

*UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL*  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**RODRIGO ALEXANDRE RADAELLI**

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**  
**GUITARRA AUTO-AFINÁVEL**

Porto Alegre  
2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

## **GUITARRA AUTO-AFINÁVEL**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Renato Ventura Bayan Henriques

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODRIGO ALEXANDRE RADAELLI

## **GUITARRA AUTO-AFINÁVEL**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS  
Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte,  
Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Alberto Bastos do Canto Filho, UFRGS  
Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Prof. Dr. Walter Fetter Lages, UFRGS  
Doutor pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, Brasil.

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella, UFRGS  
Ph.D. pela Université Catholique de Louvain – Louvain-la-Neuve, Bélgica.

Porto Alegre, dezembro de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho em especial aos meus pais, que com seu apoio durante todos esses anos permitiram que este trabalho fosse realizado.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos pais e a minha irmã que sempre me incentivaram durante toda minha vida acadêmica.

Ao Brasil que acreditou que o desenvolvimento do país passava pela formação de engenheiros e pela criação de uma universidade pública de qualidade.

Aos colegas da faculdade, pois sem o auxílio e apoio destes essa jornada não teria sido concluída.

Às empresas Cooltech Applications e Datacom, por terem me concedido oportunidades de estágio que muito contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico.

Ao professor Renato Ventura Bayan Henriques, meu orientador, que muito me ensinou e apoiou durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade, professores, funcionários, pois estes são os grandes responsáveis pelo fato de que a Ufrgs seja uma universidade de qualidade.

À minha namorada, que sempre me ajudou nos momentos difíceis e me deu força para nunca desistir.

## **RESUMO**

Este trabalho detalha o projeto e montagem de um protótipo de uma guitarra na qual, utilizando-se um sistema embarcado realizado com um microcontrolador 8051, o processo de afinação é automatizado. Esta será capaz de, obedecendo a uma demanda do operador, afinar-se adequadamente na entonação que o mesmo escolheu, dentre as várias disponíveis.

**Palavras-chaves:** Engenharia Elétrica. Processamento de Sinais. Automação e Controle. Eletrônica e Instrumentação. Sistemas embarcados.

## **ABSTRACT**

This document formed by the project and assemblage of a guitar prototype where, by the use of an embedded system made with an 8051, the process of tuning it's automatized. The guitar will be capable of, following a command from the operator, tuned itself correctly in the intonation chosen, among the various available.

**Keywords: Electrical Engineering. Signal Processing. Automation and Control. Electronic. Instrumentation. Embedded Systems.**

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2 CONTEXTO DO PROJETO.....</b>	<b>19</b>
<b>3 ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 DIFERENTES CONTEXTOS POSSÍVEIS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 SISTEMA DE PROCESSAMENTO.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 OS SENSORES.....</b>	<b>25</b>
<b>3.4 O ELEMENTO MOTOR.....</b>	<b>28</b>
<b>3.5 MODO DE MEDIDA DE TENSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>4. MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1 APRESENTAÇÃO GLOBAL DOS ELEMENTOS DO PROJETO.....</b>	<b>32</b>
<b>4.2 OS CAPTADORES DE GUITARRAS.....</b>	<b>34</b>
<b>4.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DO SENSOR.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3.1 ESTÁGIO INICIAL DE CONDICIONAMENTO.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3.2 O CIRCUITO SELETOR DE FREQUÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>
<b>4.3.3 ESTÁGIO FINAL DE CONDICIONAMENTO.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3.4 CIRCUITO COMPLETO DE CONDICIONAMENTO.....</b>	<b>46</b>
<b>4.4 O MICROCONTROLADOR.....</b>	<b>49</b>
<b>4.4.1 O PROGRAMA DESENVOLVIDO.....</b>	<b>50</b>
<b>4.5 O DRIVER DE MOTOR DE PASSO.....</b>	<b>54</b>
<b>4.6 O MOTOR DE PASSO.....</b>	<b>56</b>
<b>4.7 COMENTÁRIO SOBRE OS DEMAIS ELEMENTOS DO PROJETO.....</b>	<b>57</b>
<b>4.8 INTERLIGAÇÃO DE DIVERSOS MÓDULOS.....</b>	<b>58</b>
<b>5. RESULTADOS ALCANÇADOS.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO FILTRO.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CONDICIONADOR.....</b>	<b>63</b>
<b>5.3 VERIFICAÇÃO DA INTEGRAÇÃO ENTRE O CONDICIONADOR E OS CAPTADORES.....</b>	<b>66</b>
<b>5.4 Testes Finais. ....</b>	<b>67</b>
<b>6. POSSÍVEIS MELHORIAS FUTURAS.....</b>	<b>67</b>
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>70</b>



## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A – Equacionamento dos filtros analógicos.....</b>	<b>71</b>
<b>Anexo B – Análise do programa desenvolvido.....</b>	<b>82</b>
<b>Anexo C – Placa de Circuito Impresso.....</b>	<b>100</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diapasão.....	16
Figura 2: Afinador Comercial.....	17
Figura 3: Captadores de Guitarra. ....	27
Figura 4: Circuito com LM331. ....	30
Figura 5: Diagrama de blocos do Projeto. ....	32
Figura 6: Visão do projeto como um sistema de controle. ....	33
Figura 7: Funcionamento dos captadores magnéticos.....	35
Figura 8: Aquisição proveniente do captador.....	37
Figura 9: Segunda aquisição proveniente do captador. ....	38
Figura 10: Violão com captadores piezoelétricos.....	39
Figura 11: Circuito inicial de condicionamento.....	41
Figura 12: Simulação do estágio inicial de condicionamento.....	42
Figura 13: Circuito Butterworth de segunda ordem.....	44
Figura 14: Simulação da resposta do filtro Butterworth.....	44
Figura 16: Estágio final de condicionamento.....	45
Figura 17: Simulação do estágio final de condicionamento.....	46
Figura 18: Circuito completo de condicionamento.....	46
Figura 19: Simulação do circuito completo de condicionamento.....	47
Figura 20: Resposta do circuito de condicionamento a uma onda de frequência elevada.....	48
Figura 21: Resposta do circuito de condicionamento a uma onda de baixa amplitude.....	49
Figura 22: Grafcet do Programa Principal.....	52
Figura 23: Grafcet da rotina de controle.....	53
Figura 24: Grafcet da rotina de geração de sinal para o driver.....	54
Figura 25: Circuito de Driver Utilizado.....	55
Figura 26: Rolamentos de Motor de Passo Unipolar.....	56
Figura 27: Rolamentos de Motor de Passo Bipolar.....	57
Figura 28: Ligação de Diversos Módulos em Cascata.....	58
Figura 29: Resposta de Filtro à Onda com Frequência dentro da Banda Passante.....	60
Figura 30: Resposta de Filtro à Onda com Frequência fora da Banda Passante.....	61
Figura 31: Resposta de Filtro à Onda com Frequência de Corte.....	62
Figura 32: Função de Transferência Estimada do Filtro.....	63
Figura 33: Aquisição da Resposta dos Módulos do Circuito de Condicionamento.....	64
Figura 34: Rejeição de Onda de Frequência Elevada Pelo Condicionador.....	65
Figura 35: Análise da interligação dos captadores ao circuito de condicionamento.....	66
Figura 36: Filtro passivo de primeira ordem.....	71
Figura 37: Simulação de filtro passivo de primeira ordem.....	73
Figura 38: Circuito de filtro ativo de primeira ordem.....	74
Figura 39: Simulação de filtro ativo de primeira ordem.....	76
Figura 40: Circuito de filtro Butterworth de segunda ordem.....	78
Figura 41: Circuito de filtro ativo de segunda ordem.....	79
Figura 42: Comparação da resposta dos filtros de segunda ordem.....	81

<b>Figura 43: Programa Desenvolvido, Parte 1.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 44: Programa Desenvolvido, Parte 2.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 45: Programa Desenvolvido, Parte 3.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 46: Programa Desenvolvido, Parte 4.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 47: Estrutura do Registrador TMOD .....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 48: Diagrama Interno dos Timers.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 49: Estrutura do Registrador IE.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura 50: Programa Desenvolvido, código de tratamento de interrupção.....</b>	<b>89</b>
<b>Figura 51: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 1.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 52: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 2.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 53: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 3.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura 54: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 4.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 55: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 5.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 56: Programa Desenvolvido, rotina de lógica para o driver.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura 57: Placa de circuito impresso.....</b>	<b>100</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1 – Relação entre frequências e notas musicais produzidas.....</b>	<b>36</b>
--	-----------

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Fem: força eletromotriz

## 1. INTRODUÇÃO

As guitarras elétricas são certamente um dos mais conhecidos e difundidos instrumentos musicais da atualidade. Dificilmente é possível pensar em algum grupo musical moderno que não utilize um destes instrumentos ou algum outro de mesma forma. Dependendo do estilo musical, são instrumentos praticamente obrigatórios.

E além dos músicos profissionais, existe toda uma multidão de músicos amadores, pessoas para quem o estudo de música representa um hobby, uma porta de escape para a tensão do dia a dia.

A cada dia que passa, estes instrumentos têm se tornados mais e mais comuns. Esse aumento em seu número é causado em grande parte pelo aparecimento de modelos de baixo custo. Um segundo fator que colabora para sua expansão é o fato de que a guitarra elétrica é um instrumento de relativamente fácil aprendizado, com facilidade de se encontrar professore, e muito similar a outro instrumento musical também muito popular e mais tradicional, o violão.

As guitarras são enquadradas no grupo de instrumentos de cordas, assim como um grande número de instrumentos, como violões, baixos, violinos e pianos, para citar apenas os mais comuns. Estes são aqueles cujo som é gerado principalmente pela vibração de uma corda. Essa vibração gera uma onda transversal, que quando somada com a refletida na extremidade da corda, gera uma onda estacionária.

Essa onda estacionária possui uma frequência fundamental, que define a nota gerada, e diversas harmônicas. As diferenças entre as contribuições das harmônicas é o fator que determina a diferença de timbre existente entre dois instrumentos diferentes. Por fim, a vibração da corda gera compressões e expansões de ar, gerando as ondas sonoras. Porém para

que o som produzido por qualquer um destes instrumentos seja agradável e harmonioso, proporcionando uma boa utilização do mesmo, é necessário que este esteja afinado.

Uma corda de guitarra afinada é aquela que é esticada pela sua tarraxa com uma tração tal que, ao ser tocada, vibra em uma frequência determinada, correspondendo a uma nota musical desejada. Uma guitarra afinada é aquela que tem todas suas cordas individualmente afinadas, ou seja, aquela que cada uma de suas cordas produzem a nota desejada pelo músico ao serem tocadas.

Existem várias formas para se afinar uma guitarra. Parte dos músicos profissionais afina suas guitarras utilizando um método popularmente conhecido pelo nome “de ouvido”. Nesta técnica, o músico toca uma corda e, baseado no som produzido e em seus conhecimentos musicais, consegue determinar se a corda está afinada ou quais os procedimentos necessários para ajustá-la.

Um instrumento auxiliar neste processo é o diapasão. Estes são objetos que possuem normalmente a forma de uma forquilha. Ao serem golpeados contra uma superfície, ou outro objeto apropriado, geram uma vibração em suas duas extremidades produzindo uma nota musical pré determinada que irá servir como base para a afinação de uma das cordas do instrumento. E essa corda, então, será usada como referência na afinação das demais cordas da guitarra. Como forma de ilustração, a figura de um diapasão é mostrada a seguir:



Figura 1: Diapasão.

Este método, mesmo com o auxílio de um diapasão, é difícil de ser executado por pessoas que não possuam grande experiência em afinação, bom conhecimento musical, ou um ouvido apurado. Pessoas para as quais pode ser de suma importância a afinação correta de seu instrumento, como no caso de um músico iniciante, por exemplo. Pensando nesses casos, foram então criados os equipamentos chamados de afinadores para auxiliar no processo de afinação.

Os afinadores realizam uma aquisição da nota produzida pelo instrumento, seja por um microfone, seja por um sinal proveniente de um captador. Em seguida, estes realizam uma comparação deste valor com o equivalente esperado para a nota desejada. Com base na comparação entre os dois valores, o aparelho fornece uma indicação que informa o responsável pela afinação se a corda está esticada ou solta demais. Este pode então utilizar uma tarraxa para alterar a tensão na corda de forma a obter a nota desejada. O mesmo ajuste é repetido para todas as cordas do instrumento.



Um exemplo de modelo de afinador comercial é mostrado na figura abaixo:



Figura 2: Afinador Comercial

Normalmente ao se terminar de ajustar as cordas da guitarra, é repetido todo o processo uma segunda vez para todas as cordas. Essa repetição não é obrigatória, sendo realizada apenas nos casos em que se deseja uma maior fidelidade da afinação. O motivo para esse procedimento é que a alteração na tensão em uma corda é transmitida ao braço da guitarra e pode afetar a afinação das demais cordas. Esta transmissão é mais crítica em situações especiais, como na troca de um encordoamento, por exemplo.

Como explicado acima, o processo de afinação de guitarras é relativamente simples de ser realizado com o uso de afinadores. Porém o mesmo tem alguns pontos fracos. Por exemplo, o ajuste de todas as cordas, uma por uma, repetido diversas vezes pode ser um procedimento estressante e mesmo extenuante. Isso é agravado no caso em que as cordas sejam novas, pois nessas circunstâncias estas costumam perder a sua entonação mais rapidamente, tornando necessário a realização de ajustes frequentes.

Soma-se a isso o fato de que os afinadores de baixo custo, os mais comumente encontrados no mercado, normalmente só permitem a afinação para o conjunto mais comum de notas, conhecido como a afinação padrão da guitarra. E isso é um fator muito limitante

para os músicos, uma vez que retira boa parte da flexibilidade do instrumento. Assim sendo, caso o instrumentista necessite de uma afinação em um tom diferente do tradicional, não poderá recorrer ao auxílio dos afinadores mais comuns.

Foi com base nessas considerações que foi desenvolvido o projeto aqui apresentado. Nos próximos capítulos apresentaremos mais detalhes sobre todo o trajeto de desenvolvimento do projeto.

## 2. CONTEXTO DO PROJETO

Conforme dito no capítulo anterior, as formas atualmente utilizadas para realizar a afinação de uma guitarra funcionam. Porém existem determinados casos em que estes não são muito práticos. O pensamento de que era possível amenizar os incômodos existentes foi sem dúvida a principal motivação para o desenvolvimento deste projeto.

Neste documento serão tratadas em detalhes todas as fases do projeto de um protótipo de uma guitarra auto-afinável. Esta foi pensada e projetada como sendo um instrumento musical de cordas capaz de realizar seu processo de afinação automaticamente. Tudo o que o operador precisa fazer é escolher a afinação desejada e tocar a corda. A guitarra irá realizar o resto do processo sozinho.

Resumindo seu funcionamento, a guitarra deve ser capaz de adquirir a nota produzida, adquirir por meio de uma interface a nota desejada pelo usuário, comparar estes dois valores e com base no resultado obtido atuar sobre a tarraxa, realizando a afinação da guitarra.

As limitações para a escolha da nota a ser afinada serão muito menos rígidas que as existentes nos afinadores tradicionais. Desta forma, esta guitarra deverá permitir a utilização de um método de afinação muito mais flexível que o obtido com estes equipamentos. Com o protótipo, o músico deverá escolher diretamente a frequência da nota desejada, entre uma faixa de frequência específica. Assim, é permitido que este realize a afinação seu instrumento da forma que mais lhe convier.

