

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
COMPUTAÇÃO**

**TELOS GALANTE MANCERA**

**AFINADOR DIGITAL PARA VIOLÃO E  
GUITARRA ELÉTRICA  
IMPLEMENTADO EM FPGA**

São Carlos  
2013



**TELOS GALANTE MANCERA**

# **AFINADOR DIGITAL PARA VIOLÃO E GUITARRA ELÉTRICA IMPLEMENTADO EM FPGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em  
Eletrônica

ORIENTADOR: Professora Mestre  
Luiza Maria Romeiro Codá

São Carlos  
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M268a Mancera, Telos Galante  
Afinador digital para violão e guitarra elétrica  
implementado em FPGA / Telos Galante Mancera;  
orientador Luisa Maria Romeiro Codá. São Carlos, 2013.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. Afinador. 2. Filtros. 3. FPGA. 4. VHDL. I.  
Titulo.

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Nome:** Telos Galante Mancera

**Título:** “Afinador digital para violão e guitarra elétrica implementado em FPGA”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado**  
**em** 22/07/2013,

**com NOTA** 9,3 (nove, três), **pela Comissão Julgadora:**

**Profa. Assistente Luiza Maria Romeiro Codá (orientadora)**  
**SEL/EESC/USP**

**Prof. Assistente Edson Gesualdo - SEL/EESC/USP**

**Prof. Assistente Jerson Barbosa de Vargas - SEL/EESC/USP**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:**  
**Prof. Associado Homero Schiabel**



## **Agradecimentos**

Agradeço a minha família.

À professora Luiza Maria Romeiro Codá pela orientação.

Aos meus amigos Rafael Santos Moura, João Paulo Vicentini Fracarolli e Igor Guerrero por me darem apoio dentro ou fora do laboratório.

Aos professores Baker Jeferson Mass, Edson Gesualdo e Paulo Roberto Veronese por sanarem minhas dúvidas que surgiam durante o desenvolvimento do projeto.

À Universidade de São Paulo por me proporcionar uma formação acadêmica de qualidade.





## Resumo

MANCERA, T. **Afinador digital para violão e guitarra elétrica implementado em um dispositivo FPGA**. Trabalho de conclusão de curso de engenharia elétrica com ênfase em eletrônica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

O projeto consiste no desenvolvimento de um afinador digital para instrumentos de cordas, mais especificamente violão e guitarra elétrica, no qual toda lógica de controle e correlação entre a frequência medida e uma nota musical é feita por um FPGA (*field-programmable gate array*). O som emitido pelo instrumento é captado por um microfone e condicionado por um circuito analógico. O sinal condicionado é enviado ao FPGA, o qual é responsável pela medição da frequência e a indicação, através de uma interface com LEDs (*light emitting diode*) e um display, da afinação da nota medida.

Palavras-chave: afinador, filtros, FPGA e VHDL.



## **Abstract**

MANCERA, T. **Digital tuner for guitar and electric guitar implemented in FPGA device**. Senior research project in electrical engineering with emphasis on electronics of the Escola de Engenharia de São Carlos (School of Engineering of São Carlos), Universidade de São Paulo (University of São Paulo), 2013.

The project consists in developing a digital tuner for string instruments (more specifically guitar and electric guitar), with all control logic and correlation of measured frequency with a musical note is made by an FPGA. The sound emitted by the instrument is picked up by a microphone and conditioned by an analog circuit. The conditioned signal is sent to the FPGA, which is responsible for measuring the frequency and indication, through LEDs and an interface with a display, the pitch of the measured note.

Keywords: tuner, filter, FPGA and VHDL.



## Lista de Figuras

Figura 1 - Diferentes formas de ondas para diferentes fontes de som [7] .....	25
Figura 2 - Envelope sonoro representado em um gráfico intensidade x tempo .....	26
Figura 3 - Ganho dos filtros ideais tipo passa-baixas (a), passa-altas (b), passa-faixa (c) e rejeita-faixa (d).....	27
Figura 4 - Diagrama de tolerância para um filtro passa-baixas prático .....	28
Figura 5 - Diagrama de blocos do afinador .....	29
Figura 6 - Diagrama de blocos do circuito analógico .....	29
Figura 7 – Microfone de eletreto, com seu esquema elétrico, e circuito de polarização [11].....	30
Figura 8 - Esquema elétrico da polarização do microfone, do filtro RC passa-baixas e do amplificador não-inversor .....	30
Figura 9 - Filtros RC passa-baixas cascadeados .....	31
Figura 10 - Filtro passa-altas.....	31
Figura 11 - Circuito comparador com histerese (a), retificador (b) e divisor resistivo (c).....	33
Figura 12 - Circuito de interface com o usuário .....	34
Figura 13 - Diagrama de blocos do circuito configurado no FPGA .....	34
Figura 14 - Diagrama de blocos do circuito de medição do período .....	35
Figura 15 - Diagrama de blocos do circuito detector de transição.....	36
Figura 16 - Diagramas de bloco do circuito de identificação da nota e da afinação .....	36
Figura 17 - Divisão da faixa de referência em intervalos menores.....	37
Figura 18 - Diagrama de blocos do circuito de indicação das notas e da afinação .....	38
Figura 19 - Representação das classes de tom (sem sustenido) no display de sete segmentos.....	38
Figura 20 - Saídas do amplificador (laranja) e do filtro (azul) quando G3 é emitida .....	40
Figura 21 - Saídas do comparador (laranja) e do divisor (azul) quando G3 é emitida .....	40
Figura 22 - Saída do filtro quando a nota E2 é emitida.....	41
Figura 23 - Saída do circuito analógico quando a nota E2 é emitida, após a estabilização .....	42
Figura 24 - Afinador comercial utilizado .....	43
Figura 25 - Saída do FPGA para 219,42 Hz .....	43
Figura 26 - Saída do FPGA para 232,67 Hz .....	44
Figura 27 - Saída do FPGA para 269,81 Hz .....	44
Figura 28 - Filtro testado para melhoria do circuito .....	45
Figura 29 - Saídas do amplificador (azul) e do filtro (laranja) quando a nota E2 é emitida, após a adição dos filtros passa-baixas .....	46



## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Notas na enésima oitava .....	24
Tabela 2 - Notas da afinação padrão .....	32
Tabela 3 - Frequências medidas para as duas fontes emissoras, para cada nota emitida .....	39
Tabela 4 - Comparação dos valores medidos para o violão, considerando-se as notas E3 e A3 .....	39





## Lista de Simbolos

Hz	hertz
dB	decibél
k $\Omega$	quilo-ohm
nF	nano-faraday
mV	mili-volt
V	volt
$\Omega$	ohm
$\mu$ s	micro-segundos



## Sumário

1.	Introdução.....	21
1.1.	<i>Organização da monografia</i> .....	21
1.2.	<i>Motivação</i> .....	21
1.3.	<i>Objetivos do trabalho</i> .....	21
2.	Revisão Teórica .....	23
2.1.	<i>Notas musicais</i> .....	23
2.2.	<i>Timbre</i> .....	25
2.3.	<i>Filtros</i> .....	26
3.	Metodologia e Desenvolvimento .....	29
3.1.	<i>Circuito analógico</i> .....	29
3.1.1.	<i>Captação do som</i> .....	30
3.1.2.	<i>Filtragem</i> .....	31
3.1.3.	<i>Condicionamento</i> .....	33
3.1.4.	<i>Interface com o usuário</i> .....	33
3.2.	<i>Configuração do FPGA</i> .....	34
3.2.1.	<i>Medição da frequência</i> .....	35
3.2.2.	<i>Identificação da nota e da afinação</i> .....	36
3.2.3.	<i>Indicação da nota e da afinação</i> .....	37
4.	Resultados.....	39
4.1.	<i>Teste do circuito analógico</i> .....	39
4.2.	<i>Teste do circuito configurado no FPGA</i> .....	42
4.3.	<i>Teste final</i> .....	45
5.	Conclusão .....	47
5.1.	<i>Sugestões</i> .....	47
	Referências .....	49
	Apêndice A – Esquema elétrico do circuito analógico .....	51
	Apêndice B – Placa de circuito impresso .....	53
	Apêndice C – Descrições de <i>hardware</i> em VHDL .....	55
	Apêndice D – Circuito RTL .....	59
	Apêndice E – Fotografia do sistema montado .....	61



# **1. Introdução**

## ***1.1. Organização da monografia***

O trabalho está dividido em cinco capítulos, os quais estão estruturados da seguinte forma:

1. Introdução: Apresenta a forma como o trabalho está organizado, a motivação e os objetivos principais do trabalho.
2. Revisão Teórica: Contém a revisão dos assuntos principais utilizados para o desenvolvimento do projeto. A primeira seção discorre sobre notas musicais, a segunda sobre timbre e a terceira sobre filtros.
3. Metodologia e Desenvolvimento: Descreve os passos utilizados para o desenvolvimento do projeto.
4. Resultados: Apresenta os testes realizados, assim como os resultados obtidos e uma breve discussão sobre os erros observados.
5. Conclusão: Apresenta as conclusões obtidas e sugestões para melhorias futuras.

Anexados ao final do trabalho, estão os apêndices, sendo que os apêndices A e B apresentam o esquemático de todo o circuito analógico e o projeto da placa de circuito impresso, respectivamente. Enquanto que nos apêndice C e D estão presentes todos os códigos em VHDL utilizados para configuração do FPGA e o circuito RTL. No apêndice E apresenta-se uma fotografia do sistema montado.

## ***1.2. Motivação***

A motivação para desenvolver esse trabalho surgiu nas aulas de eletrônica digital onde são utilizados protótipos de circuitos reais para o aprendizado de eletrônica digital, como o mini elevador, relógio digital, cofre digital, etc. O objetivo é estimular o interesse pela eletrônica digital possibilitando aos alunos projetarem o controle desses equipamentos, visualizando seu funcionamento como de um projeto real. Esses projetos envolvem varias áreas da eletrônica fornecendo uma visão multidisciplinar. O aluno pode participar do processo ensino/aprendizado sugerindo o desenvolvimento de protótipos de seu interesse. Desta forma, foi sugerido o desenvolvimento de um afinador, equipamento amplamente utilizado por músicos e instrumentistas, servindo como uma aplicação prática do frequencímetro projetado nas aulas, nas quais um gerador de sinais é utilizado para gerar o sinal de entrada do frequencímetro. O afinador possibilitará que os alunos captem um som real, eliminando-se a necessidade de simulá-lo no gerador de sinais.

## ***1.3. Objetivos do trabalho***

O trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um afinador que seja capaz de captar o som, emitido por uma guitarra ou violão, identificar a nota correspondente e indicar sua afinação. Apesar de não ser a única forma de se projetar um afinador, o projeto também tem como objetivo a implementação em FPGA, uma vez que nas aulas de eletrônica digital os alunos deverão fazer a configuração do dispositivo.



## 2. Revisão Teórica

Para o desenvolvimento do projeto, foi realizado o estudo de vários assuntos, dos quais destacam-se: notas musicais, timbre e filtros.

### 2.1. Notas musicais

No âmbito da teoria musical, nota é o nome dado a um dos elementos básicos de um som, o qual representa a altura. Fisicamente, altura de um som é o valor da frequência fundamental da onda propagante. Para a identificação de uma nota, ou frequência, são utilizados dois identificadores: a **classe de tom** (ou classe de altura) à qual ela pertence e a **oitava** na qual ela se encontra [1].

Classe de tom indica um conjunto de todos os tons que possuem uma multiplicidade  $2^n$  entre si, onde  $n$  é um inteiro que indica quantas oitavas de diferença há entre dois tons. Essa classificação é feita desta forma devido ao fato de que a percepção humana para tons é periódica, ou seja, notas de uma mesma classe de tom são percebidas de forma similares [2]. Classes de tom são identificadas com nomes, que, de acordo com a região do planeta, possuem um próprio sistema de nomenclatura. No Brasil, oficialmente, as notas são nomeadas com as sílabas Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si, porém a notação norte-americana é usualmente empregada, na qual se utilizam as letras de A a G, com a seguinte correlação: Dó – C, Ré – D, Mi – E, Fá – F, Sol – G, Lá – A e Si – B.

Ainda sobre as classes de tom, um conceito importante a ser visto é o de acidentes. A sequência de notas Dó – Ré – Mi – Fá – Sol – Lá – Si – Dó, nesta ordem, define o que é chamada de escala cromática, no caso a escala cromática de Dó. Ao observar as frequências das notas dentro da escala é possível perceber que os valores não crescem de forma igual de nota para nota. Além disso, ao observar outra sequência, por exemplo Ré – Mi – Fá – Sol – Lá – Si – Dó – Ré, percebe-se que a variação da frequência se mostra de forma diferente da escala anterior. Dentro de outras utilizações, acidentes servem para modificar a altura das notas, de tal forma a obter-se mais classes de tons, e assim, definir intervalos padrões entre as classes. Na notação musical, acidentes são representados pelos símbolos  $\sharp$  (sustenido) e  $\flat$  (bemol), sendo que o sustenido representa um aumento de meio tom em cima da nota modificada, e o bemol representa uma diminuição de meio tom [3]. Por exemplo, um Sol aumentado de meio tom, escreve-se  $G\sharp$  ou (Sol $\sharp$ ), e um diminuído,  $G\flat$  (Sol  $\flat$ ). Para simplificação, será utilizada a seguinte notação:  $\sharp$  para sustenido e  $\flat$  para bemol.

A oitava é o nome dado ao intervalo entre uma nota e outra cuja frequência é o dobro ou a metade da primeira. Por exemplo, uma oitava acima significa o dobro da frequência, duas oitavas, o quádruplo, e assim por diante. Por outro lado, uma oitava abaixo significa a metade, duas oitavas, o quarto, etc. Para uma identificação da oitava onde uma nota está, é estabelecido que a oitava entre a nota Dó de frequência 32,7 Hz, e a nota Si de 61,74 Hz, define a primeira oitava, segundo a notação SPN (*scientific pitch notation*) [4] [5].

A partir da primeira oitava, chega-se então na segunda, terceira, e assim por diante. A indicação da oitava faz-se por um número após a indicação da classe do tom. Portanto representa-se, por exemplo, um Lá na quinta oitava como A5 ou Lá 5, e este é um Lá mais agudo do que A4 e mais grave do que A6. Desta forma, a Tabela 1 apresenta as notas dentro de uma oitava n qualquer, onde  $k = n - 1$ . Todas com um intervalo de meio tom entre si.

