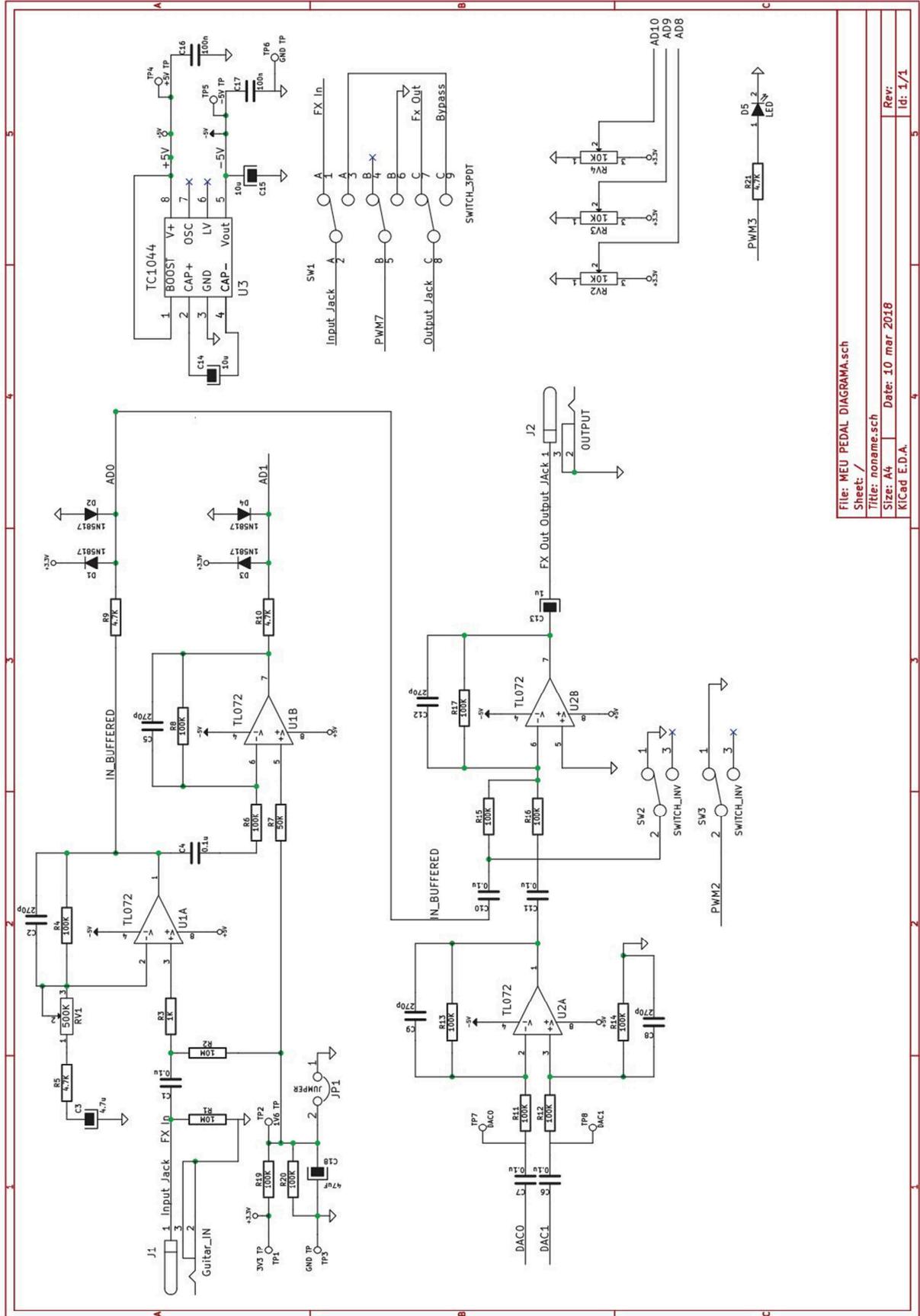
Stock Rock Radio: StockGuitar: Delay ou Reverb? Disponível em:

<<http://www.stockrockradio.com.br/2011/08/stockguitar-delay-ou-reverb.html>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

What sample rate is required for a given signal, and which products are capable of recording it? Disponível em:

<<http://support.saleae.com/hc/en-us/articles/208667276-What-sample-rate-is-required-for-a-given-signal-and-which-products-are-capable-of-recording-it->>. Acesso em: 26 fev. 2018.

ANEXO 1



File: MEU PEDAL DIAGRAMA.sch	
Sheet: /	
Title: noname.sch	
Size: A4	Date: 10 mar 2018
Rev: /	Id: 1/1

ANEXO 2

APÊNDICE B FLUXOGRAMA