Outro aspecto que deve ser levado em conta é que o projeto pode ser desenvolvido de forma a ser o mais compatível possível com alguma expansão futura. Um caso interessante seria prever uma possível expansão do sistema para o uso em outros instrumentos de mesmo formato. Poderíamos, por exemplo, fabricar violões que seguem o mesmo princípio, o que

aumentaria o mercado consumidor, fator interessante no caso de uma produção real do equipamento. Com base nessas considerações, este projeto foi pensado de forma modular, com a definição das tarefas relacionadas de cada módulo e sua interconexão com os demais. Isso facilita futuras alterações, uma vez que caso um módulo seja substituído por um de funcionamento diferente, mas sem alteração da interface com os demais, não é necessário a substituição ou adaptação destes.

Existem ainda algumas outras premissas simples, mas que são importantes de serem aqui ressaltadas. Uma delas é que o sistema poderá ser desligado caso esse seja o interesse do operador. Assim este poderá parar o processo de afinação a qualquer momento e, caso deseje, continuá-lo manualmente. Isso é necessário uma vez que a guitarra não pode estar sempre em modo de afinação. Outro ponto de destaque é que o sistema deve ser o mais compacto possível, de forma que possa ser futuramente embutido em uma guitarra.

Também é necessário que o sistema seja imune aos principais erros causados por sua utilização indevida. Para deixar mais claro, deve-se durante o projeto prever alguns dos possíveis usos errôneos e acrescentar ao projeto mecanismos de proteção que evitem um comportamento indesejado, reduzindo o risco de danos materiais ao equipamento.

Porém mesmo que todos os requisitos acima descritos sejam totalmente cumpridos, a guitarra elétrica apresentada aqui não será um equipamento de valor se não cumprir um requisito básico, a qualidade. Por mais que este sistema seja robusto, compacto, flexível e de fácil expansão, ele não obterá sucesso se sua qualidade for muito inferior a de outros afinadores existentes. Assim, uma parte considerada fundamental realizada neste projeto são os testes de validação do protótipo produzido.

### **3. ANÁLISE DE ALTERNATIVAS**

Com o escopo e as premissas do projeto definidos, podemos agora partir para a realização de uma análise crítica de algumas das possíveis formas de execução do projeto.

Mesmo que o fator principal a ser levado em conta seja a escolha de uma realização técnica de qualidade, neste processo deve-se obrigatoriamente considerar outros aspectos importantes, alguns dos quais implícitos, como flexibilidade, robustez, compactabilidade do produto final e viabilidade econômica.

Considerando estes outros fatores durante a fase de projeto é possível evitar algumas anomalias, como sistemas que são excelentes na execução de suas tarefas, mas custam um preço exorbitante que nenhum consumidor está disposto a pagar. Estes sistemas mal pensados representam um desperdício de tempo e dinheiro, e pode ser um agravante na situação econômica nem sempre estável de uma empresa real.

Quanto ao projeto da guitarra elétrica, várias foram as análises e decisões necessárias. Desde decisões mais gerais, como escolha da arquitetura e forma de processamento, até mais específicas, como escolha do sensor a ser utilizado. A análise feita será iniciada pelas primeiras, uma vez que estas influenciam nas demais.

#### **3.1 DIFERENTES CONTEXTOS POSSÍVEIS.**

A primeira decisão importante a ser tomada foi quanto ao contexto do projeto. Já foi aqui definido que o projeto trata-se de uma guitarra auto-afinável. Porém inicialmente foi considerada a possibilidade da criação de um sistema de afinação externo que pudesse ser conectado ao instrumento.

Essa ideia teria algumas vantagens, tanto em nível de utilização quanto de projeto. Por exemplo, este equipamento permitiria que um mesmo afinador fosse responsável pela

afinação de várias guitarras diferente, sem acréscimo de custos. Também eliminaria a necessidade de compactabilidade de nosso afinador, uma vez que este seria externo ao instrumento. Porém seriam gerados incômodos extras ao operador, uma maior dificuldade de utilização do equipamento, e criação de adaptadores mecânicos para que o motor utilizado fosse capaz de girar as tarraças, o que aumenta a complexidade do projeto.

Por isso decidiu-se por embutir o afinador no instrumento. A ideia de criar um equipamento externo não foi de todo abandonada, mas sim deixada como uma opção complementar. Com isso, o projeto foi conduzido de forma de que grande parte do sistema pudesse ser facilmente transferido para uma implementação externa com alguns pequenos ajustes, caso seja assim desejável. Durante o desenrolar deste documento, foram adicionados alguns remarques sobre estas adaptações.

### **3.2 SISTEMA DE PROCESSAMENTO.**

Outro fator importante é a forma que será utilizada para a confecção da lógica do afinador, principalmente de qual forma o processamento será feito. O elemento de processamento é o coração do sistema, responsável por providenciar o controle correto da afinação. Como forma de compor este sistema, foram pensadas três tecnologias diferentes: uso de elementos de circuito simples, uso de um microcontrolador e uso de um software de controle.

A primeira arquitetura utilizaria elementos simples, como portas lógicas, circuitos subtratores e comparadores com amplificadores operacionais, e outros componentes do mesmo tipo para a realização da lógica de controle do afinador. Mesmo que ideia possa parecer atraente devido ao baixo custo destes componentes, existem algumas complicações quanto a sua execução.

Um problema sério seria um grande aumento da dificuldade de expansões futuras no projeto. Qualquer alteração realizada em um componente, seja para correção de algum mau funcionamento ou para desenvolvimento de uma nova versão do projeto poderia facilmente afetar todos os demais componentes do circuito. Também caso fosse feita esta opção, necessitaríamos de um grande número de componentes. Isso levaria a uma maior complexidade de projeto e do sistema final, e conseqüentemente a uma maior probabilidade de erros e uma maior dificuldade de correção destes.

Essa complexidade seria reduzida por nossa segunda opção de projeto, o uso de um microcontrolador. Este pode realizar diferentes funções, eliminando assim a necessidade de grande parte dos elementos do circuito. Devido ao fato de que boa parte das melhorias futuras poderiam ser realizadas apenas em *software*, seria possível reduzir os custos e tempo de desenvolvimento de uma nova versão do produto.

Outro fator, muitas vezes não levado em conta, é a proteção da propriedade intelectual do produto. Aqui está reproduzido em tradução livre o que diz o autor Steve Heath sobre este assunto:

“Para manter uma vantagem competitiva, é importante manter o conhecimento de design dentro da companhia e evitar que outros entendam exatamente o que faz um produto funcionar. Esse conhecimento, frequentemente chamado de direito de propriedade intelectual, torna-se importante a medida que os mercados se tornam mais competitivos. Com um design que é baseado totalmente em hardware e construído com componentes físicos, é difícil proteger esses direitos. Tudo o que é necessário é pegar o produto, identificar os chips e como eles estão conectados traçando as trilhas na placa. Algumas companhias chegam mesmo a apagar parte dos números dos circuitos integrados para dificultar a engenharia reversa.”[1]

“Com um sistema embarcado, o hardware pode ser identificado, mas o software que realmente fornece a funcionalidade ao sistema pode ser escondido e mais difícil de ser analisado. Com um microcontrolador, tudo o que é visível é um encapsulamento de plástico com algumas poucas conexões com o mundo externo. O software já está gravado na memória interna do chip e é efetivamente impossível de acessar. Como resultado, os direitos de proteção intelectual estão muito mais seguros e protegidos.”

A terceira opção considerada foi o uso de um software em computador em conjunto com uma placa de aquisição. Caso fosse escolhida essa opção, teríamos um programa como LabVIEW ou Matlab, ou um programa de desenvolvimento próprio, sendo responsável pelo processamento.

Essa alternativa tem uma implementação muito mais fácil que as demais, uma vez que é relativamente mais simples programar nesses ambientes do que utilizando linguagens de baixo nível, como assemble. A procura e resolução de erros e o uso de rotinas mais complexas, como a transformada de Fourier, por exemplo, seriam facilitadas. Também poderia ser realizada mais facilmente uma interface amigável com o usuário em *software* do que em *hardware*.

Porém, essa solução tem dois grandes problemas. O primeiro é que é uma solução muito mais cara que as anteriores, mesmo sem considerar o preço de um computador. O preço da licença mais barata do programa LabVIEW é de 1,375 dólares, tornando sua utilização uma alternativa mais cara do que as anteriores. E seria necessária uma licença por computador utilizando o produto, uma vez que o usuário precisaria executar o programa. Somasse a isso a necessidade de uso de um computador, e de um *hardware* especial, uma placa de aquisição.

Outro problema é que adotando esta solução, o projeto ficaria totalmente descaracterizado. Qual seria a vantagem de um afinador embutido em uma guitarra se, para



usá-lo, fosse necessária a ligação da guitarra em um computador? Perder-se-ia assim todas as vantagens obtidas com a compactação do projeto. Provavelmente poucas pessoas estariam dispostas a pagar um preço elevado por uma guitarra deste tipo, e em muitas situações os músicos não teriam um computador por perto.

Com base nestas reflexões, foi tomada a decisão de se utilizar um microcontrolador. Quanto ao modelo deste, foi escolhido o 8051, devido ao fato de este ser o microcontrolador que é estudado durante a graduação em engenharia elétrica na UFRGS e do qual é fácil encontrar matéria didática, o que facilitará o entendimento deste projeto por um maior número de pessoas.

### **3.3 OS SENSORES.**

Em qualquer sistema no qual a instrumentação exerce um papel fundamental, a escolha do sensor deve ser feita de forma criteriosa, a fim de que o resultado final obtido seja de qualidade.

A primeira análise que temos que fazer na escolha dos sensores é definir de qual grandeza é interessante a instrumentação, para que seja possível definir quais sensores são adequados para medir esta grandeza. Nessa escolha temos que levar em conta diversos fatores, como a presença de ruído, necessidade de um circuito de condicionamento, custo do sensor, disponibilidade, qualidade da medida, sensibilidade, entre outros.

Para o este caso específico, é necessário medir alguma grandeza que permite a caracterização da nota musical que uma corda produz ao vibrar. Conforme visto anteriormente neste documento, a grandeza física a ser medida é a frequência de oscilação da corda, que corresponde à frequência da onda sonora gerada pela mesma. Com isso, é

necessário o uso de um sensor que seja capaz de caracterizar as frequências de vibração de uma corda.

Primeiramente foi considerada a ideia da utilização de um microfone, que capturaria o som produzido pelo instrumento e poderia, por meio de algum procedimento matemático, como série de Fourier, obter a nota produzida. Porém neste caso, só poderíamos afinar a guitarra caso a mesma estivesse ligada a um amplificador de som, uma vez que o instrumento não possui uma caixa de ressonância, ou seja, não produz som por si só. Além disso, o microfone é um sensor muito afetado por interferências e ruído.

Porém após a realização de uma análise criteriosa foi feita a opção pelo uso de captadores de guitarra. A principal vantagem deste sensor é que estes são elementos já presentes em todas as guitarras. Assim, nenhum sensor precisaria ser acrescentado especificadamente para o projeto, o que leva a um aumento da portabilidade do sistema desenvolvido e não representa nenhum custo extra.

O posicionamento dos captadores elétricos já é otimizado para obter a frequência das cordas, eliminando esta preocupação extra. Além disso, os captadores magnéticos tem se mostrado sensores relativamente confiáveis para este tipo de medição, sofrendo menos interferência externa do que seria obtido com o uso de um microfone.

Pode-se também ressaltar outra vantagem do uso de captadores como sensor de medição. Neste caso, o sensor utilizado para medir o sinal é o mesmo utilizado para obtenção das notas durante o uso da guitarra. Com isso, ao afinarmos uma corda para determinado tom em uma corda, sabe-se que a mesma apresentará um comportamento medido semelhante quando ligada a um amplificador sonoro, por exemplo. Assim sendo, é eliminada parte da influência que a utilização de um segundo sensor poderia ter no resultado final da nossa afinação.

Os captadores de guitarras elétricas utilizam o fenômeno de indução magnética, na qual a corda vibrando em um campo magnético gera uma corrente em uma bobina, que possui a mesma frequência da oscilação da corda. Na figura 3, são mostrados dois captadores de guitarra:

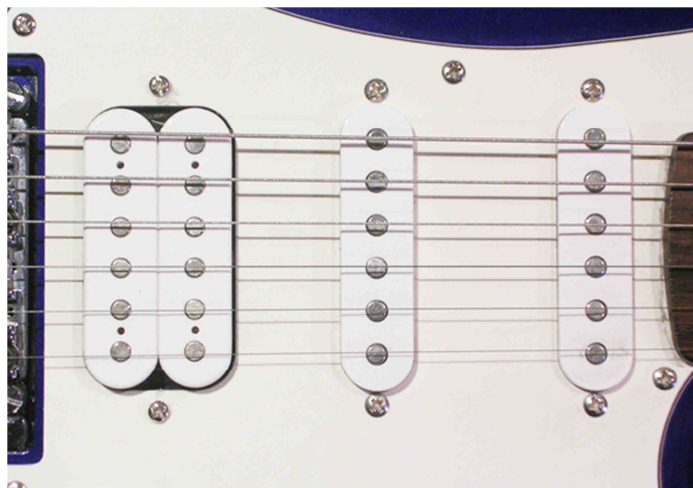


Figura 3: Captadores de Guitarra.

A figura 3 é interessante porque mostra dois tipos de captadores existentes. Começando pelos dois mais a esquerda, são captadores do tipo *single coin*, os mais simples existentes. Eles possuem uma haste para cada corda, e apenas uma bobina. Têm som alto e limpo, mas apresentam bastante ruído, devido a interferências eletrônicas causadas por outros aparelhos, ou mesmo pela própria rede elétrica do local, o que em alguns casos podem prejudicar a qualidade do som.

Já o captador localizado mais a esquerda é um captador chamado de *Humbucker*, criado pela empresa Gibson. Estes são compostos por dois captadores *single coin*, colocados lado a lado, com polaridades invertidas. Assim, quando um *single coin* sofre influencia de ruído, este é cancelado pelo outro, diminuindo consideravelmente o efeito do ruído. O sinal

nos dois é somado, uma vez que esse não é induzido pelo campo magnético ambiente, mas sim pelo movimento da corda.

No protótipo, será utilizado um captador *single coin*. Mas é importante aqui ressaltar que o sistema continuaria apresentando basicamente o mesmo comportamento para um número maior de captadores *single coin*, para uso de captadores *Hambucker* ou mesmo um conjunto dos dois.

Para o caso de o projeto ser expandido para uma utilização externa como afinador, os captadores ainda podem ser utilizados como elementos sensores. Porém, é necessária a utilização de um cabo que leve o sinal produzido por estes ao afinador. Isso pode ser feito com o uso de cabos de guitarra normais, comumente encontrados nas lojas de produtos do gênero.

### **3.4 O ELEMENTO MOTOR.**

Outro elemento importante deste projeto é o motor. Este será o responsável por girar a tarraxa, afinando a corda. É desejável que este seja facilmente controlável e que tenham uma resolução suficientemente pequena para garantir uma boa afinação do instrumento.

Neste caso, foi feita a opção pela utilização de um motor de passo. Estes apresentam uma resolução de saída adequada, e podem ser controlados por lógica digital, diretamente do microcontrolador, o que leva então a uma simplificação do circuito necessário para seu controle, e diminui bastante o custo e a complexidade do projeto. Como seu controle segue uma lógica digital, sua interface com um microcontrolador pode ser facilmente realizada. Além disso, são motores que podem ser encontrados em versões de pequeno porte, o que condiz com nosso desejo de portabilidade.

Os motores são necessários também para o caso de um afinador externo que deva girar a corda. Neste caso é necessário também prever uma forma de conexão mecânica entre a tarraxa e o eixo de rotação do motor, de forma que a afinação possa ser feita automaticamente.