**Tabela 1 - Notas na enésima oitava**

Bk	Cn	C#n	Dn	D#n	En	Fn	F#n	Gn	G#n	An	A#n	Bn	Utilizando-se sustenido
Bk	Cn	Dbn	Dn	Ebn	En	Fn	Gbn	Gn	Abn	An	Bbn	Bn	Utilizando-se bemol

Nota-se da Tabela 1 que não foram indicados E#n, B#n, Fbn e Cbn. Isto se deve ao fato de que no par E#n - Fn, as duas notas são a mesma, ou seja, representam a mesma frequência. O mesmo acontece para os pares B#n - Cn, E - Fb e Bn - Cbn. Além disso, ao comparar a oitava escrita em sustenido e a oitava escrita em bemol, notam-se as mesmas relações de igualdade entres os pares C#n - Dbn, D#n - Ebn, F#n - Gbn, G#n - Abn e A#n - Bbn. Ou seja, pode-se representar a frequência de 46,25 Hz como um F#1 ou um Gb1, por exemplo.

Por fim, basta saber os valores de frequências das notas e como calculá-los, sendo assim possível identificar qual nota o afinador está captando. Assim como é estipulado uma referência para as oitavas, estabeleceu-se um valor de referência para a frequência das notas, que é o Lá de 440Hz, o qual encontra-se na quarta oitava (A4). A partir deste valor, é possível calcular a frequência (f) para qualquer nota (X) através da expressão (1):

$$f_X = 2^{n/12} \cdot 440 \text{ [Hz]} \quad (1)$$

onde n é um número inteiro que representa quantos intervalos de meio-tom há entre a nota Lá 440Hz e a nota X. A fórmula é válida também para uma nota que seja mais grave que A4, bastando utilizar valores negativos para n. A seguir, são apresentados dois exemplos de cálculo.

- Cálculo da frequência representada por C#5 (Dó sustenido na quinta oitava), representado na expressão (2): C#5 encontra-se a quatro intervalos de meio-tom de A4, portanto  $n = 4$ , e assim:

$$f_{C\#5} = 2^{4/12} \cdot 440 \cong 1,1225 \cdot 440 = 554,36 \text{ Hz} \quad (2)$$

- Cálculo da frequência representada por A2 (Lá na segunda oitava), representado na expressão (3): A2 encontra-se a duas oitavas abaixo de A4, ou em meios-tons, a 24 intervalos de meio-tom abaixo de A4. Portanto  $n = -24$  e assim:

$$f_{A2} = 2^{-24/12} \cdot 440 = 0,25 \cdot 440 = 110 \text{ Hz} \quad (3)$$



## 2.2. Timbre

Assim como foi mencionado na seção 2.1, uma nota representa a frequência de um som, mais especificadamente a frequência fundamental, e que é apenas uma das características de um som. Outra característica importante a ser vista é o timbre.

Timbre é a característica sonora que torna possível a identificação da fonte emissora do som, e com isso, a distinção entre duas ou mais fontes que estejam emitindo uma mesma nota. Por exemplo, quando uma mesma nota é tocada por um piano e por um violino, pode-se identificar que os dois sons possuem a mesma frequência, mas com características sonoras distintas [6]. A caracterização do instrumento é feita pela sua forma de onda e seu envelope sonoro.

Quando qualquer objeto capaz de produzir sons entra em vibração, uma série de ondas senoidais é produzida. Além da frequência fundamental, várias frequências harmônicas também soam. Para cada fonte de som há uma distribuição de harmônicos que se mantém similar para qualquer nota emitida. Ao analisar-se um som no domínio do tempo, observa-se uma forma de onda característica para cada fonte. A Figura 1 ilustra diferentes formas de ondas [7].

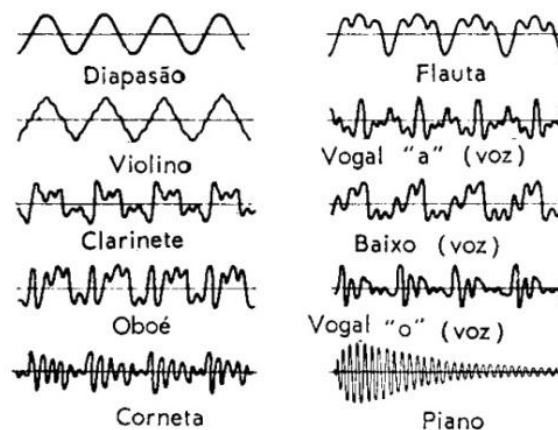


Figura 1 - Diferentes formas de ondas para diferentes fontes de som [7]

Envelope sonoro, ou envoltória sonora, é a característica temporal dos instrumentos, o qual indica como o som se comporta ao longo do tempo. O envelope sonoro pode ser dividido em quatro momentos: ataque, decaimento, sustentação e relaxamento. Sendo que:

- Ataque: é o começo do som.
- Decaimento: é a queda de intensidade ocorrida entre o ataque e a estabilização do som em alguns instrumentos.
- Sustentação: é o período de tempo onde a nota se mantém constante. Na maioria dos instrumentos esse período é controlável pelo executante.
- Relaxamento: é o término do som, no qual a intensidade do som diminui ao longo do tempo até o mesmo desaparecer por completo.

Os quatro momentos são representados no gráfico da Figura 2.

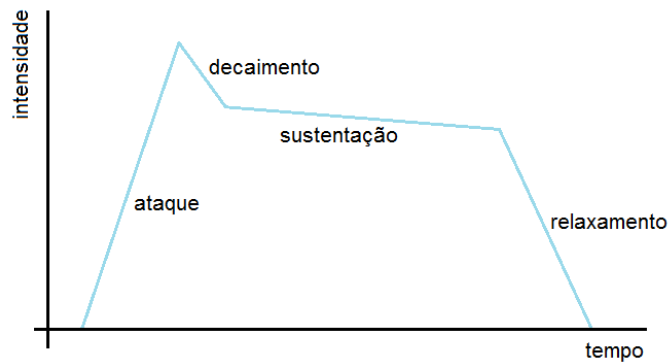


Figura 2 - Envelope sonoro representado em um gráfico intensidade x tempo

### 2.3. Filtros

De uma forma sucinta, pode-se descrever um filtro como um sistema que remove certas frequências de um sinal. Sendo que há quatro tipos básicos de filtros: passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa [8].

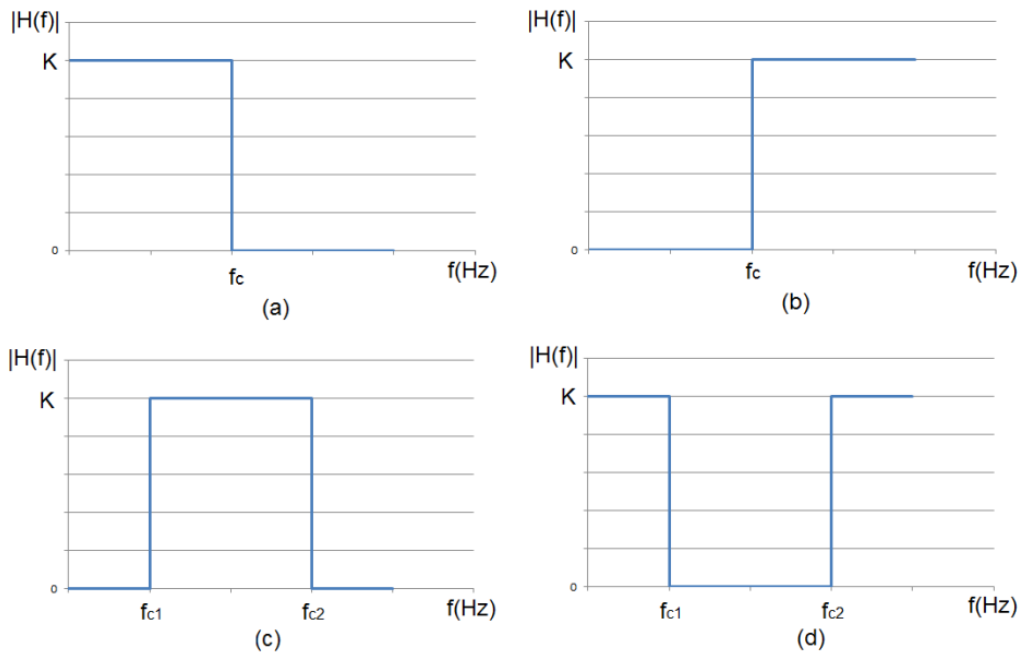
Matematicamente, filtros podem ser descritos através da função de transferência  $H(f)$  representada pela expressão (4).

$$H(f) = |H(f)| \angle \arg(H(f)) \quad (4)$$

onde  $|H(f)|$  é o módulo de  $H(f)$ , também chamado de ganho, e  $\arg(H(f))$  é o argumento de  $H(f)$ , ou fase. Além disso, definem-se três parâmetros: faixa de passagem, faixa de rejeição e faixa de transição. Sinais com frequências dentro de faixa de passagem são transmitidos com pouca ou nenhuma distorção, ao passo que aqueles que têm frequências dentro da faixa de rejeição são efetivamente rejeitados. Faixa de transição é o intervalo de frequência a qual separa as faixas de passagem e de rejeição [9].

Idealmente, filtros possuem um ganho constante ( $K$ ) na faixa de passagem, um ganho nulo na faixa de rejeição e uma faixa de transição abrupta. Ou seja, um filtro ideal apenas transmite frequências dentro da faixa de passagem, sem distorção e rejeita completamente todas as frequências dentro da faixa de rejeição.

Pode-se representar graficamente o ganho ideal dos quatro tipos básicos de filtros como indicado na Figura 3.



**Figura 3 - Ganho dos filtros ideais tipo passa-baixas (a), passa-altas (b), passa-faixa (c) e rejeita-faixa (d)**

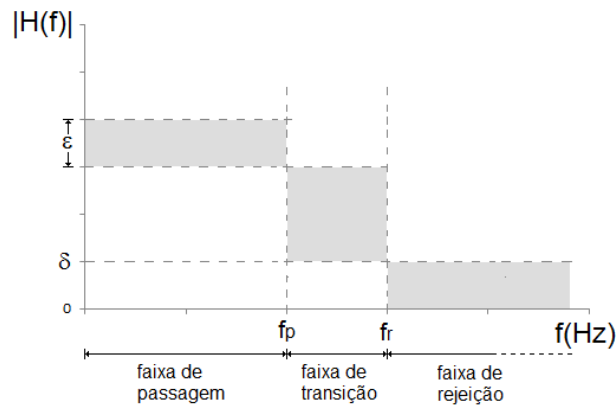
Observa-se nos gráficos da Figura 3 a presença de uma frequência  $f_c$ , que é chamada de frequência de corte. Frequência de corte é a frequência tal que, para valores inferiores ou superiores a ela, o sinal não é transmitido. Para os filtros tipo passa-faixa e rejeita-faixa são definidas duas frequências de corte: a frequência de corte inferior ( $f_{c1}$ ) e a frequência de corte superior ( $f_{c2}$ ). Define-se também a largura de faixa (BW) através da expressão (5).

$$BW = f_{c1} - f_{c2} \quad (5)$$

Porém, assim como mencionado anteriormente, estas são características de um filtro ideal, o que resulta em filtros não implementáveis. Na prática, a abordagem prudente para filtros é tolerar um nível aceitável de distorção, permitindo “desvios” da abordagem ideal. Desta forma, chega-se nas seguintes condições para filtros não ideais:

- Dentro da faixa de passagem, a resposta em módulo do filtro deve situar-se em um intervalo  $\varepsilon$ .
- Dentro da faixa de rejeição, a resposta em módulo do filtro não deve ultrapassar  $\delta$ .
- A largura da faixa de transição tem uma largura finita e não nula.

Portanto, considerando que  $f_p$  é a frequência de passagem e  $f_r$ , de rejeição, um filtro passa-baixas, por exemplo, possui o diagrama de tolerância para sua resposta em módulo, indicado na Figura 4:



**Figura 4 - Diagrama de tolerância para um filtro passa-baixas prático**

No caso de filtros práticos, a frequência de corte é definida como a frequência abaixo da qual ou acima da qual a potência na saída do filtro é reduzida a metade da potência da faixa de passagem. Em valores de ganho de tensão isto corresponde a uma redução de 29,3% ou de 3dB.

Além do diagrama de tolerância, destacam-se outros dois conceitos utilizados no estudo de filtros (mais especificamente para filtros passa-faixa): frequência de ressonância e fator de qualidade. Frequência de ressonância ( $f_0$ ) é a frequência com a qual o sinal de entrada do filtro é transmitido com ganho máximo. Fator de qualidade (Q), conceito válido também para filtros rejeita-faixa, indica a seletividade de um filtro, ou seja, a capacidade do filtro transmitir (ou rejeitar) uma faixa restrita de frequências. Em valores numéricos, fator de qualidade é definido segundo a expressão (6) abaixo [10].

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (6)$$

Dadas as condições para filtros práticos, existem dois passos a serem seguidos:

1. A busca por uma função de transferência racional que se aproxime das condições estabelecidas.
2. A aproximação desta função de transferência por um sistema físico.

A escolha de uma função de transferência é o passo mais fundamental no projeto de filtros, uma vez que é ela que determina o desempenho do filtro. A aproximação é basicamente um problema de otimização, no qual são estabelecidos critérios de qualidade que a aproximação deve obedecer. É importante ressaltar que não existe uma solução única para o problema, sendo que cada uma possui suas características distintivas. Dentre as soluções possíveis, existem algumas funções já conhecidas e consolidadas como, por exemplo, as funções de Butterworth, de Chebyshev e de Bessel-Thomson.

A aproximação por um sistema físico, em sistemas elétricos, é feita através de circuitos, que podem ser divididos em três tipos: filtros passivos, filtros ativos e filtros digitais. Filtros passivos são filtros nos quais estão presentes apenas componentes passivos, ou seja, resistores, capacitores e indutores. Filtros ativos são filtros que possuem elementos ativos em sua constituição, atualmente os amplificadores. Já os filtros digitais utilizam componentes digitais, realizando a conversão do sinal para um sinal digital.

### 3. Metodologia e Desenvolvimento

O projeto pode ser dividido em duas partes (Figura 5): circuito analógico, o qual abrange os circuitos de captação, de filtragem, de condicionamento e de interface com o usuário; e o circuito configurado no FPGA, utilizado para identificação da nota e de sua afinação.

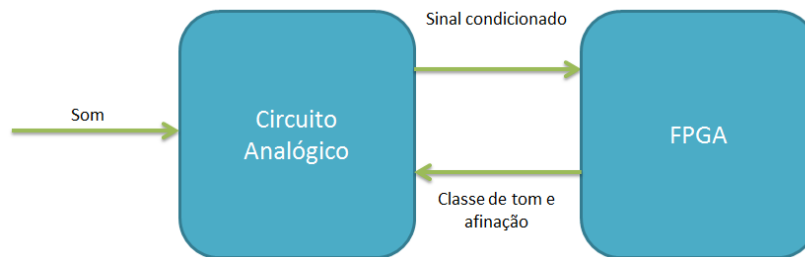


Figura 5 - Diagrama de blocos do afinador

O funcionamento do circuito consiste em captar o som, através de um microfone, transformando o sinal de áudio em sinal elétrico com a mesma frequência fundamental, forma de onda quadrada e níveis de tensão compatíveis com o FPGA. O circuito configurado no FPGA possibilita a medida do tempo decorrido entre duas bordas de subida desse sinal, identificando seu período (ou frequência). Com o valor de período conhecido, é feita a comparação entre este valor e os valores teóricos das notas. Através de LEDs e um display de sete segmentos, o circuito faz a indicação de qual nota está sendo emitida e o quanto afinada ela está.

O detalhamento de cada circuito é feita ao longo das seções a seguir.

#### 3.1. Circuito analógico

O circuito analógico consiste dos circuitos de captação do som, filtragem e condicionamento e de interface com o usuário, assim como indicado no diagrama de blocos da Figura 6. Para sua utilização no laboratório, foram adicionados ao circuito, conectores para alimentação (+9 V, terra e -9 V), além de conectores para os cabos de comunicação com o *kit*, conectores para os LEDs e conectores para o *display*. Para os amplificadores foi utilizado dois TL074, o qual possui quatro amplificadores operacionais.

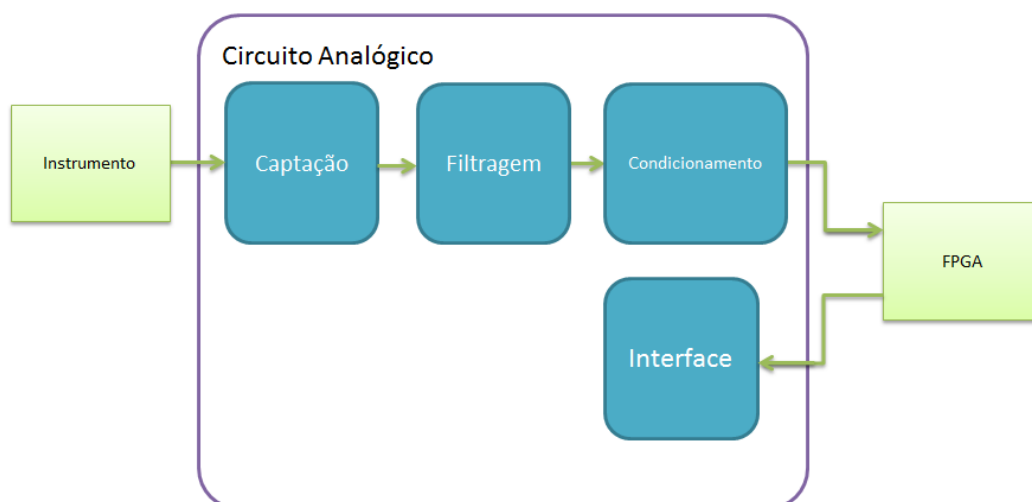


Figura 6 - Diagrama de blocos do circuito analógico

### 3.1.1. Captação do som

A Figura 7 mostra a foto e o esquema elétrico de um microfone de eletreto, que foi utilizado para captação do som, cujo funcionamento se baseia na variação da capacitância de um capacitor de placas paralelas (com uma placa móvel), e eletreto como dielétrico. Quando uma onda sonora atinge a placa móvel do capacitor, a distância entre as placas varia conforme a variação da pressão do som, variando assim a capacitância.

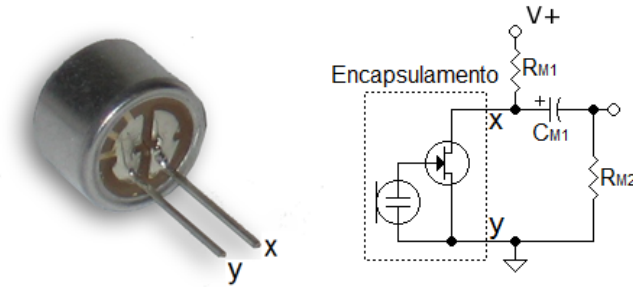


Figura 7 – Microfone de eletreto, com seu esquema elétrico, e circuito de polarização [11]

No esquema elétrico da Figura 7, pode se observar que o capacitor está ligado entre o *gate* e o *source* de um JFET (*junction gate field-effect transistor*), de tal forma que a tensão sobre o capacitor seja igual à V<sub>GS</sub> (tensão entre *gate* e *source*). Uma vez que a condução do JFET é controlada pela tensão V<sub>GS</sub>, variações na capacitância fazem com que a tensão sobre o capacitor varie, e assim, a condução do transistor também varia [11]. O correto funcionamento, do microfone é obtido através de sua polarização, e conseqüentemente da polarização do JFET, que é realizada através do resistor R<sub>M1</sub>. O capacitor C<sub>M1</sub> e o resistor R<sub>M2</sub> constituem um filtro passa-altas utilizado para filtrar o nível DC (*direct current*) da saída do microfone. Como a saída do microfone apresenta variações significativamente pequenas, foi necessário a utilização de um amplificador não-inversor, como indicado na Figura 8.

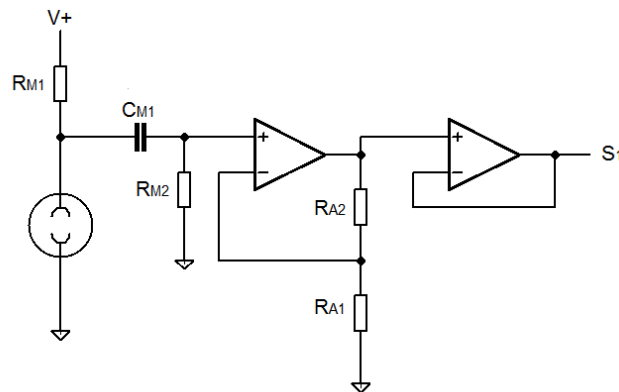


Figura 8 - Esquema elétrico da polarização do microfone, do filtro RC passa-baixas e do amplificador não-inversor

Para polarização utilizou-se R<sub>M1</sub> com o valor de 10 kΩ. Para o cálculo do filtro passa-altas, composto por C<sub>M1</sub> e R<sub>M2</sub>, utilizou-se a expressão (7) para uma frequência de corte em torno de 30 Hz, obtendo-se os valores comerciais de 470 nF e 10 kΩ para C<sub>M1</sub> e R<sub>M2</sub>, respectivamente.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7)$$

Quanto ao amplificador não-inversor, mediu-se que a amplitude do sinal de saída do filtro, ou sinal de entrada do amplificador ( $V_i$ ), é em média 50 mV; e considerou-se uma amplitude de saída do amplificador ( $V_o$ ) de 9 V (tensão de alimentação). Utilizando-se a expressão, foram obtidos os valores comerciais de 270  $\Omega$  e 56 k $\Omega$  para os resistores  $R_{A1}$  e  $R_{A2}$ , respectivamente.

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(1 + \frac{R_{A2}}{R_{A1}}\right) \quad (8)$$

### 3.1.2. Filtragem

A escolha do instrumento para qual o afinador será usado é determinante para o projeto do filtro, uma vez que cada instrumento possui sua faixa de frequências emitidas.

O sinal na saída  $S_1$  apresentou ruídos elétricos, ruídos sonoros e de harmônicos, impossibilitando a obtenção dos níveis de transição para o comparador. Para correção desses problemas foi utilizado um filtro. Durante o desenvolvimento, foram testadas algumas topologias de filtros como Sallen-Key, filtro biquadrático e filtro de variável de estado. Porém, o filtro que apresentou os melhores resultados foi o filtro constituído de filtros RC cascadeados, sendo que os dois primeiros são filtros passa-baixas (Figura 9) e o terceiro, filtro passa-altas (Figura 10), com seguidores de tensão na saída de cada filtro para redução de efeitos de carregamento. O filtro RC passa-altas foi utilizado para eliminação de componentes de baixa frequência do sinal.

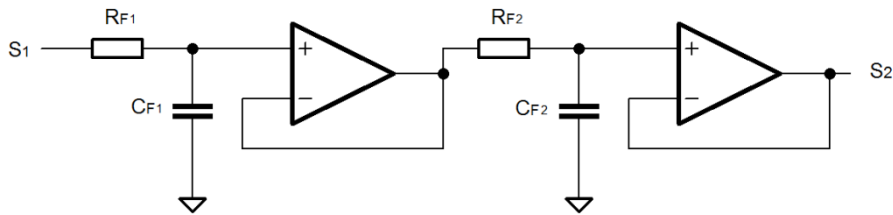


Figura 9 - Filtros RC passa-baixas cascadeados

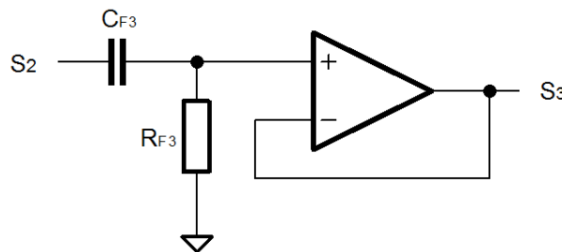


Figura 10 - Filtro passa-altas

Considerando-se que o primeiro harmônico corresponde ao dobro da frequência fundamental e é o harmônico mais significativo (com maior amplitude), projetou-se o filtro de tal forma que o ganho para uma frequência qualquer seja satisfatoriamente maior do que o ganho para dobro dessa mesma frequência. Como a menor frequência emitida por uma guitarra, ou um violão, é de 73,42 Hz, o filtro foi projetado para que a frequência de 146,84 Hz seja atenuada.

Desta maneira, para qualquer som emitido que possua uma frequência fundamental superior a 73,42 Hz, os harmônicos são atenuados.

Para a escolha da frequência de corte do filtro, analisou-se a faixa de frequências fundamentais emitidas pelos instrumentos, observando que a guitarra emite frequências entre 73,42 Hz e 1316,5 Hz, e o violão, entre 73,42 Hz e 987,77 Hz [12]. Como o filtro projetado é suficientemente seletivo para as faixas mencionadas, há a necessidade de se variar a frequência de corte, de tal maneira que todas as frequências emitidas sejam transmitidas.

Porém, ambos os instrumentos, na sua afinação padrão (usualmente utilizada), emitem frequências em uma faixa mais restrita. Considerando-se que a afinação de uma corda da guitarra, ou violão, baseia-se na nota emitida pela corda quando esta é tocada solta, a afinação padrão possui a relação indicada pela Tabela 2.

**Tabela 2 - Notas da afinação padrão**

Corda	Nota
6 <sup>a</sup> (mais grossa)	E2 (82,41 Hz)
5 <sup>a</sup>	A2 (110 Hz)
4 <sup>a</sup>	D3 (146,85 Hz)
3 <sup>a</sup>	G3 (195,99 Hz)
2 <sup>a</sup>	B3 (246,94 Hz)
1 <sup>a</sup> (mais fina)	E4 (329,63 Hz)

É comum os instrumentos também serem afinados meio-tom ou até um tom abaixo da afinação padrão. Desta forma, observando-se que a 6<sup>a</sup> corda (a qual emite as menores frequências), afinada um tom abaixo, emite notas a partir de 73,42 Hz, obtêm-se uma nova faixa de frequências contendo frequências entre 73,42 Hz e 329,63 Hz. Utilizando-se essa nova faixa, experimentalmente foi observado que apenas um valor de frequência de corte é o suficiente para que o circuito transmita todas as frequências dentro desta faixa.

Projetando os filtros passa-baixas para uma frequência de corte de 73,42 Hz e o filtro passa-altas pra uma frequência de corte de 30 HZ, as expressões (9), (10), (11) e (12) indicam os valores comerciais obtidos para os componentes passivos.

$$R_{F1} = R_{F2} = R_F = 22 \text{ k}\Omega \quad (9)$$

$$R_{F3} = 10 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

$$C_{F1} = C_{F2} = C_F = 100 \text{ nF} \quad (11)$$

$$C_{F3} = 470 \text{ nF} \quad (12)$$



### 3.1.3. Condicionamento

Após a filtragem foi realizado o condicionamento analógico do sinal utilizando um comparador com histerese, um circuito retificador e um divisor resistivo, mostrados na Figura 11 (circuitos “a”, “b” e “c” respectivamente), para transformar o sinal em onda quadrada com níveis de tensão compatíveis com circuitos digitais.