### **3.5 MODO DE MEDIDA DE TENSÃO**

Conforme referido anteriormente, os sensores utilizados em nosso projeto, os captadores, nos fornecem uma onda de tensão ou corrente cuja informação de interesse é a frequência. Porém esta não é uma grandeza fácil de ser mesurada assim como corrente e tensão. Por isso, é necessário elaborar um método para obter seu valor e transformá-lo em uma grandeza que possa ser processada pelo microcontrolador.

A primeira forma, mais complexa, seria a aplicação de um algoritmo de transformada de Fourier, que nos daria informações sobre as componentes em frequência da onda. Com isso, pode-se facilmente selecionar a frequência de maior coeficiente de Fourier, que seria a frequência fundamental da nota em que a corda estaria afinada no momento.

Esse método relativamente é fácil de ser aplicado em sistemas computacionais potentes, com o uso de computadores e linguagens de programação de alto nível, porém sua execução em um microcontrolador da família 8051 tende a ser mais complexa e difícil. Esta possibilidade foi então descartada como forma de se obter um projeto mais simples.

A segunda forma considerada foi a utilização de um circuito de conversão frequência tensão. Estes circuitos convertem uma frequência de uma onda quadrada para um valor de tensão equivalente, sendo conversores frequência para tensão. Um exemplo destes circuitos, utilizando o operacional LM331 é mostrado na figura abaixo:

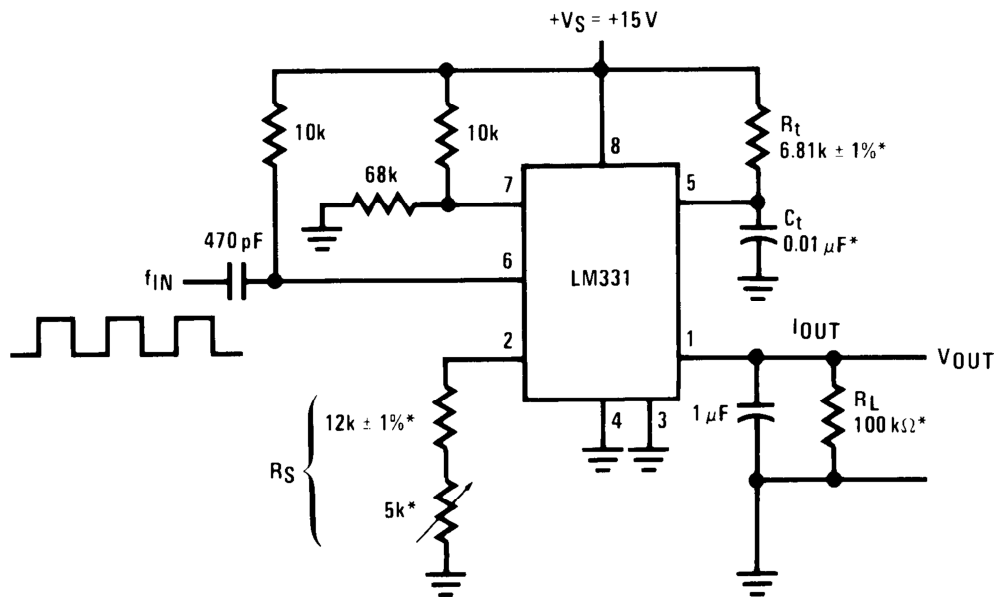


Figura 4: Circuito com LM331.

Porém a alternativa escolhida foi uma terceira, pois esta elimina a necessidade de utilização de um conversor analógico para digital na saída do circuito. Esta solução consiste em condicionar o sinal de forma a obter uma onda quadrada de mesma frequência que o sinal original e contar o número de pulsos durante certa duração de tempo. Dividindo um valor pelo outro, é obtida então a frequência do sinal. Isso é possível uma vez que a frequência do sinal não deve se alterar durante o decorrer do período de amostragem.

Esse método porém apresenta um dilema quanto a tempo de medida e resolução. Uma vez que apenas o resultado inteiro da divisão acima será utilizado, é necessária a realização de medidas durante um grande período de tempo de forma de se obter uma medida relativamente precisa. Por exemplo, para uma resolução de 0,5 Hz seria necessário realizar a contagem durante dois segundos.

Neste projeto, será utilizado um tempo de amostragem variável, conforme a magnitude da diferença entre a referência e a última frequência medida da corda. Isso foi feito como

forma de acelerar o processo de afinação. Quando ambas as frequências forem próximas, o período de contagens de pulsos será de um segundo, o que leva a uma resolução de um hertz. Essa resolução foi considerada aceitável para um protótipo, uma vez que a função deste é mostrar o funcionamento básico do sistema, porém para um sistema comercial provavelmente teria que ser feita uma análise mais profunda e detalhada de qual a resolução adequada para o projeto em questão.

## 4. MÉTODOS, PROCESSOS E DISPOSITIVOS

Depois de terem sido justificadas as principais escolhas, neste capítulo serão detalhados os principais elementos e o desenrolar do projeto.

### 4.1 APRESENTAÇÃO GLOBAL DOS ELEMENTOS DO PROJETO

Nessa parte, serão apresentados de forma mais geral os diferentes módulos que compõe o sistema final da guitarra auto-afinável. Para facilitar a explanação, começaremos apresentando o diagrama abaixo, que mostra os seus principais elementos:

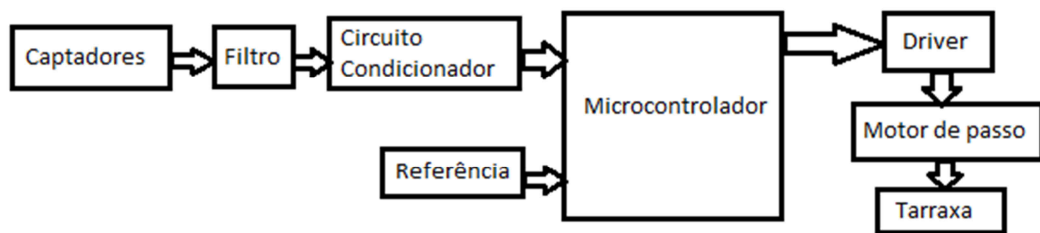


Figura 5: Diagrama de blocos do Projeto.

Seu funcionamento básico é aproximadamente o seguinte. Os captadores adquirem a onda proveniente da guitarra, cuja determinação da frequência é de nosso interesse. Essa onda é então filtrada para que possamos rejeitar todas as frequências fora de nossa faixa de interesse, diminuindo a influência do ruído e das harmônicas.

Esse sinal é então condicionado de forma que este possa ser adquirido pelo microcontrolador. Este faz uma aquisição da referência, ou seja, do valor de afinação desejado pelo usuário. Com bases nesses dois valores, o microcontrolador realiza a lógica de controle e determinar o tipo de sinal enviado ao driver.



Ao circuito de driver compete interpretar o sinal de controle recebido pelo microcontrolador e com base neste gerar um sinal adequado ao motor de passo. O motor, por sua vez, deve girar a tarraxa de forma à aproximar a corda de sua afinação desejada.

Todo esse processo é repetido tantas vezes quanto for necessário até que a corda seja afinada. Este sistema é na verdade um sistema de controle em malha fechada. Isso é mais facilmente compreensível se reajustarmos os elementos de forma a que estes correspondam com o diagrama clássico de um sistema de controle, conforme mostrado na figura abaixo:

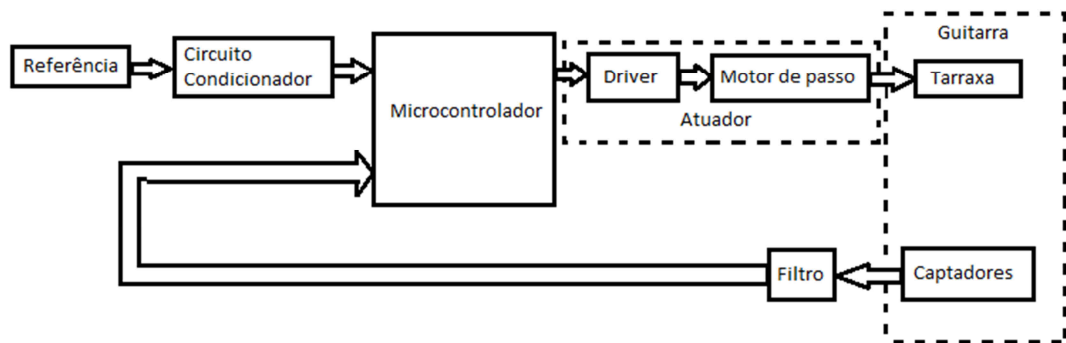


Figura 6: Visão do projeto como um sistema de controle.

Neste diagrama, a planta que queremos controlar é a guitarra. Os captadores representam o sensor e são os responsáveis pelo feedback da frequência da onda. O driver e o motor de passo podem ser considerados, em conjunto, como o atuador da planta. Por fim, como o próprio nome diz, o microcontrolador é o elemento responsável o sistema de controle.

A partir desta descrição global do sistema, passaremos a uma análise detalhada de cada elemento do conjunto separadamente.

## 4.2 OS CAPTADORES DE GUITARRAS.

Os elementos sensores, são os responsáveis por realizar a medida da onda gerada pela corda e fornecer uma saída correspondente na forma de uma onda de tensão ou corrente possibilitando a realização de um tratamento pelos demais elementos do circuito. Neste projeto, conforme tratado anteriormente, são usados captadores magnéticos.

O funcionamento dos captadores magnéticos, os mais comumente utilizados em guitarras elétricas, é baseado na lei de Faraday-Neumann-Lenz. Esta lei, também conhecida como lei de indução magnética, quantifica a indução de corrente elétrica em um condutor colocado em um campo magnético variável, ou em um condutor em movimento em um campo magnético constante.

A lei de Faraday-Neumann-Lenz afirma que, se  $N$  espiras forem enroladas de forma que o fluxo magnético atravessando cada bobina for o mesmo, pode-se afirmar que a força eletromotriz induzida em uma espira é dada por:

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

Onde  $\varepsilon$  é a força eletromotriz induzida,  $N$  é o número total de espiras e  $\phi$  é o fluxo magnético que atravessa cada espira. Pode-se verificar que precisamos uma alteração no fluxo magnético, seja por variação do campo magnético ou deslocamento do condutor para que exista uma fem induzida na bobina. Essa indução é o princípio físico por trás do funcionamento da maior parte dos captadores de guitarras atuais.

A estrutura básica de um captador é mostrada na figura a seguir. O fio que liga o instrumento ao amplificador é enrolado em torno de um pequeno ímã. O campo magnético do ímã produz um polo norte e um polo sul no trecho da corda metálica (que é feita de material magnetizável) imediatamente acima do ímã. Este trecho cria então seu próprio campo

magnético. Uma vez que a corda é tangida e, assim, passa a oscilar, seu movimento relativo à bobina varia o fluxo de seu próprio campo magnético através da bobina, induzindo nela uma corrente. Como a corda oscila se aproximando e se afastando da bobina, a corrente induzida muda de sentido com a mesma frequência da oscilação da corda, transmitindo desse modo a sua frequência ao amplificador e alto-falantes. [2]



Figura 7: Funcionamento dos captadores magnéticos.

Assim, a onda de corrente induzida na bobina tem frequência igual a da vibração da corda. Como essa frequência é a mesma da nota sonora produzida pela corda, podemos definir a nota que esta sendo tocada. A tabela abaixo nos mostra as principais frequências presentes em uma guitarra elétrica.

Tabela 1 – Relação entre frequências e notas musicais produzidas.

Frequência (hz)	Nota		Frequência (hz)	Nota	
65.4	Dó		69.3	Dó#	
73.4	Ré		77.8	Ré#	
82.4	Mi	6ª corda	87.3	Fá	
92.5	Fá#		98.0	Sol	
103.8	Sol#		110.0	Lá	5ª corda
116.5	Lá#		123.5	Si	
130.8	Dó		138.6	Dó#	
146.8	Ré	4ª corda	155.6	Ré#	
164.8	Mi		174.6	Fá	
185,0	Fá#		196.0	Sol	3ª corda
207.6	Sol#		220.0	Lá	
233.0	Lá#		247.9	Si	2ª corda
261.6	Dó		277.2	Dó#	
293.6	Ré		311.2	Ré#	
329.6	Mi	1ª corda	349.2	Fá	
370.0	Fá#		392.0	Sol	
415.2	Sol#		440.0	Lá	5ª casa da 1ª corda
466.0	Lá#		493.8	Si	

Nesta tabela estão indicados os valores que correspondem á afinação tradicional das guitarras elétricas. É importante notar que esses valores diferem dos existentes em outros instrumentos de corda. Um violino, por exemplo, tem sua corda mais aguda na frequência de aproximadamente 659 hertz. Porém como o objetivo inicial é a realização do projeto aplicado a uma guitarra, serão utilizados os valores presentes nessa tabela como base.

Como para a continuidade do projeto foi necessária a obtenção de mais informações sobre o sensor, foi realizada uma aquisição na qual a corda existente no protótipo foi tocada cinco vezes e em seguida parada. Desta forma, foi possível obter uma caracterização geral do sinal produzido pela vibração da corda e também do nível de ruído normalmente presente. Foi medida a tensão gerada pelo captador em uma resistência. O gráfico da aquisição se encontra a seguir:

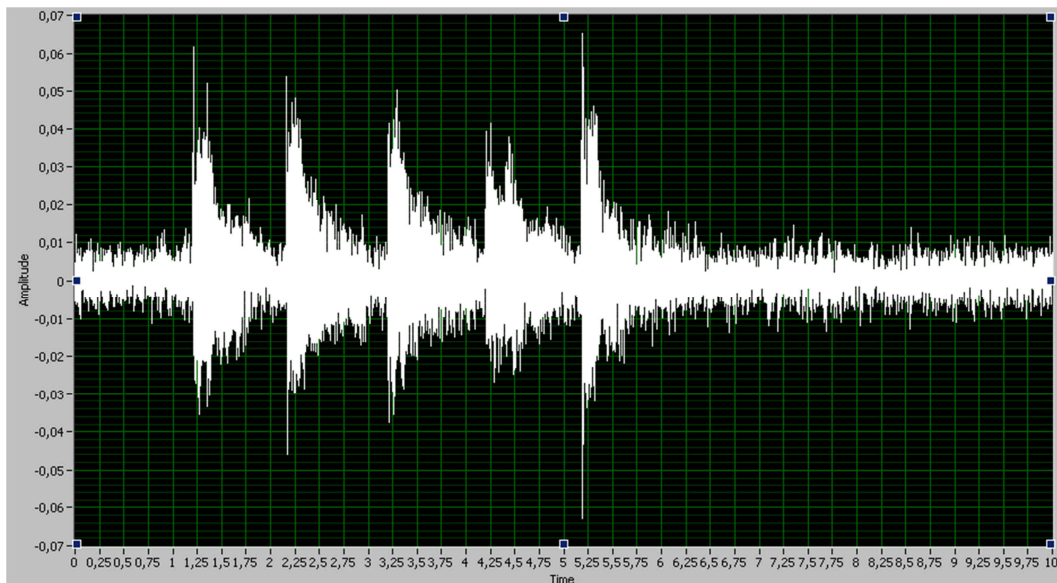


Figura 8: Aquisição proveniente do captador.

Pode-se distinguir claramente os instantes de tempos em que a corda foi tocada, representados pelos cinco picos de maior magnitude. Pode-se também concluir que o sistema sofre influência do ruído, sendo que o mesmo deve ser atenuado.