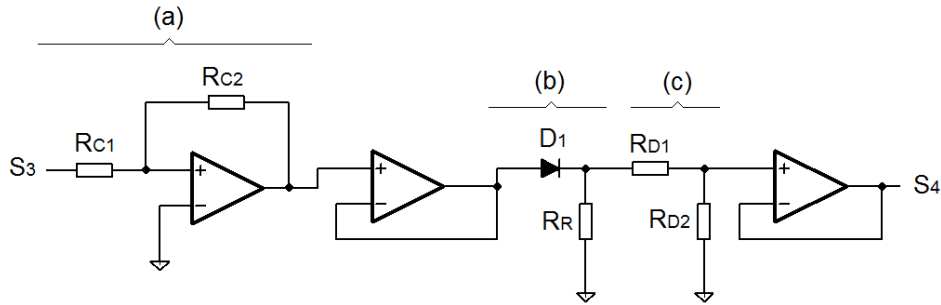


Figura 11 - Circuito comparador com histerese (a), retificador (b) e divisor resistivo (c)

Para o cálculo dos componentes do comparador não-inversor, utilizaram-se as expressões (13) e (14), onde  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  são as tensões de transição superior e inferior, respectivamente, e  $V_{SATH}$  e  $V_{SATL}$  são as tensões de saturação superior e inferior, respectivamente. Considerando que  $V_{SATH}$  e  $V_{SATL}$  são aproximadamente iguais às tensões de alimentação do comparador ( $\pm 9V$ ) e que as tensões  $V_{TH}$  e  $V_{TL}$  pretendidas são  $\pm 200\text{ mV}$ , obteve-se os valores comerciais de  $910\ \Omega$  e  $39\text{ k}\Omega$  para  $R_{C1}$  e  $R_{C2}$ , respectivamente.

$$V_{TH} = \frac{R_{C1}}{R_{C1} + R_{C2}} V_{SATH} \quad (13)$$

$$V_{TL} = \frac{R_{C1}}{R_{C1} + R_{C2}} V_{SATL} \quad (14)$$

Quanto ao retificador, utilizaram-se um diodo 1N4148 e um resistor ( $R_R$ ) de  $100\text{ k}\Omega$ .

Por fim, para o divisor resistivo, obteve-se os valores comerciais de  $56\text{ k}\Omega$  e  $100\text{ k}\Omega$  para  $R_{D1}$  e  $R_{D2}$ , respectivamente, utilizando-se a expressão (15) na qual  $V_{IN}$  é aproximadamente  $8\text{ V}$  e  $V_{OUT}$  é igual a  $5\text{ V}$ .

$$V_{OUT} = \frac{R_{D2}}{R_{D1} + R_{D2}} V_{IN} \quad (15)$$

### 3.1.4. Interface com o usuário

O circuito de interface é constituído de quatro LEDs, utilizados para indicação da afinação e de sustenido, e de um *display* de sete segmentos que indica a classe de tom (sem sustenido). Para alimentação da interface utilizou-se a alimentação do FPGA ( $V_{CCINT}$ ), através de um dos fios do cabo de comunicação com o kit. Uma vez que a corrente contínua máxima suportada pelo dispositivo é de  $25\text{ mA}$ , e a tensão de alimentação é igual a  $5\text{ V}$ , resistores de  $220\ \Omega$  foram

utilizados em serie com os LEDs e com *display* para limitação da corrente, assim como indicado na Figura 12 [13].

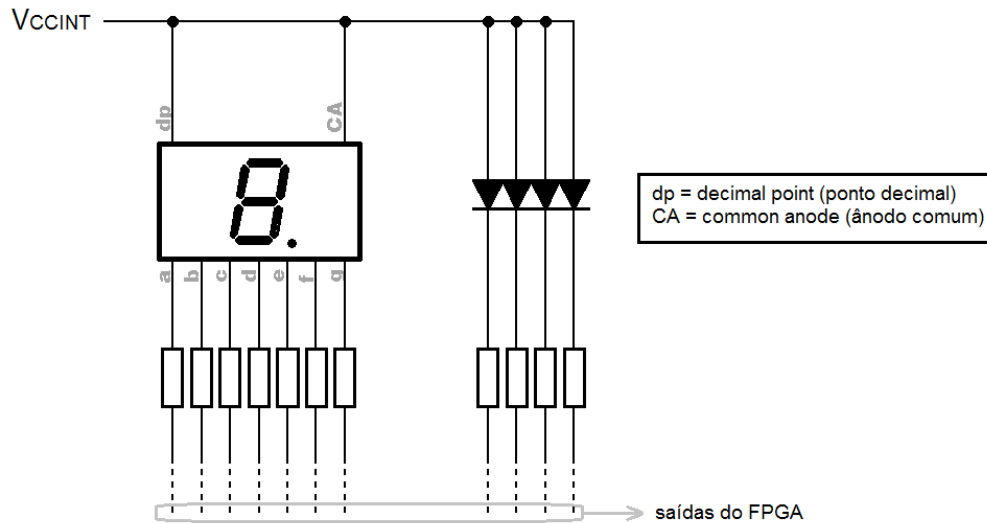


Figura 12 - Circuito de interface com o usuário

### 3.2. Configuração do FPGA

Como citado na seção 1.3, o projeto tem como requisito a utilização de um FPGA para síntese de um circuito cujas funções são identificar a frequência do sinal de entrada (onda quadrada), a nota correspondente a esta frequência e seu grau de afinação, indicando-os através de LEDs e um *display* de sete segmentos. Para a configuração do dispositivo, foi utilizada a linguagem VHDL (**V**ery **H**igh **S**peed **I**ntegrated **C**ircuit **H**ardware **D**escription **L**anguage) como linguagem de descrição de *hardware*, com os códigos gerados e compilados utilizando-se o software Quartus II 9.0 *Web Edition* da Altera [14].

O circuito configurado no FPGA pode ser representado através de um diagrama de blocos, como indicado na Figura 13, sendo que cada bloco será descrito ao longo das seções 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

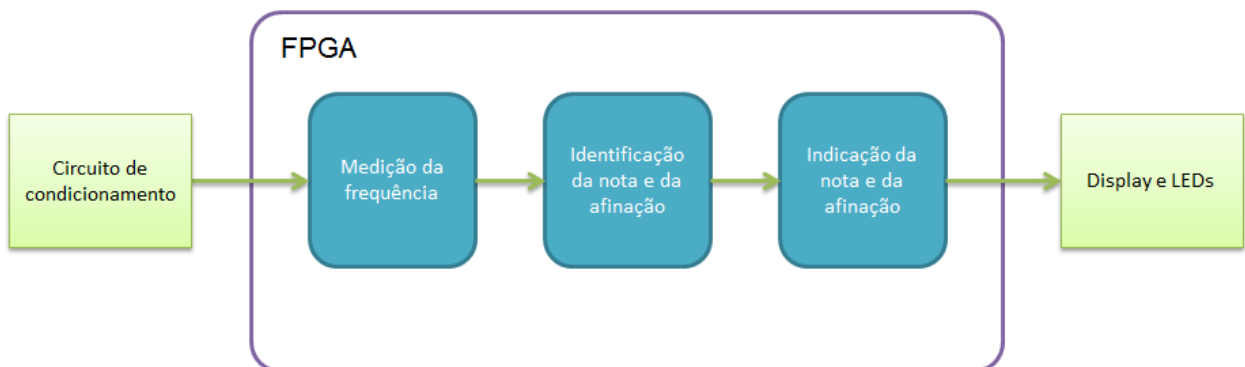


Figura 13 - Diagrama de blocos do circuito configurado no FPGA

### 3.2.1. Medição da frequência

Uma vez que as grandezas frequência e período são relacionadas através da expressão (16), é possível identificar as notas musicais a partir de seus períodos ao invés da frequência. Sendo assim, configurou-se o circuito representado pelo diagrama de blocos da Figura 14.

$$f = \frac{1}{T} \quad (16)$$

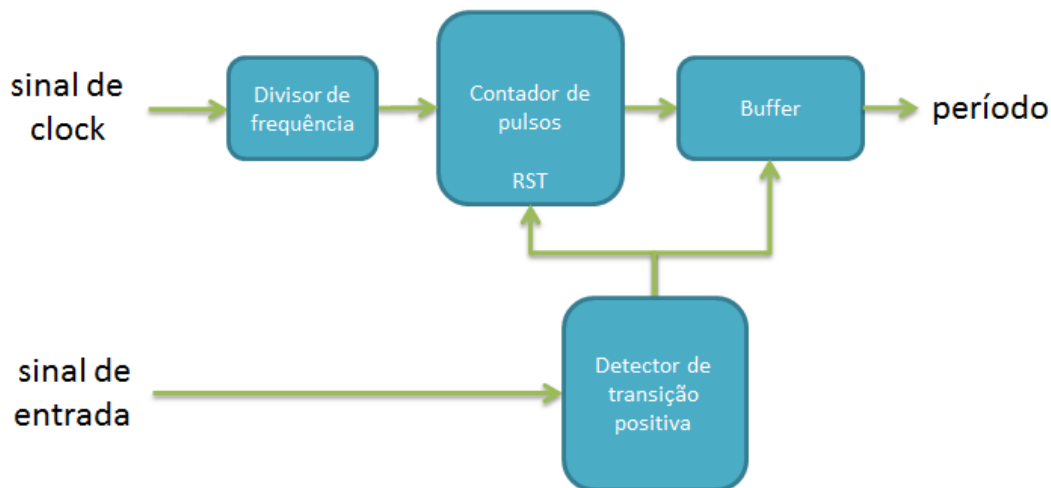


Figura 14 - Diagrama de blocos do circuito de medição do período

Na Figura 14, o sinal de *clock*, gerado por um oscilador presente no *kit*, é dividido para a obtenção de um sinal de *clock* com uma frequência de 1 MHz. O sinal dividido é ligado na entrada de um contador de pulsos, de tal forma que uma contagem de *n* pulsos corresponda a um tempo de *n* microssegundos ( $\mu s$ ). Um sinal de entrada, correspondente ao sinal de saída do circuito de condicionamento (saída  $S_4$  na Figura 11), é ligado em um detector de transição, o qual gera um pulso toda vez que ocorrer uma transição positiva. Ligando-se a saída do detector de transição como sinal de *reset* do contador de pulsos, ocorrerá a contagem do número de pulsos gerados entre duas transições positivas do sinal de entrada e assim, obtém-se seu período em microssegundos.

Na saída do contador de pulsos (Figura 14) ligou-se um *buffer*, de tal maneira que a contagem presente seja armazenada toda vez que o bloco for reinicializado.

Para a construção do bloco detector de transição, foram configurados no FPGA um monoestável e um *latch* tipo D conforme indicado no diagrama de blocos da Figura 15:

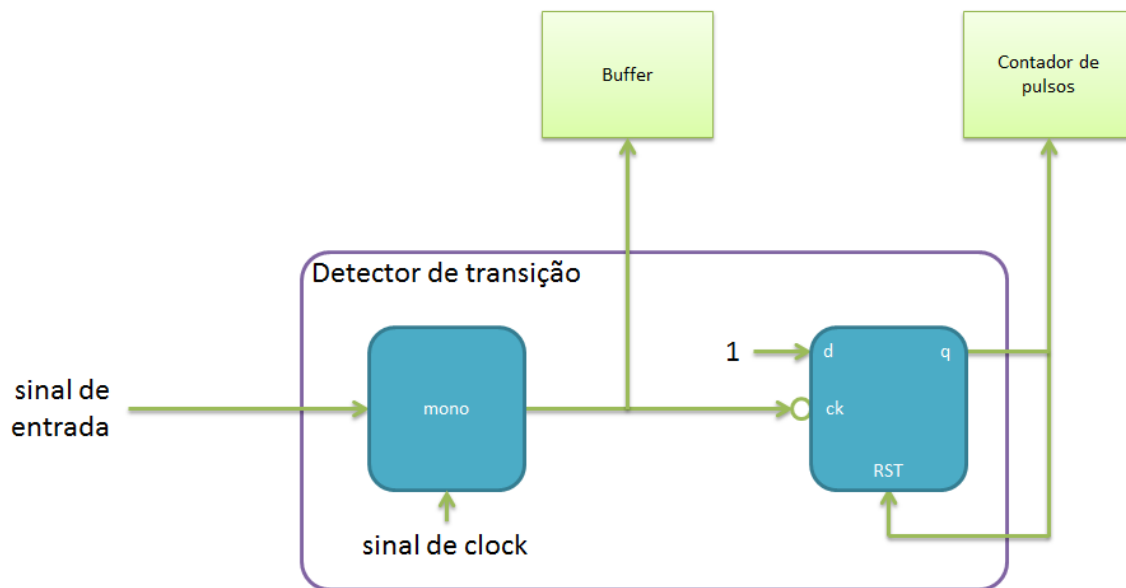


Figura 15 - Diagrama de blocos do circuito detector de transição

O sinal de entrada, na Figura 15, é ligado ao monoestável, o qual fica ativo por apenas um pulso do sinal de *clock*. A saída do monoestável é ligada invertida no *clock* do *latch*, de tal forma que o *latch* seja sensível às transições negativas do sinal do monoestável. Com a entrada do *latch* fixa no nível lógico 1, sua saída muda para o mesmo nível quando ocorre uma borda de descida no sinal do monoestável. Porém, retorna ao nível lógico 0, quase que instantaneamente, uma vez que a saída do *latch* está ligada no *reset* do próprio circuito. Liga-se então a saída do monoestável no *buffer*, e a saída do *latch* no contador, de tal maneira que o *buffer* seja ativado com a transição positiva do sinal do mono, e o contador seja ativado com a transição negativa do monoestável. Desta maneira, o *buffer* copia o valor do contador antes que este seja reinicializado.

### 3.2.2. Identificação da nota e da afinação

Ao analisar-se a faixa total de frequências emitidas pela guitarra, a qual é maior do que a faixa emitida pelo violão, é possível perceber que ela abrange 51 notas diferentes ou, em valores de oitavas, mais de 4 oitavas. Uma vez que, para a afinação, não se faz necessário a indicação da oitava na qual a nota está, decidiu-se identificar apenas a classe de tom do som emitido, simplificando o circuito configurado. Sendo assim, configurou-se o circuito cujo diagrama de blocos é indicado na Figura 16.