Uma preocupação presente era se a intensidade da onda obtida mudaria drasticamente com a tensão na corda ou não. Caso isto fosse verdade, um condicionador planejado para uma tensão na corda poderia não ser útil quando a mesma fosse esticada ou solta, o que não seria interessante no nosso sistema. Como forma de verificação rápida, foi feita uma amostragem de dez segundos no qual a corda era tocada diferentes vezes ao mesmo tempo em que sua tensão era alterada. O ensaio é representado pela figura abaixo:

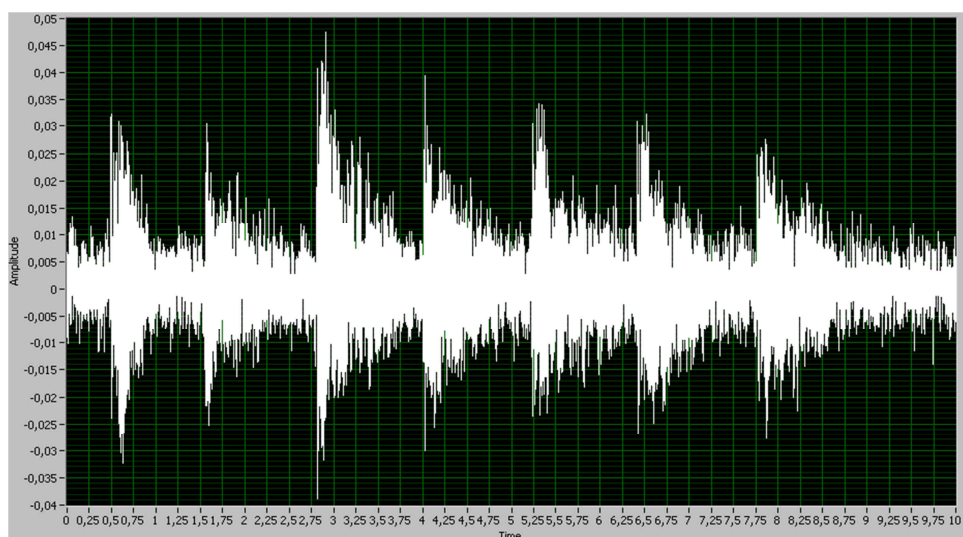


Figura 9: Segunda aquisição proveniente do captador.

Podemos ver que a amplitude varia ligeiramente conforme a tensão na corda muda, porém não é uma mudança preocupante em nosso caso, uma vez que a onda ainda é distinguível do ruído.

#### **4.2.1 MUDANÇAS NOS SENSORES NECESSÁRIAS PARA EXPANSÃO PARA OUTROS EQUIPAMENTOS.**

Quanto a uma possível expansão do sistema para o uso em outros instrumentos, seria necessário que levar em consideração o fato de que captadores elétricos não estão incluídos em todos os instrumentos musicais de corda. Na verdade, para que estes funcionem, é necessário que as cordas dos instrumentos sejam metálicas, e não de nylon, como acontece em diversos instrumentos do gênero.

Uma solução alternativa neste caso seria a substituição dos captadores magnéticos por cristais piezoelétricos. Estes cristais, normalmente compostos de quartzo, titanato de bário ou

titanato de chumbo, ao sofrerem forças de compressão, ou serem submetidos à vibração, geram uma tensão elétrica em suas extremidades.

A figura abaixo mostra um violão equipado com captadores piezoelétricos:

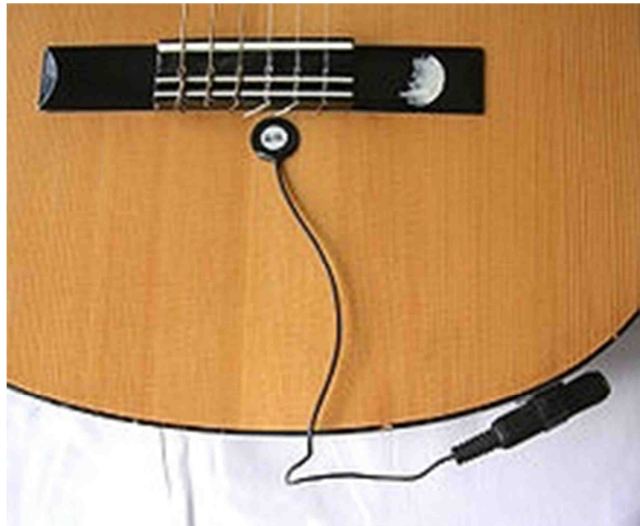


Figura 10: Violão com captadores piezoelétricos.

Esses sensores teriam a vantagem de não sofrerem com ruídos magnéticos, porém precisam normalmente de um estágio pré-amplificador, pois trabalham com uma impedância consideravelmente maior. Seu sinal pode chegar até 10V rms. Esses captadores são normalmente posicionados perto da ponte do instrumento, onde captam as vibrações e conseqüentemente o som de forma mais aprimorada.

#### **4.3 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DO SINAL DO SENSOR**

Em projetos nos quais se utiliza um sensor para realizar uma medida de uma grandeza física, muitas vezes é necessário o uso de algum circuito de condicionamento. Os condicionadores de sinal são necessários para que os sinais fornecidos pelo sensor sejam compatíveis com o exigido para uma aquisição ou processamento.

Por exemplo, existem sensores que não têm uma resposta linear em relação a grandeza medida, que apresentam uma saída de baixa intensidade, que sofrem influencia da corrente drenada pelo equipamento de medida ou que necessitam de algum tipo de correção na sua medida. Em todos esses casos, é necessário que o sinal instrumentado seja condicionado antes que possa ser utilizado.

Conforme visto na seção que tratava dos captadores de guitarra, estes tem sua saída na forma de uma onda de tensão. Temos então adaptar o mesmo para que este ser lido e processado pelo microcontrolador. Além disso, o sinal de saída dos captadores é relativamente fraco e possui muito ruído. Assim sendo, temos que amplificar o sinal e atenuar ao máximo os efeitos das perturbações.

Neste projeto, foi definido que o sistema de condicionamento receberia a onda instrumentada pelo captador e forneceria em sua saída uma onda quadrada de mesma frequência e de amplitudes compatíveis com nível lógico.

Como forma de simplificar o projeto, o circuito de condicionamento foi dividido em três estágios. Um primeiro estágio, responsável pela isolamento e pela aplicação de um ganho no sinal captado, um segundo que realiza a filtragem em frequência do sinal amostrado, e um último para adequar o sinal para aquisição pelo microprocessador. Esses três estágios serão apresentados a seguir.

#### **4.3.1 ESTÁGIO INICIAL DE CONDICIONAMENTO**

Em muitos usos de sensores é necessário que corrente drenada pelos demais elementos do circuito de condicionamento não interfira nas medidas realizadas pelo captador. Como forma de garantir que isso aconteça, será utilizado um circuito seguidor de tensão na entrada



do sistema de condicionamento. Este é um elemento simples e que garantirá o isolamento do sensor de medida do restante do bloco de condicionamento.

Em seguida, como o sinal proveniente do captador é de pequena intensidade, é necessária a aplicação de um ganho no mesmo. Além disso, este ganho garantirá uma maior separação entre o ruído e o sinal, o que é interessante para o último bloco do condicionamento. Para a aplicação do ganho, foi utilizado um circuito amplificador inversor.

Os valores das resistências deste circuito foram calculados para permitir um ganho igual a 10 apenas para fins de simulação. No sistema montado será utilizado um potenciômetro como forma de flexibilizar o sistema, permitindo sua utilização com captadores que apresentem saídas de níveis de tensão diferentes.

O circuito do estágio inicial de condicionamento é mostrado na figura abaixo, aonde V3 representa a onda de tensão proveniente do captador.:

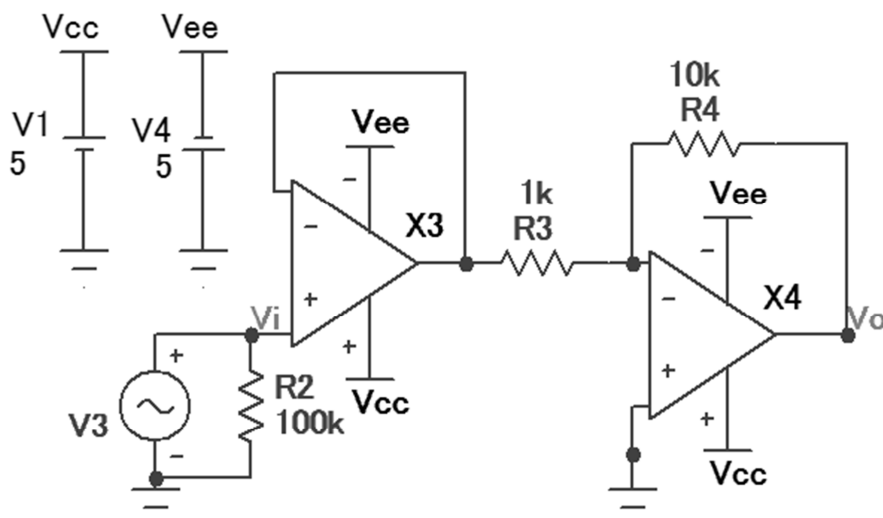


Figura 11: Circuito inicial de condicionamento.

O circuito acima teve sua resposta a uma onda senoidal pura simulada, utilizando o modelo do amplificado LM741. Esta simulação é mostrada abaixo:

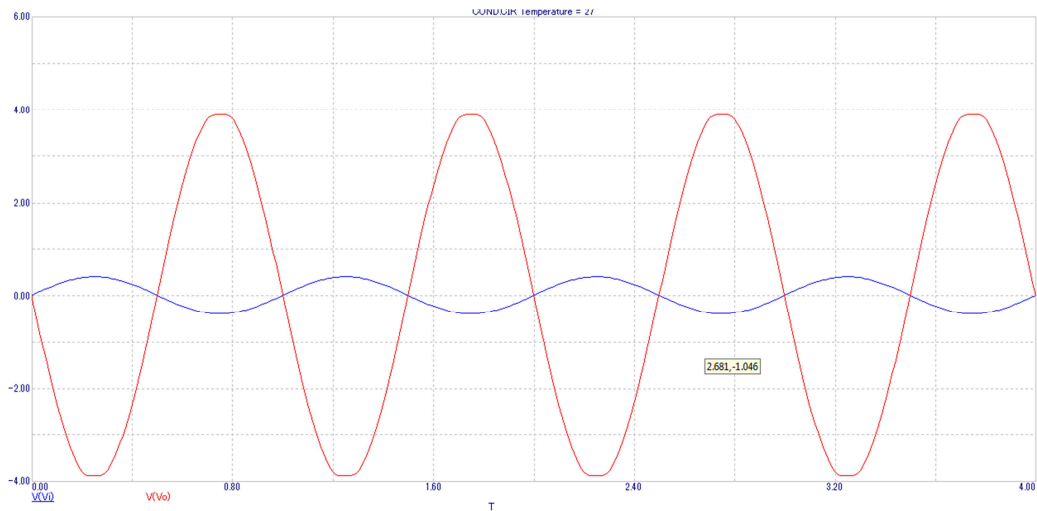


Figura 12: Simulação do estágio inicial de condicionamento.

Podemos notar que a saída do circuito representa uma amplitude muito maior do que a entrada, conforme esperado. Quanto ao fato da inversão da polaridade da onda, este não é um fator preocupante, uma vez que a onda proveniente do captador é praticamente espelhada em torno da origem, contendo partes negativas e positivas.

Quanto à questão do ruído, ela será tratada nos dois tópicos subsequentes, que tratam dos circuitos responsáveis por sua eliminação.

#### 4.3.2 O CIRCUITO SELETOR DE FREQUÊNCIAS

Os captadores utilizados no projeto são, conforme dito anteriormente, muito sensíveis a interferências, principalmente as de origem magnética. Considerando isso, é interessante que seja utilizado um circuito que reduza tanto quanto possível influência do ruído no resultado final. Neste projeto, será utilizado um filtro para retirar sinais de frequências não interessantes antes que as mesmas cheguem à etapa de processamento.

Outro uso do filtro é para a atenuação das frequências harmônicas. Com seu uso, as frequências harmônicas são amortecidas, aumentando a diferença de amplitude entre estas e a onda fundamental.

Os filtros ou circuitos de seleção de frequências são circuitos que atenuam fortemente os sinais que se encontram em uma determinada faixa de frequência indesejada, transmitindo os demais sinais com um mínimo de atenuação.

Existe uma nomenclatura básica para filtros que será aqui rapidamente apresentada, como forma de evitar possíveis discrepâncias nos termos. A banda de frequências que os filtros transmitem sem ou com pouca atenuação é chamada de banda passante. A faixa de frequências que não pertence a essa banda são chamadas de banda rejeitada.

Os limites entre essas duas bandas é representado pela frequência de corte. Essa frequência é definida como sendo aquela na qual o valor do módulo da função de transferência do filtro é igual a sua amplitude máxima dividida por  $\sqrt{2}$ , ou seja:

$$|H(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} H_{máx}$$

Conforme é possível visualizar na tabela 1 mostrada anteriormente, é nas frequências abaixo de 500 Hz que normalmente está contida praticamente toda informação necessária para este projeto. Mais especificadamente, todas as fundamentais das notas estão dentro desta faixa limitada de frequências.

Levando isso em consideração será utilizado um filtro passa baixas para retirar toda a influência causada pela presença de frequências mais altas no sinal. Definiu se então a frequências de corte de 500 hertz para esse projeto.

Neste projeto, optou-se pela utilização de um filtro Butterworth de segunda ordem, cujo processo de escolha está mostrado no Anexo I, que trata dos diferentes filtros simulados.

O circuito que implementa o filtro é mostrado na figura abaixo:

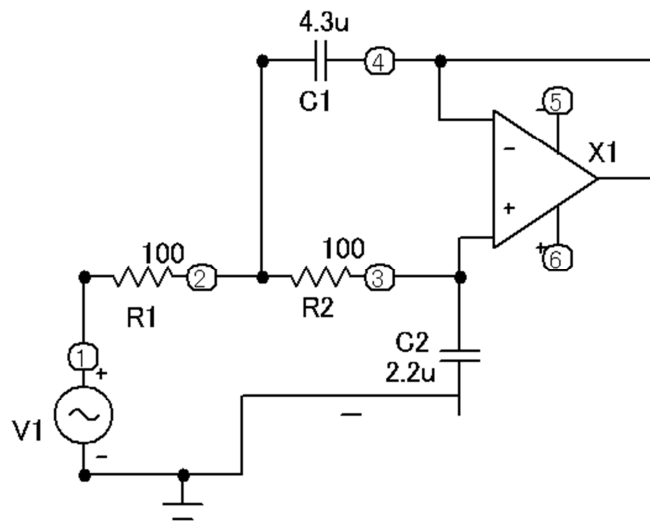


Figura 13: Circuito Butterworth de segunda ordem.