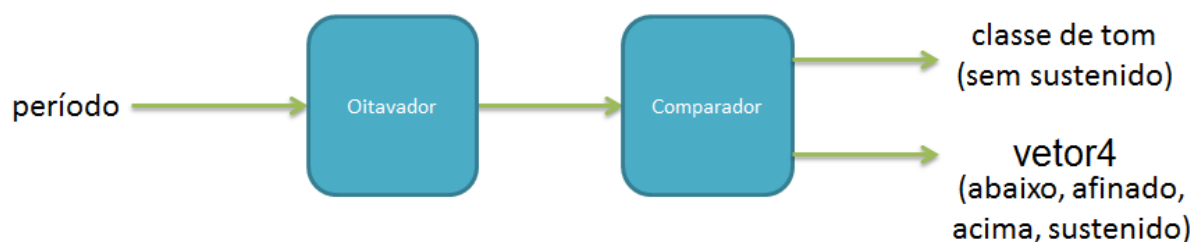


Figura 16 - Diagramas de bloco do circuito de identificação da nota e da afinação

Com a indicação da oitava descartada, estabeleceu-se uma faixa de períodos de referência para realizar as comparações, a qual pode ser representada pelo intervalo ]C2,D3[ ou, em valores de período, ]14430 $\mu$ s , 6810 $\mu$ s[. Dada esta faixa de referência, o circuito oitavador, da Figura 16, dobra valor do período da entrada quantas vezes forem necessárias para que o resultado pertença à faixa. Em termos de oitava, o circuito reduz a oitava da nota de entrada até que a mesma pertença à faixa. Com isso, a classe de tom é conservada para ser identificada pelo bloco comparador.

Para identificação da nota e do grau de afinação dividiu-se a faixa de referência como mostrado na Figura 17.



**Figura 17 - Divisão da faixa de referência em intervalos menores**

Apesar de as notas representarem valores específicos de frequência, delimitaram-se intervalos de valores próximos ao valor correto da nota, criando assim três graus de afinação: abaixo da nota, nota afinada e acima da nota. Com essa classificação, é possível perceber, por exemplo, que para valores de frequências muito acima do valor correto da nota D2, o som deixa de ser classificado como acima para ser classificado como abaixo, em relação à nota D#2. Nota-se também que há uma margem de tolerância para a classificação de afinado, ou seja, há um intervalo de valores que indicam o som como afinado, e não apenas um valor.

Sendo assim, o circuito comparador compara o valor do período “oitavado” com valores que delimitam estes intervalos, identificando a qual intervalo o período pertence. O circuito tem como saídas: a classe de tom (sem sustenidos); e um vetor de 4 *bits* (vetor4) indicando se o som está abaixo, afinado ou acima da nota, e também se a classe de tom é sustentida.

### ***3.2.3. Indicação da nota e da afinação***

Com a nota e a afinação identificadas, configurou-se um circuito, cujo diagrama de blocos está representado na Figura 18, para fazer a indicação ao usuário.

Cada *bit* do vetor4, gerado pelo bloco de identificação, é conectado a um pino de saída do FPGA, para ser ligado a um LED da placa do circuito analógico, de tal forma a identificar as afinações abaixo e acima (LEDs vermelhos), afinação correta (LED verde) e o sustentido (LED vermelho).

Quanto à indicação da classe de tom, decodificou-se o valor lido em uma palavra de 7 *bits*, enviada para o *display* de sete segmentos, de tal maneira que o *display* indique as classes como indicado na Figura 19.

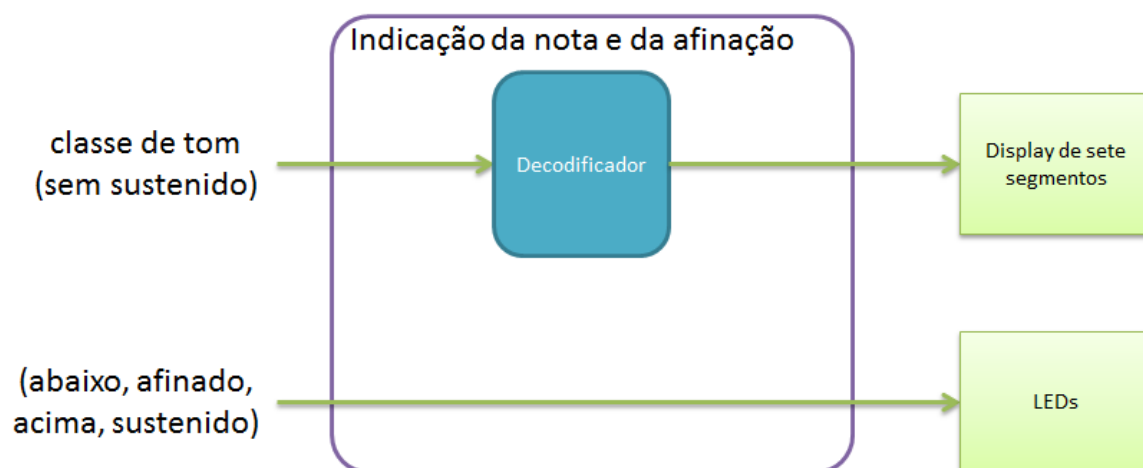


Figura 18 - Diagrama de blocos do circuito de indicação das notas e da afinação

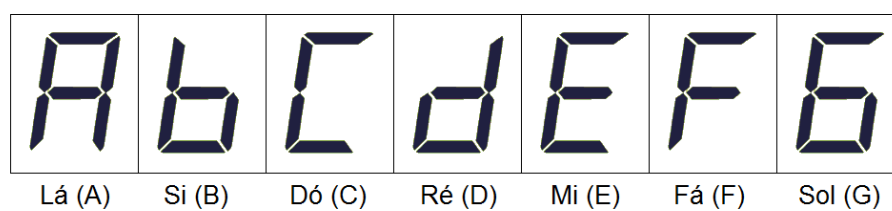


Figura 19 - Representação das classes de tom (sem sustenido) no display de sete segmentos

## 4. Resultados

O funcionamento do projeto foi verificado através do teste do circuito analógico e do circuito sintetizado no FPGA separadamente, e em seguida foi realizado o teste do funcionamento geral.

Para os testes do circuito analógico (seção 3.1), foram captadas as notas emitidas por um violão e por um aplicativo de um website que gera sons simulando um violão [15].

### 4.1. Teste do circuito analógico

O circuito foi testado para as notas da afinação padrão (E2, A2, D3, G3, B3 e E4), sendo que sua saída foi medida com um osciloscópio (Tektronix TDS 1002C-EDU, 60 MHz, 1 GS/s). Os valores mínimos e máximos de frequência medidos para cada nota emitida, assim como seus valores teóricos, são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Frequências medidas para as duas fontes emissoras, para cada nota emitida**

Nota emitida	Frequência teórica	Frequência medida				Erro porcentual			
		Violão		Aplicativo		Violão		Aplicativo	
		Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.
E2	82,41	151,5	178,6	82,64	83,33	83,84%	116,72%	0,28%	1,12%
A2	110	211,2	230,4	109,9	111,1	92,00%	109,45%	-0,09%	1,00%
D3	146,8	146,2	147,9	144,5	147,1	-0,41%	0,75%	-1,57%	0,20%
G3	198	196,6	204,9	195,3	198,4	-0,71%	3,48%	-1,36%	0,20%
B3	246,9	242,7	252,5	245,1	250	-1,70%	2,27%	-0,73%	1,26%
E4	329,6	-	-	328,9	333,3	-	-	-0,21%	1,12%

É possível observar da Tabela 3 que os valores de frequências medidos para as notas emitidas pelo aplicativo estão próximos aos valores teóricos, com erro máximo (em módulo) de 1,57% para a nota D3. Quanto aos valores medidos para o teste com o violão, notam-se valores altos de erros para as notas E2 e A2. Isto se deve ao fato de que o primeiro harmônico dessas notas, quando emitidas pelo violão, não é filtrado no circuito analógico, de tal forma que as frequências do sinal de saída do comparador correspondam às notas E3 e A3. Considerando as notas uma oitava acima (E3 e A3), os erros percentuais abaixam conforme indicado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Comparação dos valores medidos para o violão, considerando-se as notas E3 e A3**

Nota emitida	Frequência teórica	Frequência medida		Erro porcentual	
		Valor mín.	Valor máx.	Valor mín.	Valor máx.
E3	164,82	151,5	178,6	-8,08%	8,36%
A3	220	211,2	230,4	-4,00%	4,73%

Uma vez que para afinação as oitavas não são relevadas, pode se considerar os erros percentuais mostrados na Tabela 4.

Observa-se também da Tabela 3 que não são mostrados os valores de frequências medidos para a nota E4 emitida pelo violão. Isto se deve ao fato de que esta nota, quando emitida pelo violão, não possui intensidade suficiente para que o sinal de saída do filtro ative o comparador.

Para uma análise mais completa do comportamento do circuito, as saídas do amplificador, do filtro, do comparador e do divisor resistivo (saída do circuito analógico), para a nota D3, também foram medidas e indicadas nas Figuras Figura 20 e Figura 21.

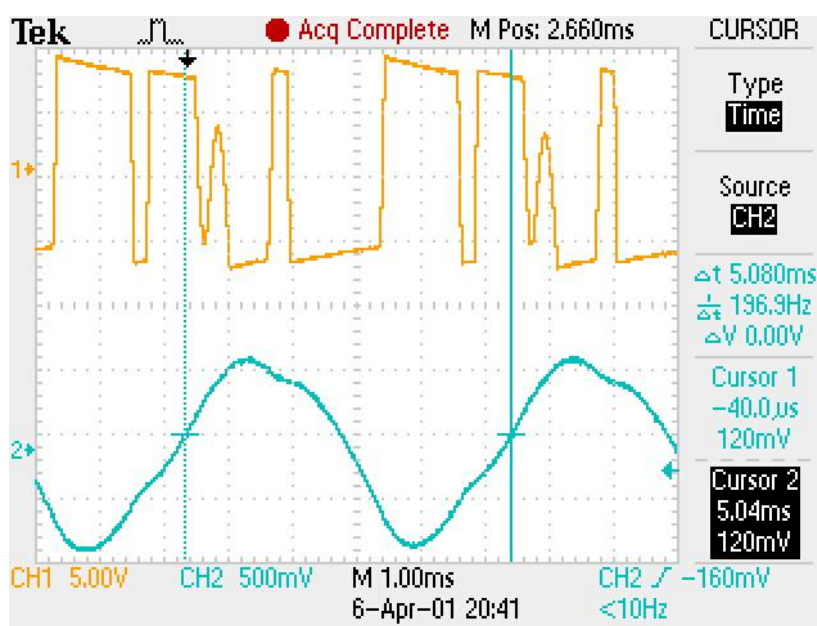


Figura 20 - Saídas do amplificador (laranja) e do filtro (azul) quando G3 é emitida

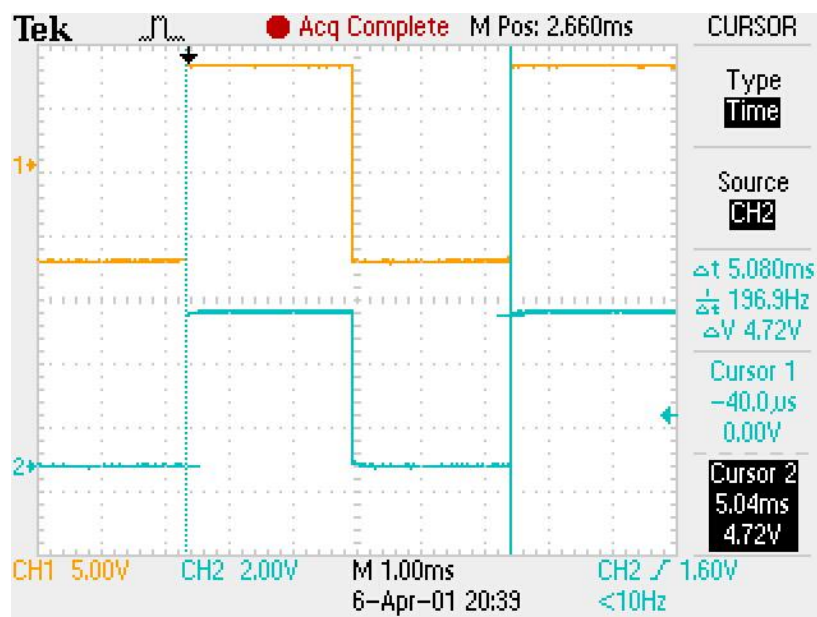


Figura 21 - Saídas do comparador (laranja) e do divisor (azul) quando G3 é emitida



Nota-se na Figura 20 que o filtro rejeitou os harmônicos do sinal de saída do amplificador (sinal laranja), obtendo-se um sinal aproximadamente senoidal (sinal azul). Na Figura 21, o sinal de saída do comparador (sinal laranja) apresenta-se como uma onda quadrada com frequência fundamental correspondente à nota emitida (G3), e é retificado e reduzido pelos circuitos retificador e divisor (sinal azul).

É válido ressaltar que, para ambas as fontes sonoras, as frequências medidas não se apresentaram nas faixas indicadas pela Tabela 3 durante toda duração das notas emitidas, observando-se uma grande variação dos valores de frequência antes de se estabilizarem.

Para as notas mais graves (E2 e A2), o filtro não é suficientemente seletivo para rejeitar todos harmônicos, de tal forma que, durante o início da nota, alguns harmônicos ainda são transmitidos junto com as frequências fundamentais, como é mostrado na Figura 22.

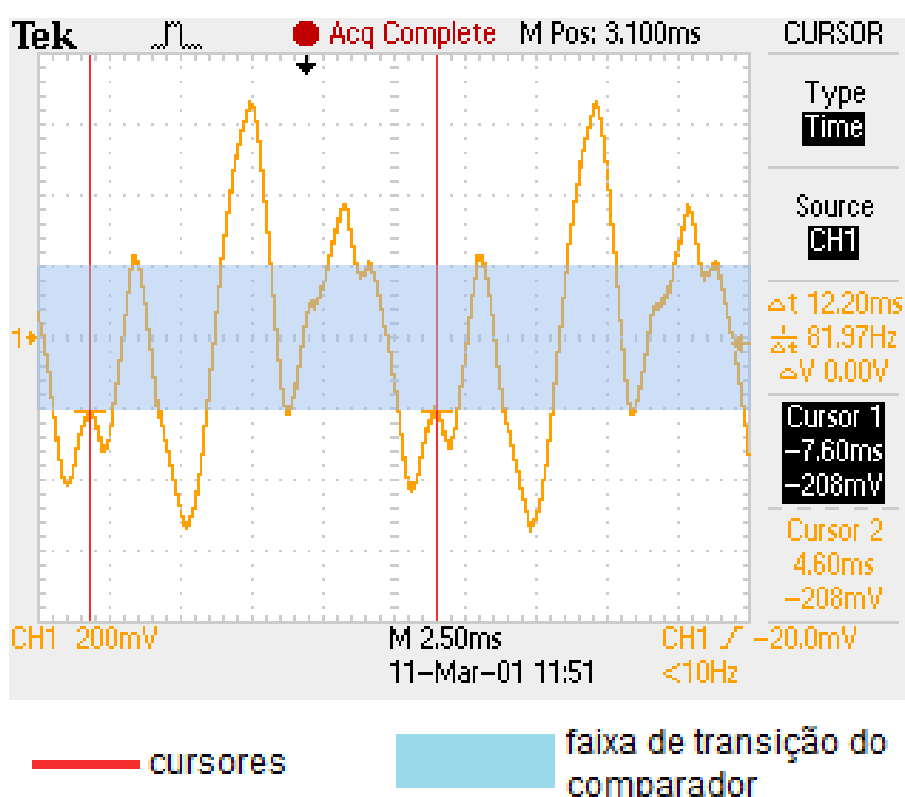


Figura 22 - Saída do filtro quando a nota E2 é emitida

Nota-se da Figura 22 que o sinal é periódico com frequência de 81,97 Hz, a qual se aproxima da frequência teórica da nota emitida (82,41 Hz). Porém, como alguns harmônicos são transmitidos, o sinal de saída do filtro possui oscilações suficientemente grandes para que excedam a faixa de transição do circuito comparador, de tal maneira que este gere uma saída com uma frequência maior do que a frequência fundamental. Conforme ocorre a atenuação do som emitido, os harmônicos também são atenuados, até o momento no qual as intensidades dos mesmos estão suficientemente menores do que a intensidade da frequência fundamental, de tal forma que as oscilações indesejáveis não excedam os níveis de transição do comparador. Neste momento, a saída do circuito apresenta-se com o valor de frequência correto, como indicado na Figura 23.

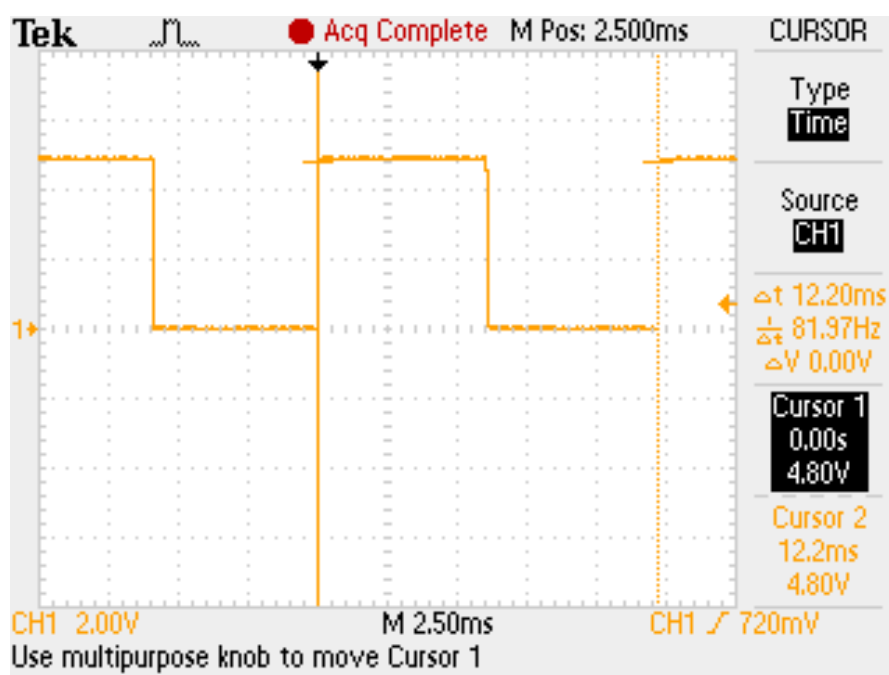


Figura 23 - Saída do circuito analógico quando a nota E2 é emitida, após a estabilização

Quanto às notas mais agudas, próximas à E4, o sinal de entrada do filtro é transmitido no intervalo de tempo que o som possui as maiores amplitudes. Como o filtro projetado possui uma frequência de corte em torno das notas graves, as frequências altas são significativamente atenuadas. Porém, nos instantes próximos ao momento de emissão, o som possui as maiores intensidades, as quais são suficientemente grandes para que sinais nestas frequências, mesmo que atenuados pelo filtro, consigam ativar o comparador.

#### 4.2. Teste do circuito configurado no FPGA

Para o teste do circuito configurado no FPGA, utilizou-se um gerador de sinais, uma vez que com o gerador é possível observar a saída do dispositivo para qualquer frequência de entrada. Utilizaram-se os LEDs e um dos *displays* presentes no próprio *kit* do FPGA.

Realizou-se o teste para três valores arbitrários de frequência. No caso utilizaram-se as frequências de 219,42 Hz, 232,67 Hz e 269,81 Hz. Os resultados dos testes são mostrados nas Figuras Figura 25, Figura 26 e Figura 27, respectivamente.

Para fins de comparação, verificaram-se as indicações da nota e da afinação dadas a sons emitidos com as mesmas frequências do teste, feitas por um afinador comercial. No caso foi utilizado o afinador WT-2005 C da Wolf Tuners (Figura 24) e utilizou-se um aplicativo de um website que gera tons senoidais (não possuem harmônicos) [16].

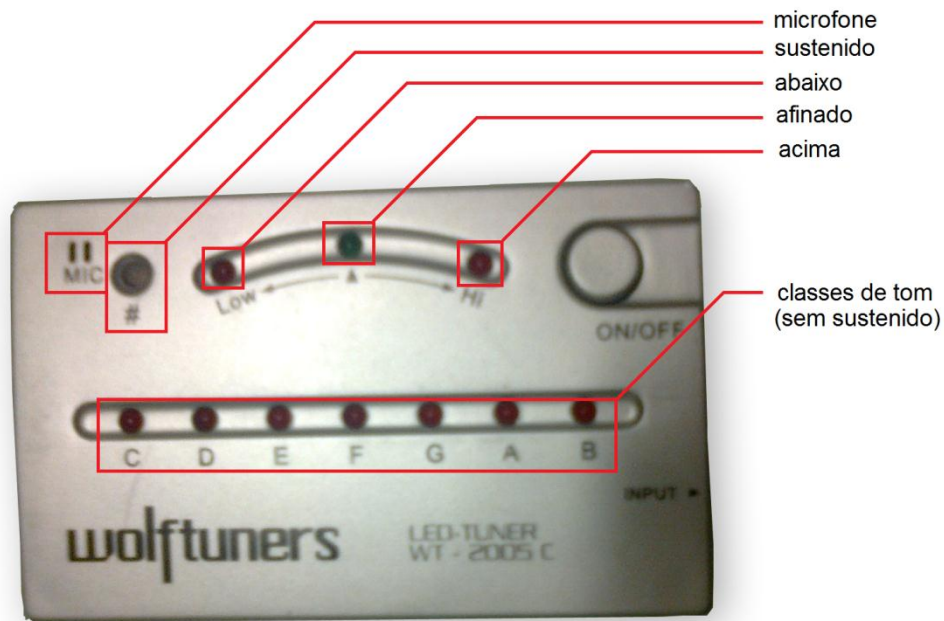


Figura 24 - Afinador comercial utilizado

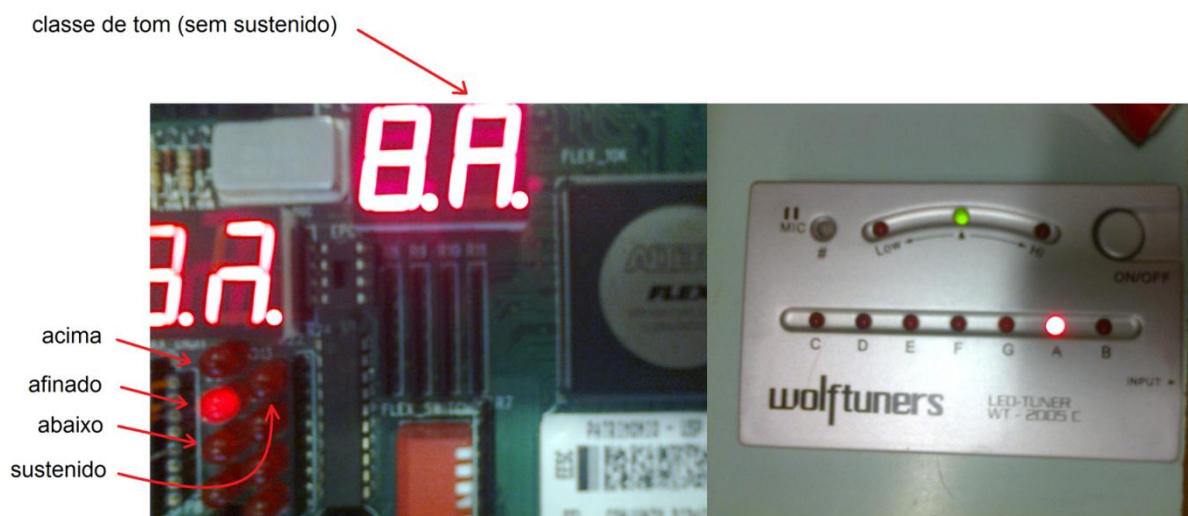


Figura 25 - Saída do FPGA para 219,42 Hz

- Frequência do sinal de entrada: 219,42 Hz
- Indicação da classe de tom e da afinação: A, afinado
- Nota mais próxima: A3 (220 Hz)



Figura 26 - Saída do FPGA para 232,67 Hz

- Frequência do sinal de entrada: 232,67 Hz
- Indicação da classe de tom e da afinação: A#, abaixo
- Nota mais próxima: A#3 (233,08 Hz)



Figura 27 - Saída do FPGA para 269,81 Hz

- Frequência do sinal de entrada: 269,81 Hz
- Indicação da classe de tom e da afinação: C, acima
- Nota mais próxima: C4 (261,63 Hz)

Nota-se que o circuito configurado no FPGA realizou corretamente a classificação dos sinais de entrada.

### 4.3. Teste final

Como último teste, ligou-se a saída do circuito analógico no FPGA e analisaram-se as indicações no *display* e nos LEDs. O teste foi realizado para as seguintes notas: E2, A2, D3, G3, B3 e E4.

O sistema montado, em geral, apresentou um funcionamento satisfatório, sendo possível visualizar a indicação das notas e o grau de afinação. Como o circuito configurado no FPGA não apresentou erros, os problemas observados no teste final são devidos ao circuito analógico, uma vez que este apresentou os problemas citados na seção 4.1. O comportamento observado foi que, ao o som ser emitido, a indicação feita pelos LEDs e o *display* variava significativamente, sendo impossível fazer uma leitura. Até que, durante um período de tempo, a indicação correta era exibida. Para as notas mais altas (D3 à E4), o período de instabilidade apresentou-se menor.

Além disso, durante os momentos nos quais as indicações estavam corretas, observou-se que uma pequena variação persistia na indicação da afinação, de tal forma que a indicação alternava entre dois dos três LEDs, mas permanecia predominantemente na indicação correta. Como a frequência do som emitido apresenta variações, o período medido pelo FPGA também não se mantém constante. Considerando a divisão da faixa de frequências, citada na seção 3.2.2, variações no valor do período fazem com que, ora ele pertença a um intervalo, ora a outro, mas ambos pertencentes à mesma faixa de frequência correspondente à mesma classe de tom.

O filtro utilizado foi projetado de tal forma que todas as notas da afinação padrão sejam transmitidas. Entretanto, tal tolerância impossibilitou a rejeição eficaz dos harmônicos para notas mais graves, ao mesmo tempo em que apresentou uma atenuação excessiva para as notas mais agudas. Na busca por uma melhoria do circuito, testou-se aumentar a ordem do filtro, cascadeando-se mais filtros RC passa-baixas, para que os harmônicos sejam atenuados. Experimentalmente, foi observado que tal atenuação é atingida com a adição de mais dois filtros RC passa-baixas, obtendo-se o filtro mostrado na Figura 28.

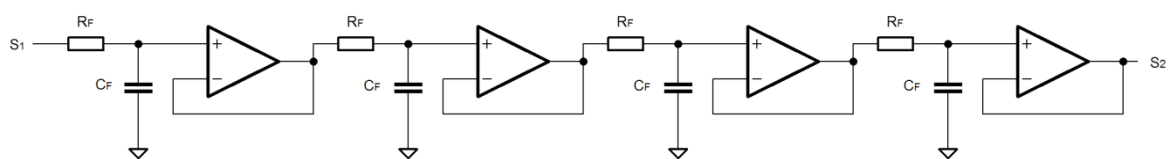


Figura 28 - Filtro testado para melhoria do circuito

Com a adição dos dois filtros, mediram-se as saídas do amplificador e do novo filtro, as quais são mostradas na Figura 29.

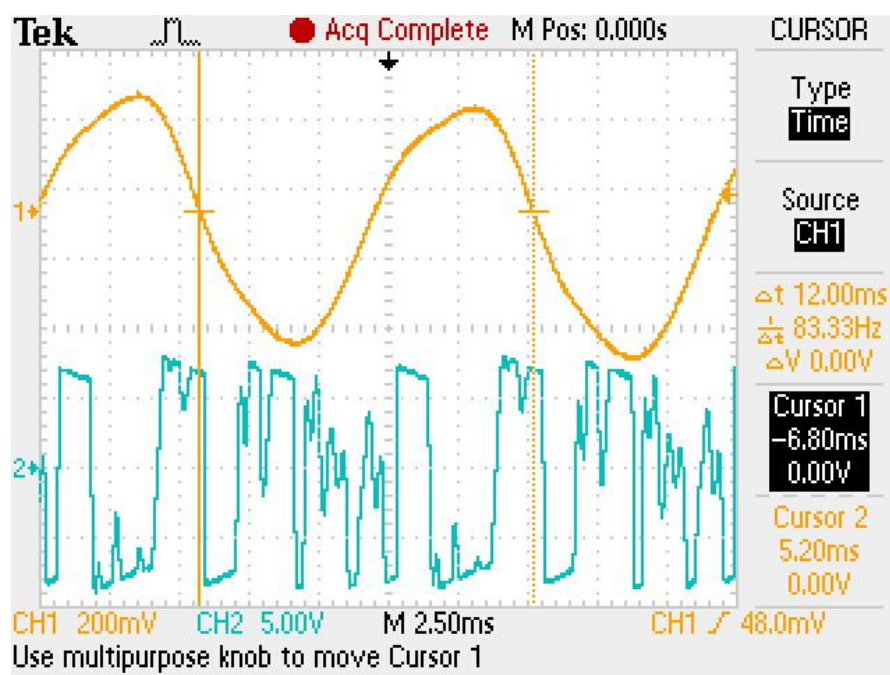


Figura 29 - Saídas do amplificador (azul) e do filtro (laranja) quando a nota E2 é emitida, após a adição dos filtros passa-baixas

Observa-se na Figura 29 que a saída do filtro (sinal laranja) apresenta-se como uma onda aproximadamente senoidal, indicando um aumento significativo na rejeição dos harmônicos em comparação com o filtro implementado anteriormente, de tal forma que não haja transições indesejadas no comparador e a saída do circuito se apresente com frequências próximas às teóricas.