Sua simulação é mostrada abaixo:

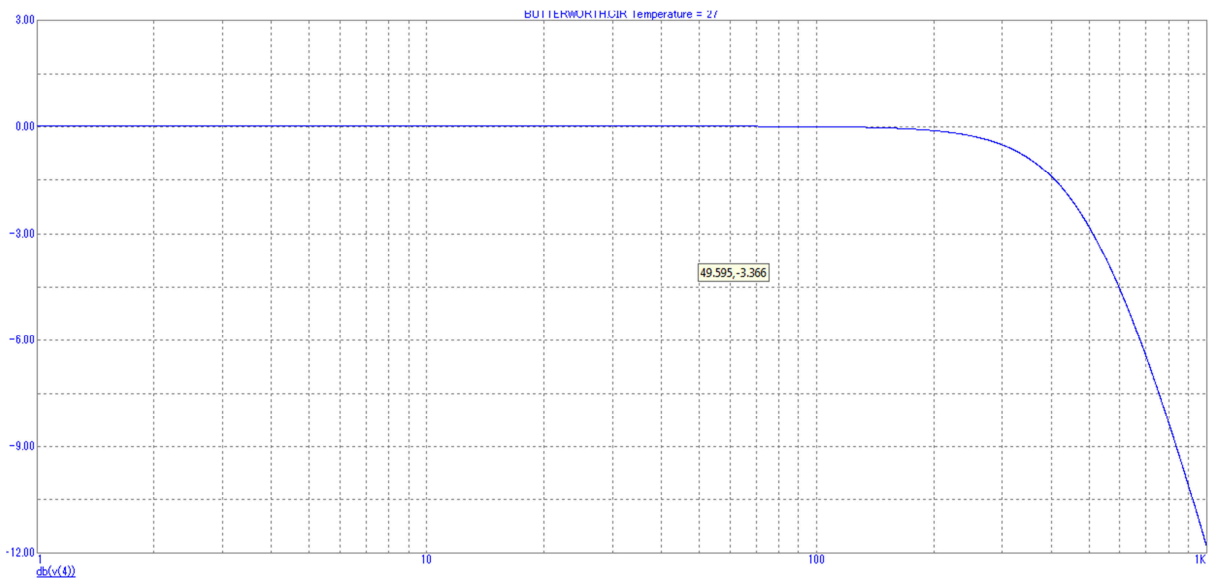


Figura 14: Simulação da resposta do filtro Butterworth.

### 4.3.3 ESTÁGIO FINAL DE CONDICIONAMENTO

Após a saída do filtro, ainda será utilizado um último circuito de condicionamento para adaptar o sinal ao esperado pelo microprocessador. Esse circuito final deve eliminar o sinal obtido caso o mesmo se encontre abaixo de um determinado nível de tensão. Isso é realizado para evitar que o microprocessador considere o ruído como uma entrada do sistema caso a corda não seja tocada.

Esse circuito também deve realizar a transformação da onda recebida em sua entrada em uma onda quadrada de mesma frequência e de níveis de tensão compatíveis com os lógicos do microcontrolador. Essa mudança é realizada para permitir a aquisição da frequência pelo pino do contador do 8051.

Este circuito é então composto de um comparador simples, que compara suas duas entradas e tem sua saída sempre saturada em uma de suas tensões de alimentação conforme a relação entre elas. Um diodo é utilizado para implementar um retificador simples, de forma que as componentes negativas sejam cortadas da onda. O circuito de condicionamento final é mostrado na figura abaixo:

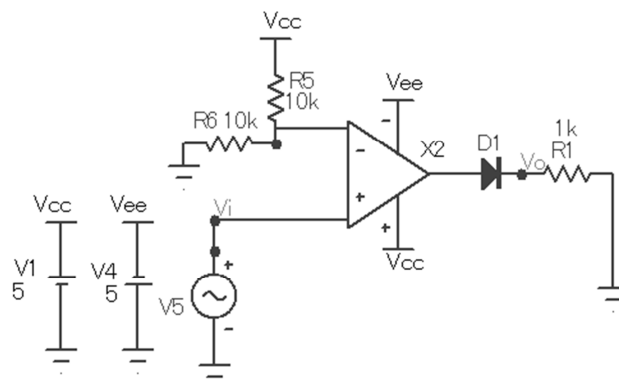


Figura 16: Estágio final de condicionamento.

No circuito montado, a resistência R6 foi substituída por um potenciômetro. Dessa forma, é possível ajustar o valor de corte do comparador simples. Isso permite um ajuste para um funcionamento adequado e uma facilidade na adaptação com outros instrumentos.

Este estágio final de condicionamento foi então simulado. Os gráficos de entrada e saída do sistema são mostrados abaixo:

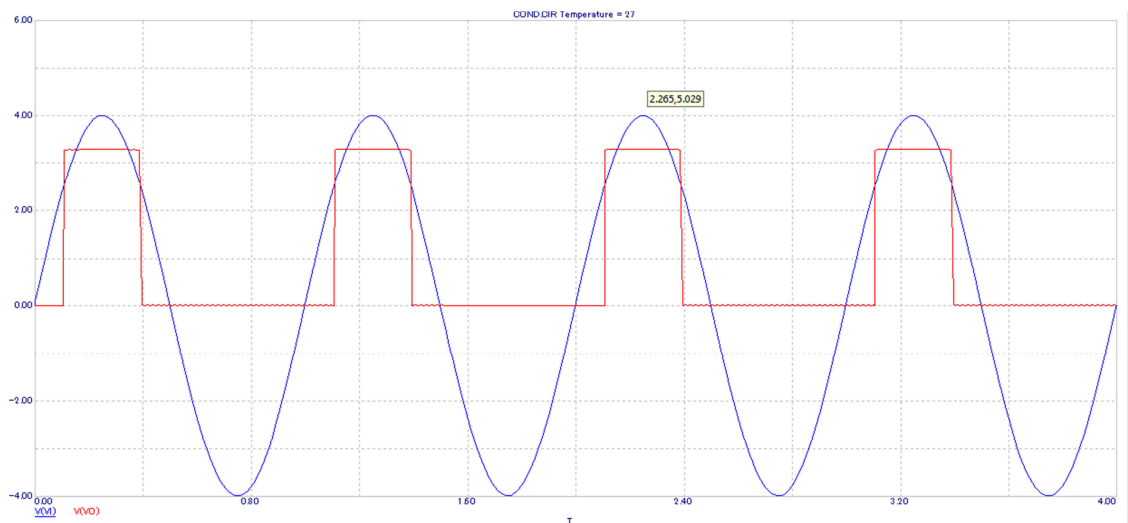


Figura 17: Simulação do estágio final de condicionamento.

Conforme o esperado, este circuito final gerou uma onda quadrada de mesma frequência da senóide recebida em sua entrada, e com níveis lógicos compatíveis com o microcontrolador. Com esse comportamento, o circuito cumpre os requisitos dele exigidos.

#### 4.3.4 CIRCUITO COMPLETO DE CONDICIONAMENTO

Os três estágios de condicionamento descritos, quando integrados, formam o seguinte circuito:

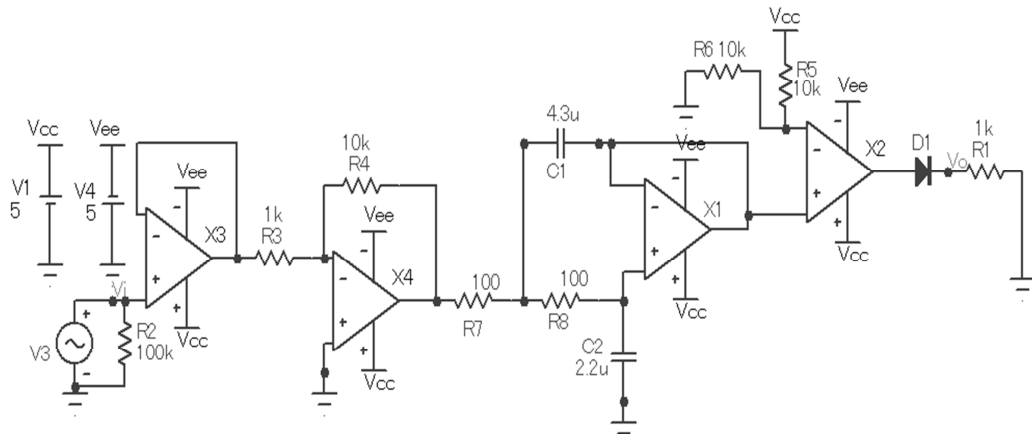


Figura 18: Circuito completo de condicionamento.

Foram então simulados três casos de funcionamento, utilizando sempre o modelo do LM741. Um destes simulando o funcionamento normal, é mostrado abaixo:

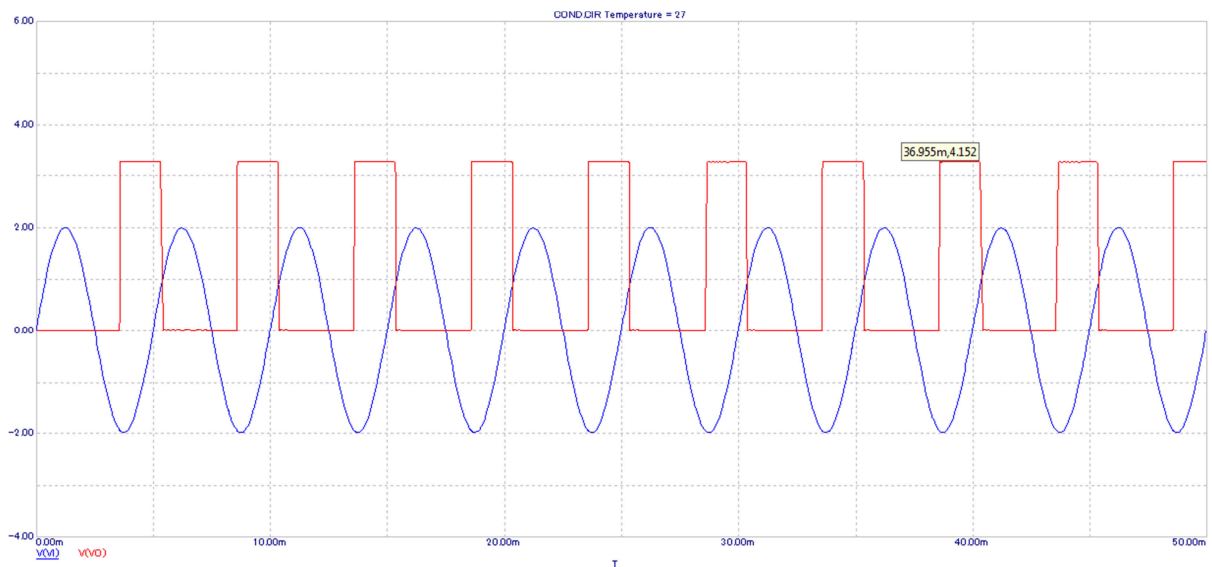


Figura 19: Simulação do circuito completo de condicionamento.

Podemos ver que é gerada uma onda quadrada de mesma frequência que o sinal de entrada, o que era desejado.

As próximas duas figuras representam uma simulação da rejeição do ruído do circuito de condicionamento. Primeiramente foi simulada a saída de um sistema com um sinal de alta frequência e verificado que a saída era nula, uma vez que seria atenuada pelo filtro ficando abaixo do valor de corte do comparador simples. Isso pode ser visto na figura a seguir.

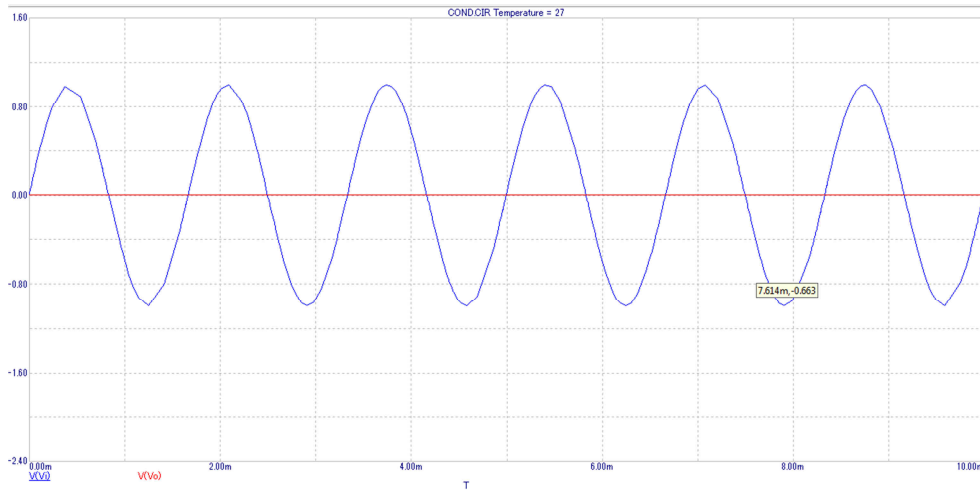


Figura 20: Resposta a uma onda de frequência elevada.

Outra simulação apresenta o resultado para uma onda de frequência mais baixa, porém de baixa intensidade e que deve ser anulada pelo comparador simples. Ela mostra que o ruído localizado na banda passante do filtro também pode ser rejeitado, uma vez que ele apresenta um nível de tensão muito menor que o do sinal. Assim, quando nenhuma corda é tocada, o sistema não considerará o ruído como informação.



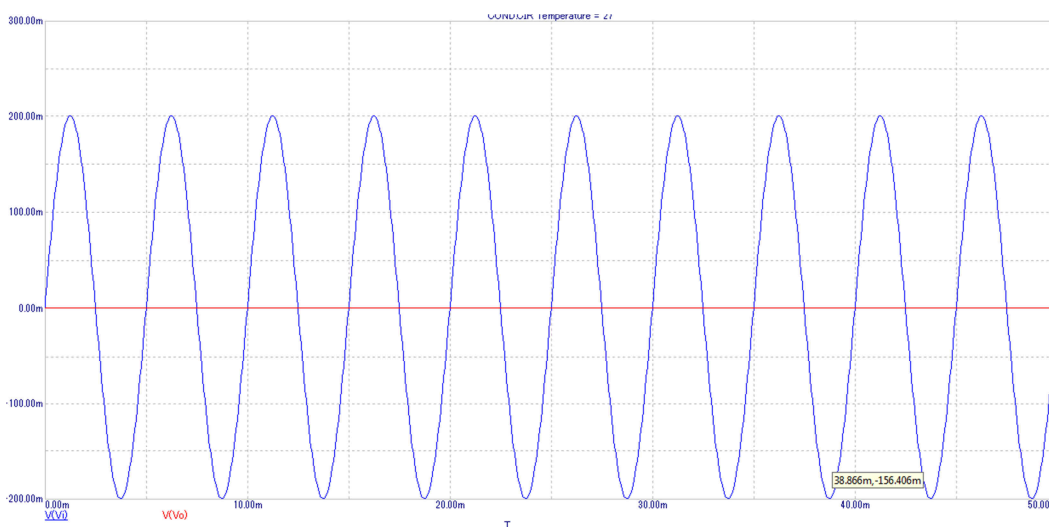


Figura 21: Resposta do circuito de condicionamento a uma onda de baixa amplitude.

Após estas simulações, o condicionador foi montado para testes práticos com ondas senoidais e também com ondas provenientes dos captadores. Durante os testes práticos, o bloco de ganho foi movido para após o filtro, uma vez que os resultados obtidos desta forma foram consideravelmente melhores.

#### 4.4 O MICROCONTROLADOR

Conforme descrito nos capítulos iniciais, neste projeto será utilizado um microcontrolador como elemento de processamento. Os microcontroladores são circuitos integrados programáveis, normalmente formados por um microprocessador, memórias e periféricos de entrada e saídas, todos estes em apenas um chip.

Neste projeto, o microcontrolador terá como tarefa a realização de toda a lógica de controle, ou seja, deve adquirir a referência fornecida pelo usuário do sistema, a onda de tensão condicionada proveniente do sensor, medir sua frequência, comparar com a referência

e com base no resultado determinar o sinal correto de controle a ser enviado para o motor de passo.

#### **4.4.1 O PROGRAMA DESENVOLVIDO**

A programação do microcontrolador é realizada com a utilização de uma linguagem de assembly própria. O programa desenvolvido para esta aplicação será mostrado e comentado durante o desenrolar deste capítulo. Dados do funcionamento interno do microcontrolador serão apresentados quando influenciarem o comportamento do programa.

O programa é responsável por comparar o valor da referência com a frequência estimada da onda instrumentada, e com base nos dois valores, gerar uma saída adequada. A frequência da corda é estimada contando o número de pulsos em um dos pinos do microcontrolador durante uma determinada unidade de tempo.

Como forma de reduzir o período de tempo necessário para a afinação sem afetar a resolução geral do sistema, o tempo de contagem dos pulsos é variável durante o processo. No início do procedimento, a entrada é estimada sobre 0,25 segundos, o que permite uma resolução de apenas 4 hertz. Quando a afinação começa a se aproximar do valor de referência, a resolução é alterada então para 2 hertz, com a mudança do tempo de estimativa para 0,5s.

Quando os dois valores, referência e estimativa, estão bastante próximos, o tempo de contagem de pulsos é então alterado para um segundo. Com isso, temos uma resolução de medida de um hertz. Para este projeto, essa resolução foi considerada adequada, uma vez que uma resolução maior implicaria na necessidade de um maior número de bits para a referência ou então em uma redução das possibilidades de frequência de entrada.

Outra otimização que visa a diminuir o tempo de afinação é a mudança de configuração da saída lógica de controle para o motor de passo. Inicialmente, o motor opera

em passo inteiro, como forma de aumentar sua velocidade de rotação. Quando a afinação está próxima de ser concluída, o mesmo começa a operar em meio passo. Isso permite um melhor ajuste do sistema.

O código programado também realiza algumas verificações relativas a possibilidade de existência de erros. Por exemplo, o valor de referência é verificado para evitar que o sistema opere com uma configuração inválida. Os valores considerados válidos para a referência vão de 70 a 500 hertz.

Outro erro que é verificado é quanto à medida atual da frequência da corda. Se esta for algum valor muito próximo de zero ou acima do valor de frequência de corte do filtro, provavelmente ocorreu um erro de medida no sistema. Em todos os casos de erro, nenhum sinal é enviado ao motor de passo.

O graficet abaixo apresenta a execução do programa principal:

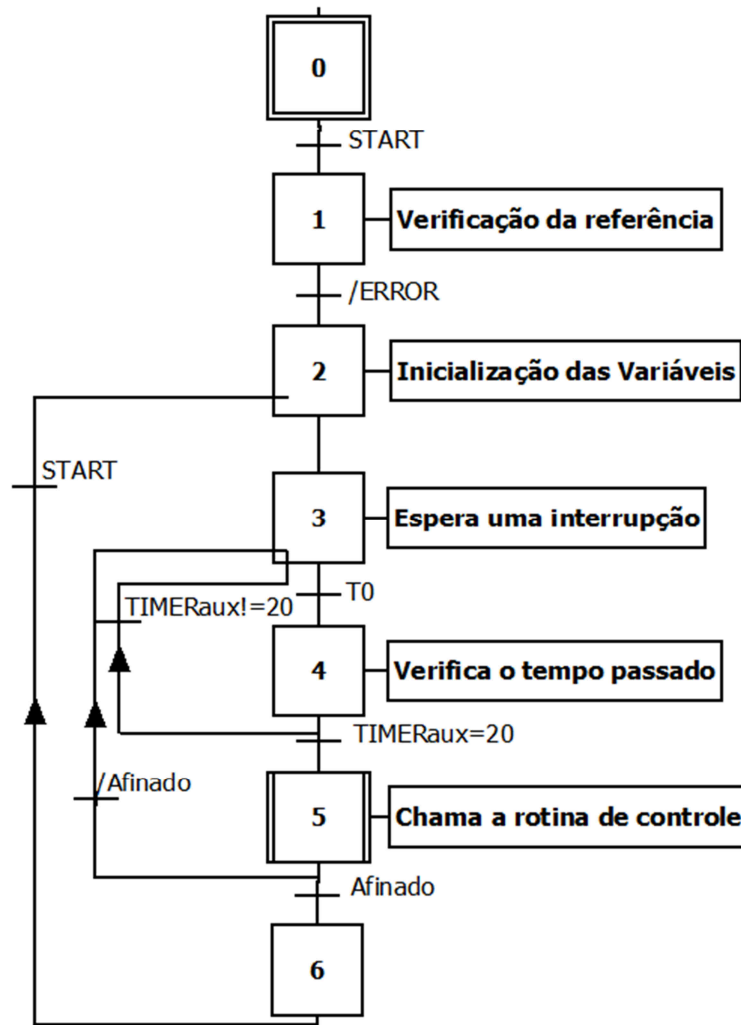


Figura 22: Grafcet do Programa Principal.

A rotina de controle é a responsável por determinar a relação entre a referência e o valor atual da tensão, chamando então a rotina que deve fornecer a lógica ao driver do motor de passo, caso a corda não esteja afinada. A rotina de controle pode ser exemplificada pelo diagrama simplificado abaixo:

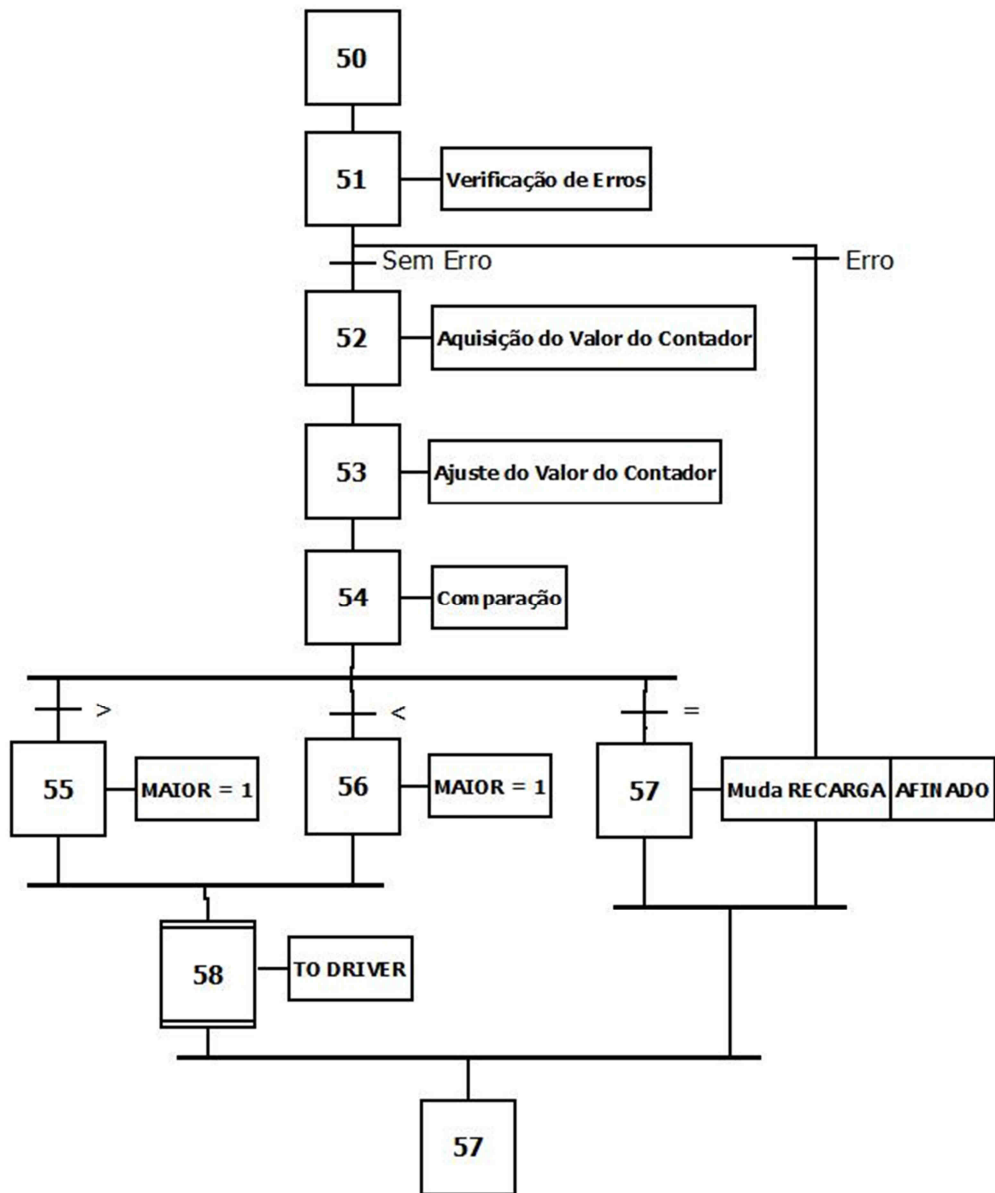


Figura 23: Grafcet da rotina de controle.

Na verdade, existem três diagramas semelhantes, um para cada período de amostragem. Algumas operações são realizadas em apenas um dos diagramas a cada período, como o sinal de Afinado, modificado apenas quando o tempo de contagem é de 1s.

Por fim, a última rotina presente é a responsável por gerar os sinais para o motor de passo, e tem seu diagrama mostrado na figura abaixo:

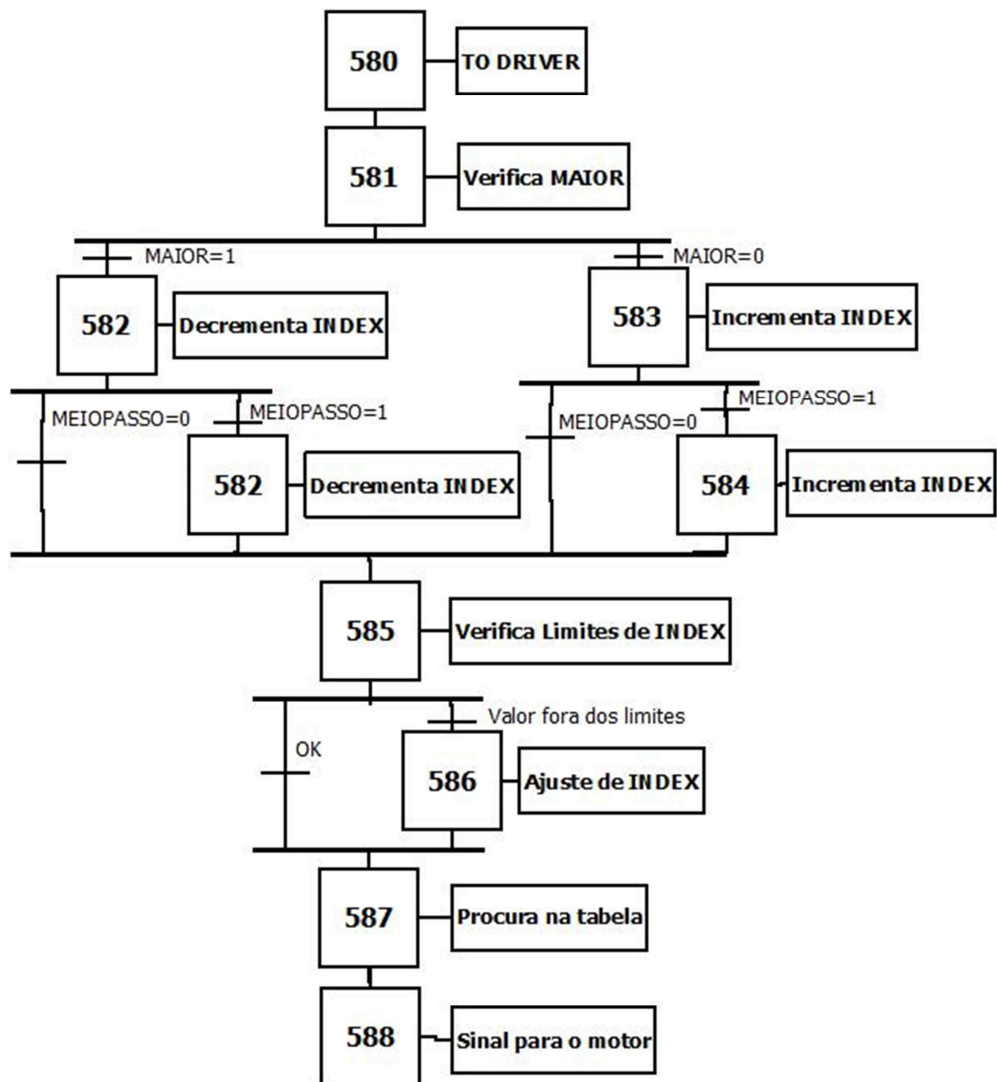


Figura 24: Grafcet da rotina de geração de sinal para o driver.

Uma análise detalhada dessas rotinas e o código escrito podem ser encontrados no Anexo II.

#### 4.5 O DRIVER DE MOTOR DE PASSO

A saída do microcontrolador já contém a lógica correta exigida para o bom funcionamento do motor. Porém devido ao fato de que os níveis de tensão entre ambos os

circuitos serem diferentes e a corrente fornecida pelo microcontrolador não ser suficiente para movimentar o motor de passo, é necessária a utilização de um circuito de driver. Este realizará a transformação entre os dois níveis de tensão, permitindo que o motor seja controlado pelo microcontrolador.

Neste projeto, essa função será desempenhada pelo integrado L293. Seu diagrama interno e seu diagrama de ligação com o motor de passo é mostrado na figura abaixo:

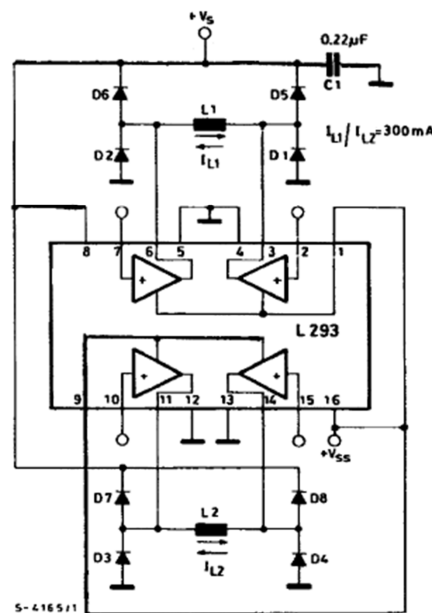


Figura 25: Circuito de Driver Utilizado.

Neste circuito, os pinos 2, 7, 10 e 15 são ligados ao microcontrolador, e os pinos 3, 6, 11 e 15 são conectados ao motor de passo.  $V_s$  representa a ligação a fonte de tensão de nível exigido pelo motor de passo e  $V_{ss}$  a fonte de tensão de nível lógico.

#### 4.6 O MOTOR DE PASSO

Neste projeto, o elemento responsável por girar a tarraxa afinando o instrumento é um motor de passo. Estes motores são normalmente utilizados quando precisamos de uma rotação em um ângulo conhecido sem o uso de nenhum mecanismo de feedback.

O funcionamento básico do motor de passo é dado pelo uso de solenoides alinhados dois a dois que quando energizados atraem o rotor fazendo-o se alinhar com o eixo determinado pelos solenoides, causando assim uma pequena variação de ângulo que é chamada de passo. A velocidade e o sentido de movimento são determinados pela forma como cada solenoide é ativado (sua ordem e a velocidade entre cada ativação). [3]

Os motores de passo podem ter qualquer número de passos, e serem operados de diferentes formas. Eles podem ser utilizados como meio passo, ou passo completo. A diferença consiste no número de bobinas polarizadas a cada turno.

Temos ainda um segundo tipo de motores de passo. Este é o bipolar, no qual os motores têm apenas um enrolamento por fase, que precisa então ser invertida para inverter um polo magnético. Estes motores têm normalmente maior torque que um unipolar de mesmo tamanho, uma vez que seus rolamentos são melhor aproveitados.

As figuras seguintes mostram os rolamentos para motores de passo unipolares e bipolares:

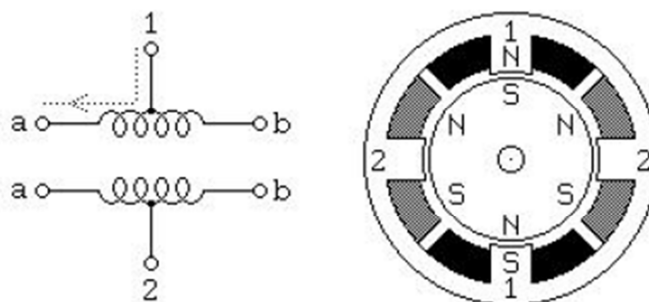


Figura 26: Rolamentos de Motor de Passo Unipolar.