## 5. Conclusão

Pode-se concluir que, para a utilização nas aulas de laboratório de eletrônica digital, o projeto atendeu o objetivo inicial de desenvolver um afinador, com processamento feito por um FPGA, capaz de captar um som e indicar a nota emitida com seu grau de afinação. Entretanto, o projeto necessita de algumas modificações para ser utilizado na afinação de um instrumento, dado que as frequências medidas para este caso apresentaram maiores erros. Os problemas observados decorrem do desempenho do filtro utilizado, como descrito na seção 4.1. Em compensação, o circuito configurado no FPGA funcionou de maneira satisfatória, desempenhando sua função sem falhas.

A seguir, na seção 5.1, estão listadas sugestões de modificações a serem feitas no projeto, de tal forma a melhorar seu funcionamento.

### 5.1. Sugestões

- Diminuir a faixa de transição do filtro (ou aumentar a ordem do filtro), de tal forma que, para as notas mais graves, os harmônicos sejam rejeitados. Para tanto, pode-se cascatear mais filtros, ou até mesmo utilizar outro filtro que possua uma faixa de transição abrupta. Pode-se também utilizar filtros passa-faixa seletivos ao invés de passa-baixas, eliminando a necessidade de se utilizar um filtro passa-altas na saída do filtro, como foi utilizado.
- Utilizando-se um filtro mais seletivo, será necessária a variação da frequência de corte do novo filtro. Se o filtro utilizado possibilitar o ajuste da frequência de corte através da mudança de valores de resistência, pode-se, por exemplo, utilizar potenciômetros nos lugares das resistências.
- Pode-se também utilizar potenciômetros digitais como, por exemplo, o MCP41XXX ou o MCP42XXX, e configurar um circuito no FPGA para controle automático do valor do potenciômetro.
- Uma alternativa a variar os resistores dos filtros, é variar os resistores do comparador com histerese, de tal modo que, para as notas mais agudas, as tensões de transição do comparador sejam menores e o sinal filtrado consiga ativar o comparador.
- Quanto às variações no valor de frequência do som emitido, citadas na seção 4.3, configurar um circuito no FPGA tal que calcule a média dos valores de período, usando-a como entrada do bloco de identificação da nota e da afinação mostrado na seção 3.2.2. Junto ao uso da média dos períodos, alterar a divisão da faixa de referência de tal forma a aumentar a tolerância quanta à classificação da afinação.
- Projetar uma placa de circuito impresso que contenha o sistema como um todo (circuito analógico e FPGA), incluindo-se a alimentação, que pode ser feito com baterias, por exemplo.



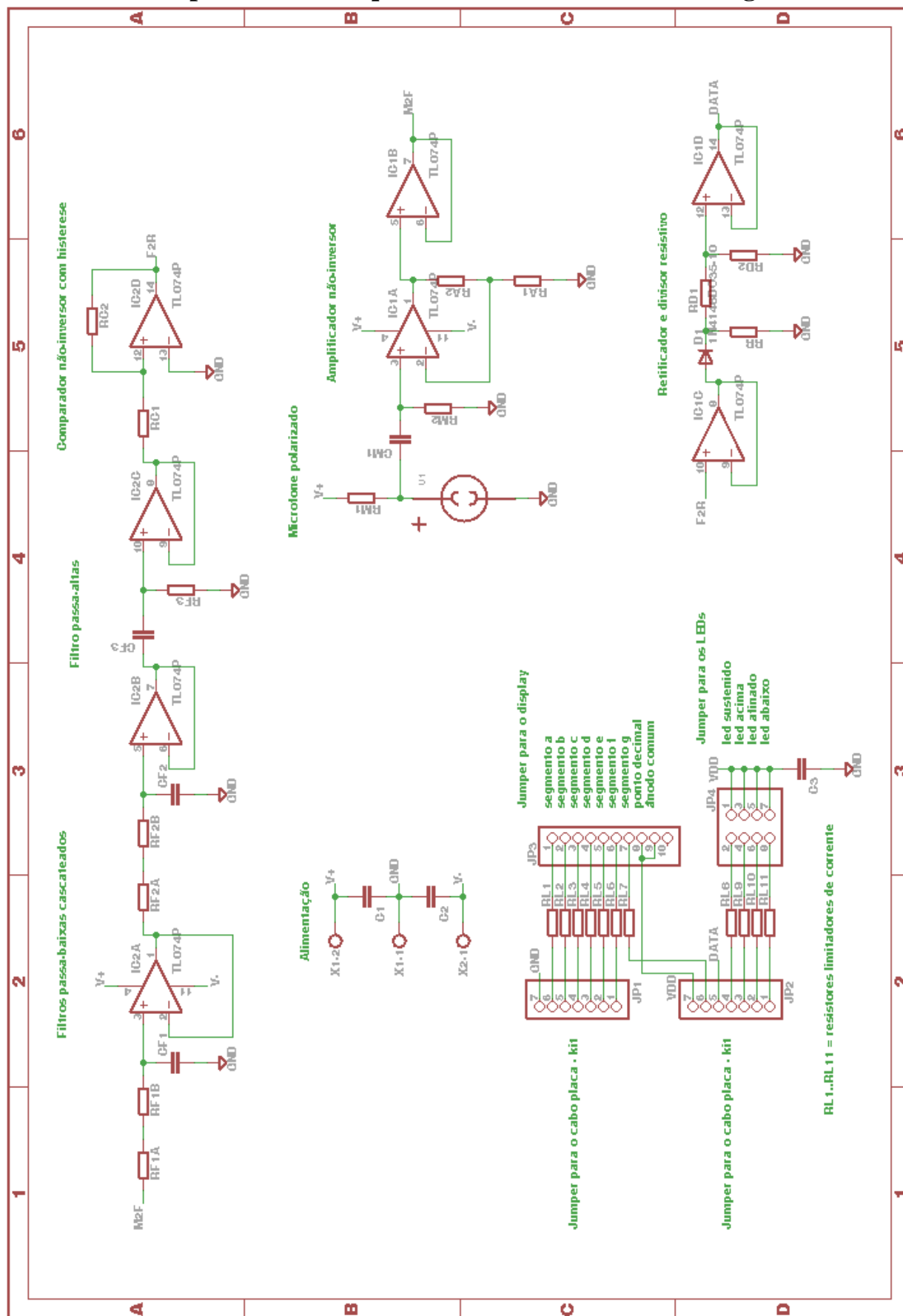


## Referências

1. Notas Musicais. **InfoEscola**: Navegando e Aprendendo. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/musica/notas-musicais/>>. Acesso em: 22 Abr. de 2013.
2. Pitch Class. **Wikipedia**: The free encyclopedia. Disponível em: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Pitch\\_class](http://en.wikipedia.org/wiki/Pitch_class)>. Acesso em: 22 Abr. de 2013.
3. Acidente (música). **Wikipédia**: A enciclopédia livre. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Acidente\\_\(m%C3%BAsica\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Acidente_(m%C3%BAsica))>. Acesso em: 22 Abr. de 2013.
4. Octave. **Wikipedia**: The free encyclopedia. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Octave>>. Acesso em: 23 Abr. de 2013.
5. Scientific Pitch Notation. **About.com**: Do more. Disponível em: <[http://piano.about.com/library/Pitch-Notation/bl\\_Scientific-Pitch-Notation.htm](http://piano.about.com/library/Pitch-Notation/bl_Scientific-Pitch-Notation.htm)>. Acesso em: 23 Abr. de 2013.
6. Timbre. **Wikipédia**: A enciclopédia livre. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Timbre>>. Acesso em: 23 Abr. de 2013.
7. Características do som: frequência, amplitude e timbre. **Diário de bordo de Oficina Multimídia\_B**. Disponível em: <<http://raquellima16.wordpress.com/2011/01/27/caracteristicas-do-som-frequencia-amplitude-e-timbre/>>. Acesso em: 23 Abr. de 2013.
8. Horn, D. **Basic Electronics Theory with Projects and Experiments**. 4<sup>a</sup> ed. Tab Books, 1994.
9. Haykin S., Veen B. V. **Sinais e Sistemas**. 1<sup>a</sup> ed. Bookman, 2007.
10. Pertence Jr, A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. 6<sup>a</sup> ed. Bookman, 2003.
11. Electret Microphones. **Open Music Labs**: Analog and Digital Techniques – Tools for Musicians, Composers, and Tinkeners. Disponível em: <<http://www.openmusiclabs.com/learning/sensors/electret-microphones/>>. Acesso em: 7 Mai. de 2013.
12. Coisas que você precisa saber. **BackRoom Studio**: Gravando seu som em casa. Disponível em: <<http://backroomstudio.blogspot.com.br/>>. Acesso em: 7 Mai. de 2013.
13. Altera. **Datasheet: FLEX 10K Embedded Programmable Logic Device Family**. Ver 4.2. Jan. 2003
14. Quartus II Web Edition Software. **Altera**: Measurable Advantage. Disponível em: <<http://www.altera.com/products/software/quartus-ii/web-edition/qts-we-index.html>>. Acesso em: 4 Jun. de 2013.
15. Online Guitar Tuner. **Get-tuned.com**: Keeping you in tuning since 2005. Disponível em: <[http://www.get-tuned.com/online\\_guitar\\_tuner.php](http://www.get-tuned.com/online_guitar_tuner.php)>. Acesso em: 28 Mai. de 2013.

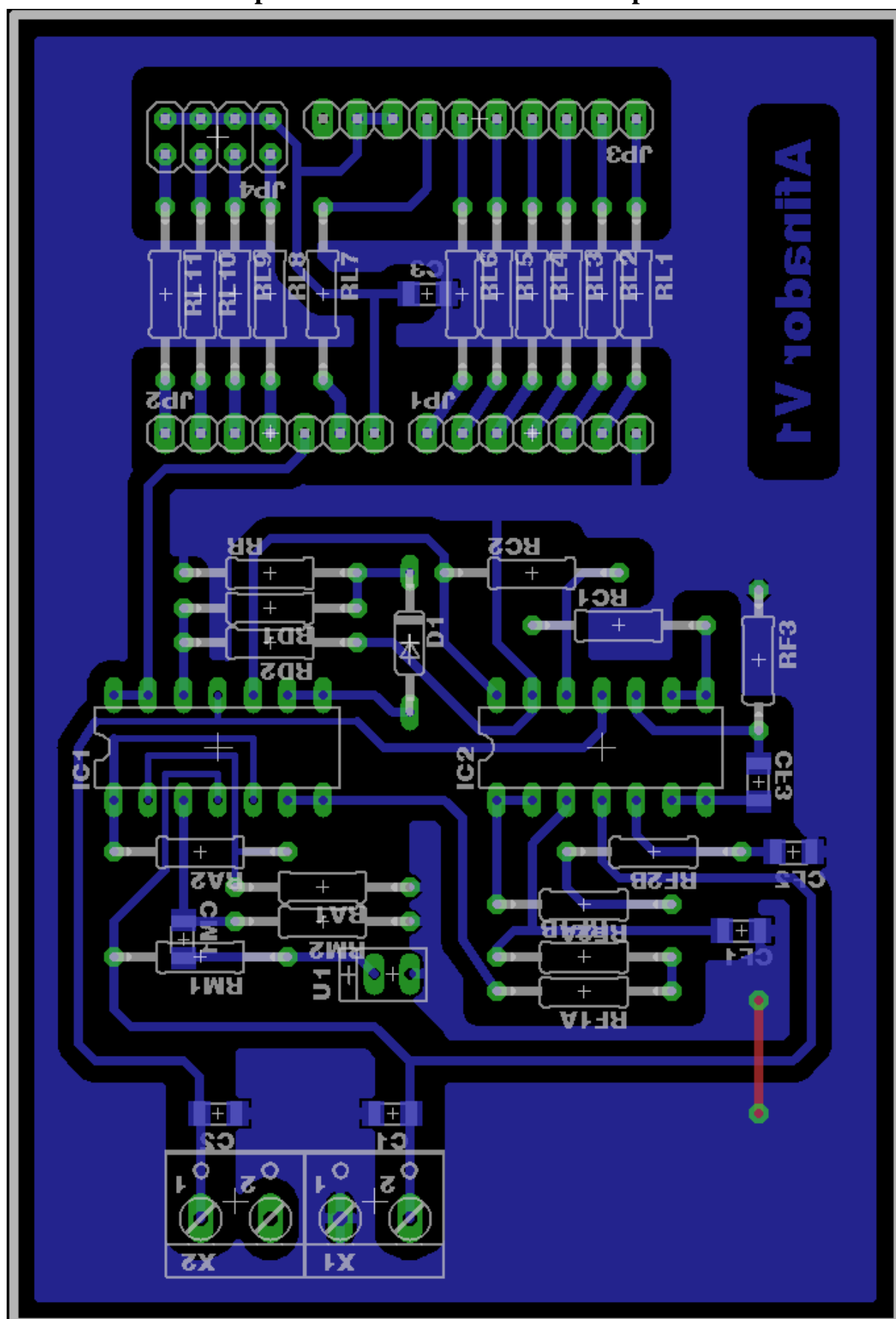
16. Online Tone Generator. **Online Tone Generator.** Disponível em:  
<<http://onlinetonegenerator.com/>>. Acesso em: 28 Mai. de 2013.