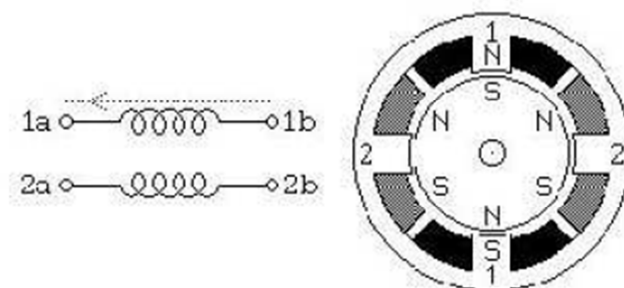


Figura 27: Rolamentos de Motor de Passo Bipolar.

O motor de passo aqui utilizado foi recuperado de uma impressora antiga. É um motor bipolar, de 4 fios, do tipo de ímãs permanentes, com impedância de entrada de  $48\Omega$ .

#### 4.7 COMENTÁRIO SOBRE OS DEMAIS ELEMENTOS DO PROJETO.

Neste projeto existem circuitos com diferentes níveis de tensão. Alguns destes, como o circuito de condicionamento precisam de uma alimentação simétrica. Outros, como o microcontrolador, precisam de uma tensão mais baixa e controlada. A forma encontrada foi o uso de duas baterias de nove volts para a realização da alimentação simétrica do circuito, e um regulador de tensão LM7805 para a tensão de 5 volts.

Outro circuito não tratado em detalhes é a interface pela qual o utilizador escolhe a frequência de referência. Esta será composta simplesmente por chaves, que permitem uma entrada simples, mesmo que não amigável ao usuário. Esse é um ponto que poderia ser desenvolvido em versões futuras do projeto. Da mesma forma, os circuitos indicadores, como os sinais AFINADO, MEIO PASSO, entre outros, são formados apenas por leds.

#### 4.8 INTERLIGAÇÃO DE DIVERSOS MÓDULOS

O protótipo descrito neste documento foi realizado para a afinação de apenas uma corda da guitarra. Porém, para que o mesmo possa ter uso prático, é necessário que seja capaz de afinar todas as cordas do instrumento. Por isso, neste capítulo trataremos de formas de que esta tarefa seja realizada.

A primeira forma, mais simples, seria a ligação em cascata de diversos módulos, cada um responsável pela afinação de uma corda. Essa ligação é exemplificada na figura abaixo:

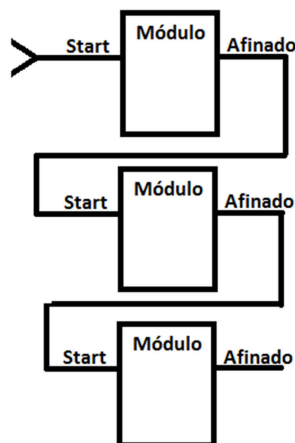


Figura 28: Ligação de Diversos Módulos em Cascata.

O funcionamento básico seria o seguinte. Ao ser dado o sinal de start no primeiro módulo, o mesmo começa sua execução. Ao terminar de afinar a corda, este indica ao próximo módulo que o mesmo pode começar a afinação através do sinal Afinado. O mesmo procedimento se repete tantas vezes quanto forem os módulos ligados em cascata.

Esse método possui algumas desvantagens bastante óbvias. Para implementá-lo precisamos replicar grande parte dos circuitos inúmeras vezes sem nunca utilizarmos toda a

capacidade de processamento de um microcontrolador. Isso leva a um maior custo e uma perda de portabilidade do sistema.

Outra forma mais inteligente seria o uso de apenas um microcontrolador cuja função de afinação seria estendida para todas as cordas da guitarra. Para isso, seria preciso liberar alguns pinos do microcontrolador. Uma boa forma de fazê-lo é eliminando a necessidade de que o microcontrolador gere o sinal com lógica correta para o driver, o que poderia ser feito com algum circuito de driver complementar. Isso levaria a um maior custo com drivers, porém o espaço ocupado por estes é menor que o ocupado por microcontroladores.

Em qualquer uma das duas opções, alguns componentes não precisariam ser replicados. Por exemplo, o circuito de condicionamento e aquisição seria o mesmo para todas as cordas. Porém, seria sempre necessário um motor de passo por corda, em qualquer uma das duas formas, a menos que seja criado algum sistema mecânico que permita alterar a corda que será girada pelo motor.

No caso da transformação do projeto em um afinador externo, apenas um dos módulos aqui desenvolvidos já seria capaz de afinar todas as cordas do instrumento, uma vez que a parte motora poderia ser desconectada de uma corda e conectada à seguinte.

## **5. Resultados Alcançados**

Em um projeto de médio ou grande porte, que envolva grande número de módulos interligados entre si, normalmente é uma boa prática a realização de testes de verificação do funcionamento para cada elemento antes de sua integração com os demais. Desta forma, a probabilidade da existência de erros do sistema final é consideravelmente reduzida, uma vez que é possível detectar mais facilmente falhas de projeto ou elementos defeituosos em blocos que em sistemas completos, por exemplo.

Essa metodologia será aqui aplicada. Cada bloco anteriormente descrito foi testado isoladamente com entradas apropriadas e teve sua resposta analisada. Após os blocos reagirem como o esperado, o sistema foi sendo integrado aos poucos e novas análises foram feitas em cima dos comportamentos obtido. Aqui serão apresentadas todas essas análises.

### 5.1 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO FILTRO.

Para o teste do filtro de frequências, foram utilizadas como entrada ondas senoidais de diferentes frequências, tanto pertencentes à banda de passagem como à banda rejeitada do mesmo. Estas ondas foram escolhidas porque permitem fácil visualização e também são as componentes fundamentais nas quais as demais ondas podem ser decompostas. A sua saída foi então medida e comparada com o previsto teoricamente e com o resultado da simulação. Aqui será medida apenas parte dos ensaios realizados, devido ao grande número destes.

No primeiro ensaio foi aplicada uma onda com frequência de 100 Hz, que é menor que a frequência de corte do filtro. Este ensaio é mostrado abaixo.

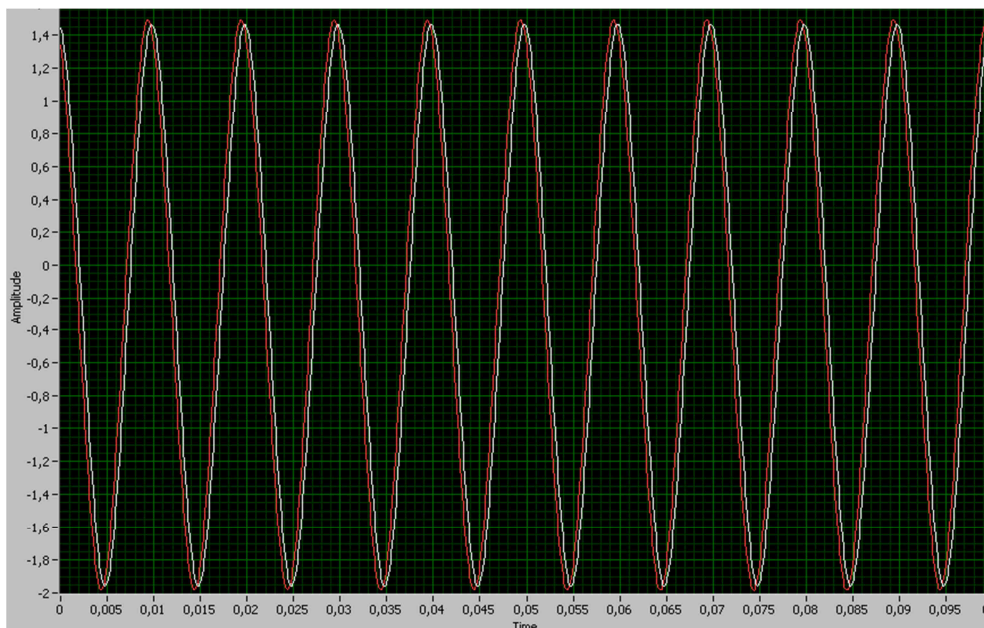


Figura 29: Resposta de Filtro à Onda com Frequência dentro da Banda Passante.

Podemos verificar que as duas ondas são praticamente as mesmas, o que era de se esperar, uma vez que o filtro deve atenuar o mínimo possível um sinal cuja frequência se encontra dentro da banda passante.

No segundo ensaio aqui mostrado, a onda aplicada tem a frequência de 800 Hz, muito acima da frequência de corte do filtro. Este deve então atenuar a onda, sendo que este comportamento foi obtido, conforme pode ser visto na figura abaixo.

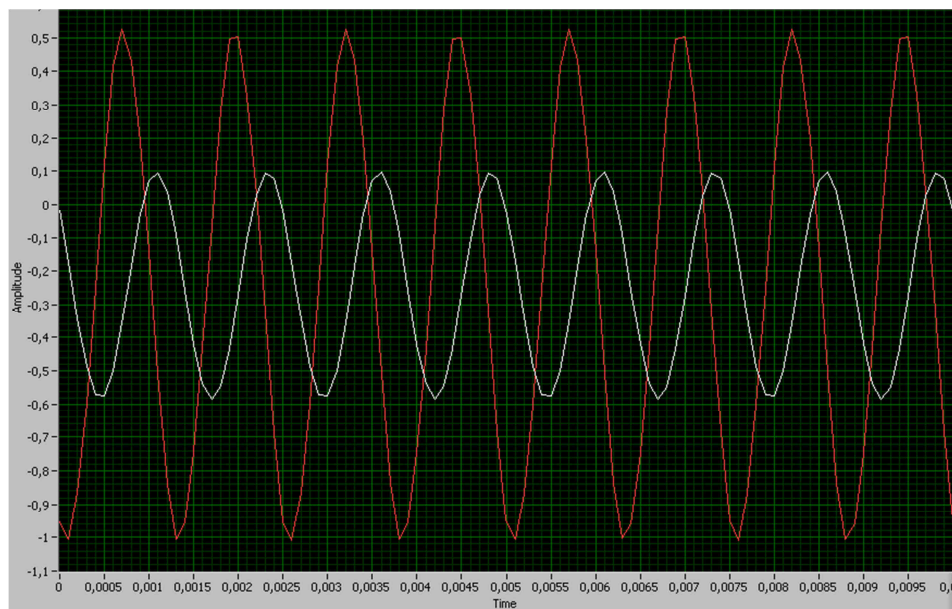


Figura 30: Resposta de Filtro à Onda com Frequência fora da Banda Passante.

Um terceiro ponto de análise foi o da frequência de corte. Uma onda com frequência de 500 Hz, valor próximo do esperado para a frequência de corte, foi aplicada na entrada do sistema. Essa onda e a resposta do filtro são mais uma vez mostrados na figura abaixo:

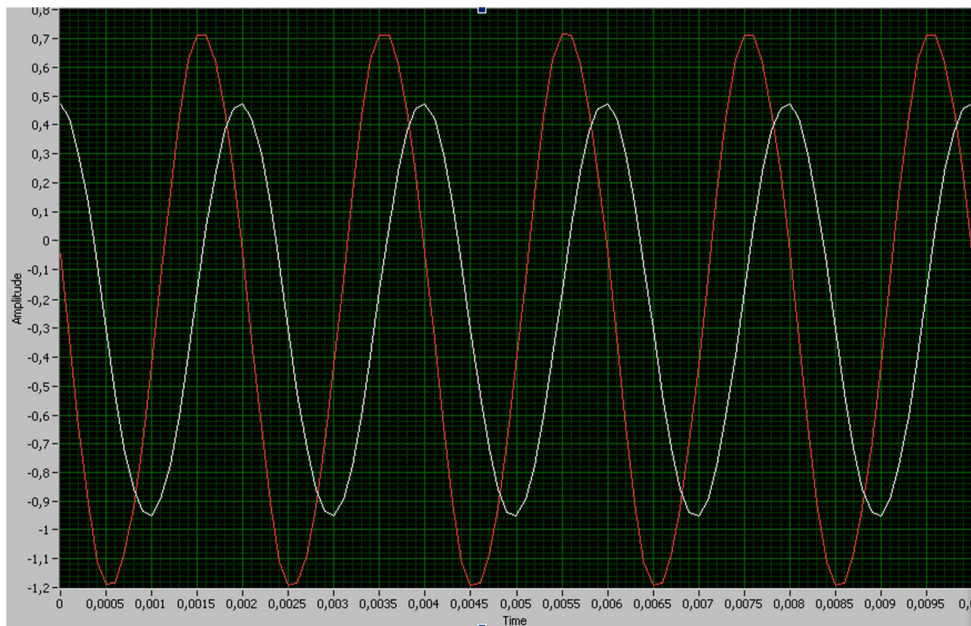


Figura 31: Resposta de Filtro à Onda com Frequência de Corte.

Para essa frequência de entrada, a magnitude da saída do filtro é próxima de 0,7 vezes o valor da entrada, conforme o comportamento esperado para a frequência de corte.

O comportamento do filtro para essas três frequências é uma forte indicação que o circuito funciona corretamente. Porém, como forma de se obter uma maior confiabilidade, o mesmo procedimento de análise foi repetido um grande número de ondas senoidais de frequências diferentes.

Com isso, é possível estimar a forma da do gráfico de ganho da função de transferência do filtro. A figura abaixo representa o ensaio obtido com o filtro montado, sendo a frequência representada no eixo horizontal em hertz e o ganho fornecido no eixo vertical:

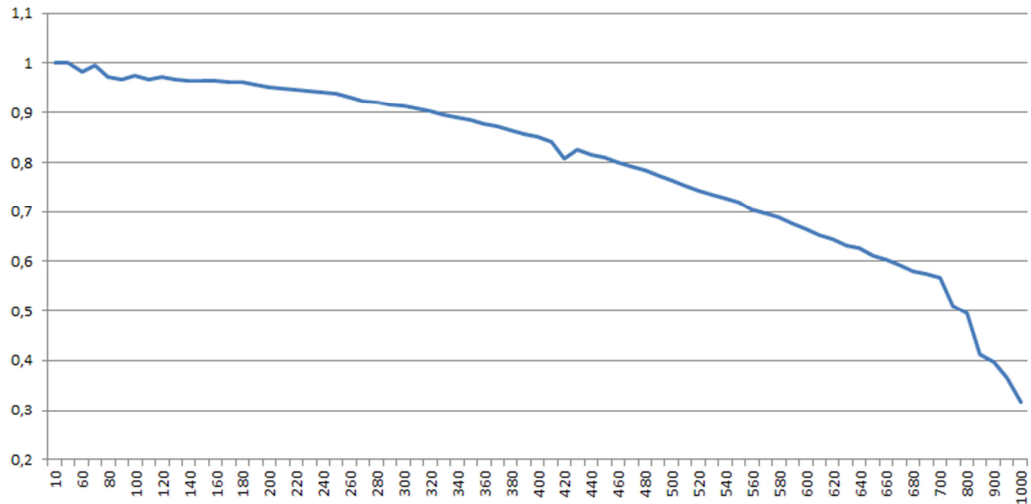


Figura 32: Ganho estimado do Filtro para diferentes frequências.

Podemos ver que, como esperado, as frequências maiores são atenuadas, enquanto que as frequências de mais baixa amplitude não, conforme o esperado para este filtro.