## Apêndice A – Esquema elétrico do circuito analógico





## Apêndice B – Placa de circuito impresso





## Apêndice C – Descrições de *hardware* em VHDL.

### Circuito completo

```
--circuito afinador
--conecta todos blocos declarados, utilizando-os como COMPONENTs
LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY afinador IS
    PORT (sinal,osc,rst : IN BIT; --sinal de entrada, sinal de clock externo e sinal de reset
          da,db,dc,dd,de,df,dg,ledac,ledaf,ledab,ledsu : OUT BIT); --(da...dg) = segmentos do display
                                --ledac = led acima
                                --ledaf = led afinado
                                --ledab = led abaixo
                                --ledsu = led sustenido
END afinador;

ARCHITECTURE a OF afinador IS

    COMPONENT contador IS
        GENERIC (n : INTEGER := 10);
        PORT (ck,rst : IN BIT; r : OUT BIT; q : BUFFER INTEGER RANGE (n - 1) DOWNTO 0);
    END COMPONENT;

    COMPONENT latch_int IS
        PORT (d : IN INTEGER RANGE 14000 DOWNTO 0; ck,rst : IN BIT; q : BUFFER INTEGER RANGE 14000 DOWNTO
0);
    END COMPONENT;

    COMPONENT latch_d IS
        PORT (d,ck,rst : IN BIT; q : BUFFER BIT);
    END COMPONENT;

    COMPONENT conv_freq_nota IS
        PORT (freqin : IN INTEGER RANGE 14000 DOWNTO 0; leds : OUT BIT_VECTOR (3 DOWNTO 0); nota : OUT INTEGER
RANGE 7 DOWNTO 0);
    END COMPONENT;

    COMPONENT dec_display IS
        PORT (nota: IN INTEGER RANGE 7 DOWNTO 0; dig: OUT BIT_VECTOR (6 DOWNTO 0));
    END COMPONENT;

    COMPONENT mono IS
        GENERIC (n : INTEGER := 10);
        PORT (d,ck,rst : IN BIT; q: OUT BIT);
    END COMPONENT;

    SIGNAL rx0,rx1,qx1,qx2,rx3 : BIT;
    SIGNAL leds : BIT_VECTOR (3 DOWNTO 0);
    SIGNAL display : BIT_VECTOR (6 DOWNTO 0);
    SIGNAL nota : INTEGER RANGE 7 DOWNTO 0;
    SIGNAL qx3,qx4 : INTEGER RANGE 14000 DOWNTO 0;

BEGIN
    x0 : contador GENERIC MAP (25) PORT MAP (osc,(NOT rst),rx0); --divisão do clock externo por 25
                                --de tal forma a obter um clock de 1 MHz

    x1 : mono GENERIC MAP (2) PORT MAP (sinal,rx0,(NOT rst),qx1); --mono sensível à borda de subida do
                                --sinal de entrada

    x2 : latch_d PORT MAP ('1',(NOT qx1),((NOT rst) OR qx2),qx2); --latch utilizado para resetar o
                                --contador do bloco de medição

    x3 : contador GENERIC MAP (14000) PORT MAP (rx0,((NOT rst) OR qx2),rx3,qx3); --contador usado no bloco
                                --de medição

    x4 : latch_int PORT MAP (qx3,qx1,(NOT rst),qx4); --buffer
    x5 : conv_freq_nota PORT MAP (qx4,leds,nota); --bloco comparador
    x6 : dec_display PORT MAP (nota,display); --decodificador

    dg <= NOT display(0);
    df <= NOT display(1);
    de <= NOT display(2);
    dd <= NOT display(3);
    dc <= NOT display(4);
    db <= NOT display(5);
    da <= NOT display(6);
    ledac <= NOT leds(1);
    ledaf <= NOT leds(2);
    ledab <= NOT leds(3);
    ledsu <= NOT leds(0);
END a;
```

## COMPONENT contador

```
--contador de n pulsos com saída do tipo inteiro
--apresenta uma flag de saída a qual fica ativa quando o contador chega na contagem máxima
--flag retorna para 0 quando contagem recomeça

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY contador IS
    GENERIC (n : INTEGER := 10); --generico. valor passado como entrada, o qual indica a contagem
    máxima
    PORT (ck,rst : IN BIT; --sinais de clock e de reset
          r : OUT BIT; --flag de contagem máxima
          q : BUFFER INTEGER RANGE (n - 1) DOWNT0 0); --contagem
END contador;

ARCHITECTURE a OF contador IS

BEGIN
    PROCESS (ck,rst)
        VARIABLE count : INTEGER RANGE (n - 1) DOWNT0 0;
    BEGIN
        IF (rst = '1') THEN
            count := 0;
        ELSIF (ck'EVENT AND ck = '1') THEN --
            IF (count = (n - 1)) THEN
                count := 0;
            ELSE
                count := count + 1;
            END IF;
        END IF;
        q <= count;
    END PROCESS;
    r <= '1' WHEN (q = (n - 1)) ELSE '0';
END a;
```

## COMPONENT conv\_freq\_nota

```
--bloco comparador.
--recebe um valor de periodo e o converte na nota correspondente, indicando sua afinação

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY conv_freq_nota IS
    PORT (freqin : IN INTEGER RANGE 14000 DOWNT0 0; --valor do período
          leds : OUT BIT_VECTOR (3 DOWNT0 0); --leds = (abaixo,afinado,acima,sustenido)
          nota : OUT INTEGER RANGE 7 DOWNT0 0); --notas representadas em inteiros sendo que:
                                                    --A = 1, B = 2,..., G = 7
                                                    --0 = periodos fora da faixa
END conv_freq_nota;

ARCHITECTURE a OF conv_freq_nota IS
    SIGNAL f: INTEGER RANGE 14000 DOWNT0 0; --variavel auxiliar
BEGIN
    PROCESS (freqin)
        VARIABLE fv: INTEGER RANGE 14000 DOWNT0 0; --variável auxiliar
    BEGIN
        fv := freqin;
        IF fv < 7013 THEN --loop de IFs para "oitavar" o valor de período lido
            fv := fv + fv;
            IF fv < 7013 THEN
                fv := fv + fv;
                IF fv < 7013 THEN
                    fv := fv + fv;
                    IF fv < 7013 THEN
                        fv := fv + fv;
                    END IF;
                END IF;
            END IF;
        END IF;
        f <= fv;
    END PROCESS;
    leds <= "1000" WHEN f > 13715 ELSE --D2 abaixo
            "0100" WHEN f > 13526 ELSE --D2 afinado
            "0010" WHEN f > 13280 ELSE --D2 acima
            "1001" WHEN f > 13030 ELSE --D#2 abaixo
            "0101" WHEN f > 12850 ELSE --D#2 afinado
            "0011" WHEN f > 12537 ELSE --D#2 acima
            "1000" WHEN f > 12219 ELSE --E2 abaixo
            "0100" WHEN f > 12050 ELSE --E2 afinado
            "0010" WHEN f > 11794 ELSE --E2 acima
```



```

"1000" WHEN f > 11533 ELSE --F2 abaixo
"0100" WHEN f > 11374 ELSE --F2 afinado
"0010" WHEN f > 11132 ELSE --F2 acima
"1001" WHEN f > 10886 ELSE --F#2 abaixo
"0101" WHEN f > 10736 ELSE --F#2 afinado
"0011" WHEN f > 10507 ELSE --F#2 acima
"1000" WHEN f > 10275 ELSE --G2 abaixo
"0100" WHEN f > 10133 ELSE --G2 afinado
"0010" WHEN f > 9918 ELSE --G2 acima
"1001" WHEN f > 9698 ELSE --G#2 abaixo
"0101" WHEN f > 9564 ELSE --G#2 afinado
"0011" WHEN f > 9361 ELSE --G#2 acima
"1000" WHEN f > 9154 ELSE --A2 abaixo
"0100" WHEN f > 9028 ELSE --A2 afinado
"0010" WHEN f > 8836 ELSE --A2 acima
"1001" WHEN f > 8640 ELSE --A#2 abaixo
"0101" WHEN f > 8521 ELSE --A#2 afinado
"0011" WHEN f > 8340 ELSE --A#2 acima
"1000" WHEN f > 8155 ELSE --B2 abaixo
"0100" WHEN f > 8043 ELSE --B2 afinado
"0010" WHEN f > 7872 ELSE --B2 acima
"1000" WHEN f > 7698 ELSE --C3 abaixo
"0100" WHEN f > 7592 ELSE --C3 afinado
"0010" WHEN f > 7430 ELSE --C3 acima
"1001" WHEN f > 7266 ELSE --C#3 abaixo
"0101" WHEN f > 7166 ELSE --C#3 afinado
"0011" WHEN f > 7013 ELSE --C#3 acima
"0000"; --período fora da faixa
nota <= 4 WHEN f > 12537 ELSE --D
5 WHEN f > 11794 ELSE --E
6 WHEN f > 10507 ELSE --F
7 WHEN f > 9361 ELSE --G
1 WHEN f > 8340 ELSE --A
2 WHEN f > 7872 ELSE --B
3 WHEN f > 7013 ELSE --C
0;
END a;

```

## COMPONENT dec\_display

```

--circuito decodificador
--decodifica a classe de tom em uma palavra de 7 bits para ser passado ao display

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY dec_display IS
    PORT (nota: IN INTEGER RANGE 7 DOWNT0 0; --classe de tom
          dig: OUT BIT_VECTOR (6 DOWNT0 0)); --palavra de 7 bits
END dec_display;

ARCHITECTURE a OF dec_display IS
BEGIN
    WITH nota SELECT
        dig <=
            "1110111" WHEN 1, --A
            "0011111" WHEN 2, --b
            "1001110" WHEN 3, --C
            "0111101" WHEN 4, --d
            "1001111" WHEN 5, --E
            "1000111" WHEN 6, --F
            "1011111" WHEN 7, --G
            "0000000" WHEN OTHERS; --períodos fora das faixa
END a;

```

## COMPONENT latch\_d

```

--latch tipo d

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY latch_d IS
    PORT (d,ck,rst : IN BIT;
          q : BUFFER BIT);
END latch_d;

ARCHITECTURE a OF latch_d IS
BEGIN
    PROCESS(ck,rst)

```

```

BEGIN
    IF (rst = '1') THEN
        q <= '0';
    ELSIF (ck'EVENT AND ck = '1') THEN
        q <= d;
    ELSE
        q <= q;
    END IF;
END PROCESS;
END a;

```

## COMPONENT latch\_int

```

--latch para numeros inteiros
--utilizado como buffer para o valor de periodo

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY latch_int IS
    PORT (d : IN INTEGER RANGE 14000 DOWNT0 0;
          ck,rst : IN BIT;
          q : BUFFER INTEGER RANGE 14000 DOWNT0 0);
END latch_int;

ARCHITECTURE a OF latch_int IS

BEGIN

    PROCESS(ck,rst)
    BEGIN
        IF (rst = '1') THEN
            q <= 0;
        ELSIF (ck'EVENT AND ck = '1') THEN
            q <= d;
        ELSE
            q <= q;
        END IF;
    END PROCESS;
END a;

```

## COMPONENT mono

```

--monoestável implemento em vhdl
--permanece ativo por n pulsos de clock quando a entrada transita de 0 para 1

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.NUMERIC_STD.ALL;

ENTITY mono IS
    GENERIC (n : INTEGER := 10); --numero de pulsos que o monoestável fica ativo
    PORT (d,ck,rst : IN BIT; --entrada, clock, reset
          q: OUT BIT); --saida
END mono;

ARCHITECTURE a OF mono IS

    COMPONENT latch_d IS
        PORT (d,ck,rst : IN BIT; q : BUFFER BIT);
    END COMPONENT;

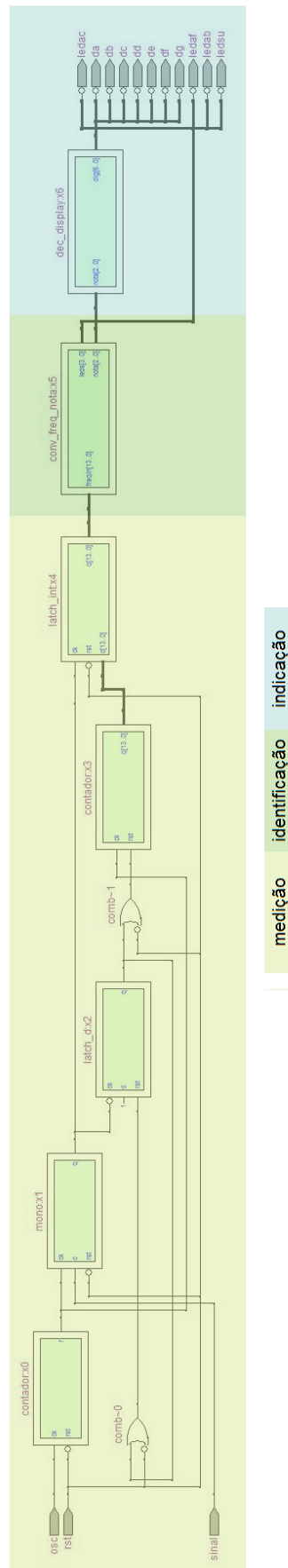
    COMPONENT contador IS
        GENERIC (n : INTEGER := 10);
        PORT (ck,rst : IN BIT; r : OUT BIT; q : BUFFER INTEGER RANGE (n - 1) DOWNT0 0);
    END COMPONENT;

    SIGNAL qx0,qx2,r : BIT;

BEGIN
    x0: latch_d PORT MAP ('1',d,(r OR qx2),qx0); --qx0 = 1 quando ocorre uma borda de subida na entrada
    x1: contador GENERIC MAP (n + 1) PORT MAP (ck,(rst or (not qx0)),r); --contador resetado enquanto
    qx0 = 0
    x2: latch_d PORT MAP ('1',(not r),(rst or (not qx0)),qx2); --latch ativado quando o contador
    reinicia
    q <= qx0; --saída ativa enquanto o contador não é resetado
END a;

```

## Apêndice D – Circuito RTL.



medição	identificação	indicação
---------	---------------	-----------



## Apêndice E – Fotografia do sistema montado.