## 5.2 VERIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO CONDICIONADOR.

Uma vez que o filtro, considerado o elemento mais crítico do condicionador, foi testado e validado, foi realizada a validação de todo o conjunto que forma este bloco do projeto. Para isso, foi utilizado um gerador de sinais, que permitiu a geração de ondas de diferentes amplitudes e frequências. Os resultados foram então analisados, sendo que alguns exemplos mais significativos serão aqui apresentados.

A figura abaixo mostra as saídas obtidas em todos os blocos do condicionador montado:

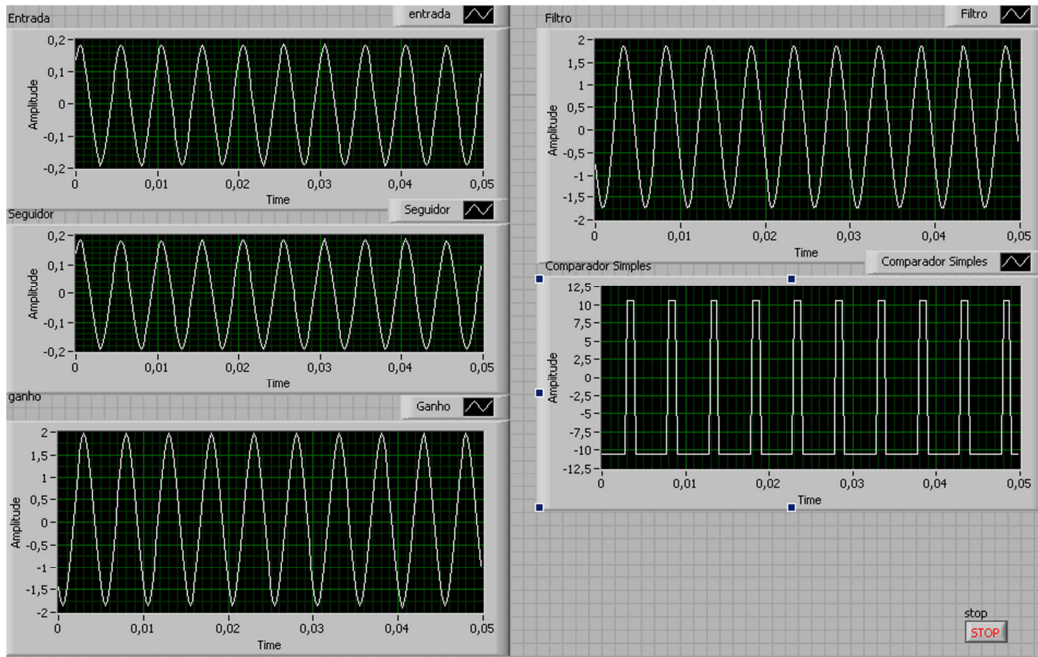


Figura 33: Aquisição da Resposta dos Módulos do Circuito de Condicionamento.

No primeiro gráfico, podemos ver a onda de entrada, uma onda senoidal pura com frequência de 200hz. O segundo gráfico foi obtido na saída do seguidor de tensão, aonde podemos ver que a onda não foi deformada, caracterizando o bom funcionamento deste circuito. O terceiro gráfico apresenta a onda adquirida após o módulo de ganho. Conforme podemos ver, a onda teve sua amplitude aumentada sem alteração em sua forma ou frequência, o que é desejável neste projeto.

O próximo gráfico representa a saída do filtro, onde é possível ver que a onda foi levemente atenuada, uma vez que a frequência se encontra dentro da banda de passagem do filtro. Por fim na saída do comparador simples é obtida uma onda quadrada que, conforme o desejado, tem a mesma frequência da onda inicial. Esse conjunto de gráficos mostra que o esperado teoricamente para a saída do condicionador nesta frequência corresponde ao atingido na prática.



É importante ressaltar que, neste ensaio, o bloco do comparador simples ainda estava incompleto, sem o diodo que atua como retificador, e sem uma alimentação de menor amplitude. Ao se alterar esses dois fatores, a onda obtida na saída tem a mesma forma, porém valores passíveis de serem interpretados pelo microcontrolador.

A figura abaixo representa os dois últimos gráficos de um ensaio em que a frequência se encontra fora da banda de passagem do filtro.

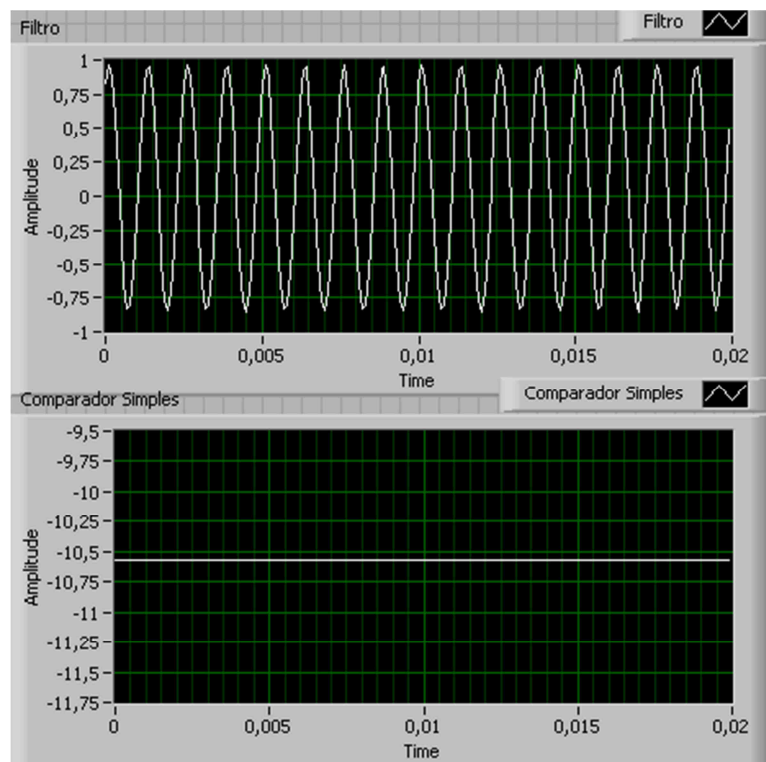


Figura 34: Rejeição de Onda de Frequência Elevada Pelo Condicionador.

Neste ensaio, o filtro atenuou a onda de tal maneira que o sinal da mesma foi menor que o sinal utilizado para comparação no comparador simples. Desta forma, não foi gerado nenhum pulso na saída do circuito condicionador, conforme desejado.

O mesmo acontece em sinais que, mesmo tendo a frequência dentro da banda de passagem do filtro, forem de amplitude menor do que o ajustado no comparador simples. Isso evita que o sistema considere o ruído quando nenhuma corda é tocada como informação.

Para obter uma maior flexibilidade, o valor de comparação foi tornado variável, com a adição de um divisor de tensão com um potenciômetro. Assim, um ajuste fino é facilitado.

### 5.3 VERIFICAÇÃO DA INTEGRAÇÃO ENTRE O CONDICIONADOR E OS CAPTADORES.

Os testes de validação acima descritos garantiam que o circuito de condicionamento se comportava conforme o previsto teoricamente, porém não garantiam o bom funcionamento destes quando conectados ao captador, uma vez que a onda de saída deste é consideravelmente mais complexa que uma senóide simples.

Como forma de verificação, foram feitas duas aquisições. Uma do sinal proveniente do captador e outra da saída do circuito de condicionamento. Em ambas as aquisições, foi realizada uma análise espectral como forma de verificação da frequência de maior peso presente. A figura abaixo mostra o resultado desta experiência:

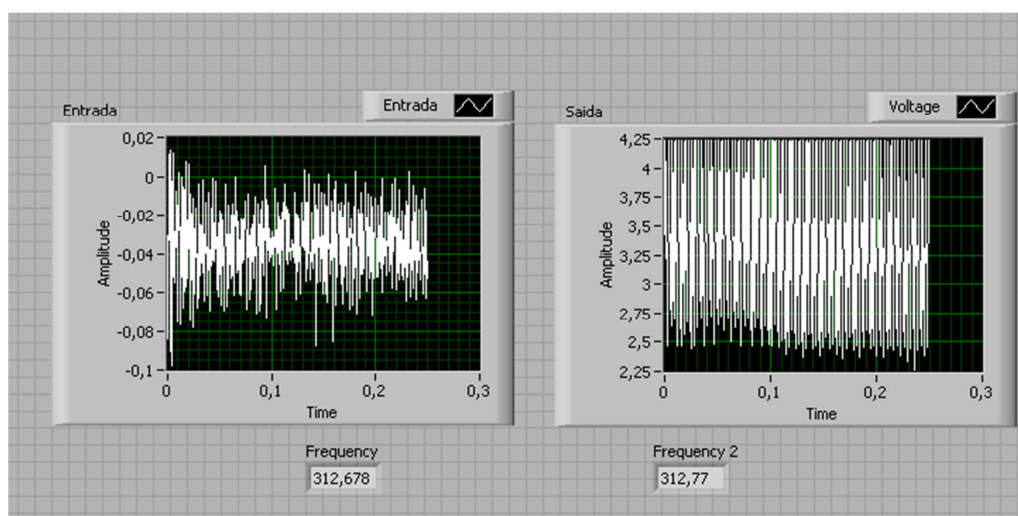


Figura 35: Análise da interligação dos captadores ao circuito de condicionamento.

Pode-se verificar que a onda de saída do circuito condicionador possui forma semelhante ao esperado, oscilando ente 2,25 e 4,25 volts. Porém, o mais importante, é que ambas as ondas tiveram a mesma frequência fundamental. Assim, a frequência original da onda não foi deformada, o que é necessário para o bom funcionamento do sistema.

#### **5.4 TESTES FINAIS.**

Após a finalização dos testes iniciais anteriormente descritos, o sistema passou a uma etapa de testes finais, nos quais o objetivo era verificar se este era capaz de afinar satisfatoriamente a corda do protótipo.

Várias combinações válidas de referências e de estados iniciais da corda foram usados, e em todos os testes, a corda foi afinada corretamente, desde que a mesma tenha sido tocada com força suficiente para que oscile durante o período desejado.

#### **6. POSSÍVEIS MELHORIAS FUTURAS.**

Este projeto foi desenvolvido como sendo um protótipo de uma guitarra auto-afinável. Assim sendo, é um projeto com muitas possibilidades de melhorias ou avanços futuros, algumas das quais, como a expansão para outros instrumentos, já foram tratadas durante todo o decorrer deste documento. Nesse capítulo, algumas dessas mudanças serão citadas e exemplificadas.

##### **Utilização de um microcontrolador voltado para o processamento de sinais.**

O microcontrolador utilizado neste projeto foi definido pelo fato ser de fácil utilização e o modelo estudado durante o curso. Porém uma boa escolha seria o uso de um microcontrolador mais potente. Um exemplo possível seria o uso de um DSpic, que possui entradas analógicas e um processador de digital de sinais embutido.

O uso deste processador permitiria que o cálculo da frequência da onda de entrada fosse feita através de uma transformada de Fourier. Esse procedimento é sem dúvida mais confiável que o aqui desenvolvido, e eliminaria a necessidade de parte do circuito de condicionamento desenvolvido.

### **Concepção de uma interface mais amigável com o utilizador.**

Um dos pontos no qual este projeto não foi muito desenvolvido foi na concepção da interface pela qual o usuário escolhe a nota a ser afinada e acompanha o procedimento de afinação. O uso de chaves torna entrada da referência difícil e passível de erros.

O ideal seria o desenvolvimento de um decodificador que fosse capaz de, através de uma interface simples, como um botão giratório, por exemplo, determinar a referência e fornecer o sinal necessário ao microcontrolador. O mesmo pode-se dizer do uso de um display para exibição do estado atual de funcionamento.

### **Consideração das limitações físicas do instrumento.**

Conforme discutido anteriormente, o utilizador da guitarra pode escolher qualquer frequência para a afinação de uma corda, dentre uma gama de frequências disponíveis. Porém, devido às limitações físicas de cada corda, estas não podem ser afinadas em uma frequência qualquer, mas sim em uma determinada faixa. O ideal seria permitir apenas a seleção da referência entre uma destas, eliminando assim a necessidade de grande número de bits de entrada de referência.

## 7. CONCLUSÃO

Nos testes práticos realizados, o sistema conseguiu afinar satisfatoriamente a corda da guitarra, cumprindo assim a sua função principal. Como as premissas básicas do sistema foram cumpridas, podemos considerar este como válido para a aplicação desejada. Com um maior período de tempo e uma maior quantidade de recursos, certamente os objetivos seriam expandidos e um produto final de ainda melhor qualidade teria sido gerado.

Inúmeras escolhas tiveram que ser feitas durante seu desenvolvimento, muitas das quais talvez não fossem sempre as mais adequadas, porém todas tem uma justificativa. Esse processo de tomada de decisões é muito importante na carreira de um engenheiro, uma vez que o mesmo que este não ocupe sempre cargos de gestão, terá muitas vezes de realizar escolhas técnicas e defendê-las em frente a sua equipe de trabalho.

Este projeto foi desenvolvido tentando-se levar em conta inúmeros fatores que muitas vezes são apenas considerados em projetos realizados em empresas reais, como custo final do produto e facilidade de compreensão de seu funcionamento. Além disso, envolveu conhecimentos obtidos em várias disciplinas do curso, como microcontroladores, sistemas de controle, instrumentação, eletrônica, entre outros.

Desta forma este projeto pode ser visto não somente como uma forma de preparação para o mercado de trabalho como também uma parte importante na formação do aluno. Este trabalha os diversos ramos existentes na engenharia elétrica e, ainda mais importante, as interconexões entre estes.

Pode-se dizer que essa gama variada de conhecimentos técnicos obtidos durante o curso de engenharia, aliados com uma pesquisa e trabalho árduo foram fatores determinantes para o desenvolvimento deste projeto.

## 8. REFERÊNCIAS BIOGRÁFICAS

- [1] S. Heath, **Embedded Systems Design**, Segunda Edição, 2003, Newnws.
  - [2] Halliday, D. Resnick , **Fundamentos de Física**, volume 3. Quarta Edição. LTC Editora.
  - [3] F. G. Brites, V. P. A. Santos, **Motor de passo**, PET, Universidade Federal Fluminense, 2008.
  - [4] J. W. Nilsson, S. A. Riedel, **Circuitos Elétricos**, Quinta Edição. Editora LTC. 1996.
  - [5] Sedra, Smith , **Microeletrônica**, Editora Makron Books, 1998.
- Intel, **MCS 51 MICROCONTROLLER FAMILY USER'S MANUAL**, Fevereiro de 1994.
- Datasheets dos componentes citados.

## Anexo A – Equacionamento dos filtros analógicos.

Circuitos e equacionamentos retirados da referência [5].

### Filtro passivo de primeira ordem: Circuito RL;

Um modelo simples de filtro passa-baixas é um circuito RL, como o mostrado na figura a seguir:

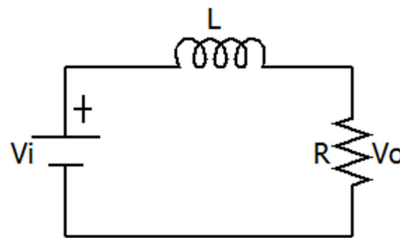


Figura 36: Filtro passivo de primeira ordem.

Neste circuito, é considerado que a fonte  $V_i$  varia sua frequência, representando as diferentes componentes em um sinal real. O resistor não varia sua impedância com mudanças na frequência do circuito. Já para o indutor, pode-se afirmar que:

$$X_L = j\omega L$$

Assim, para baixas frequências, a impedância do indutor será muito inferior à apresentada pelo resistor. Assim, praticamente toda amplitude do sinal de entrada será passada para a saída do circuito. Já para frequências mais elevadas, a impedância do indutor terá um valor muito maior do que a da resistência. Assim, as frequências mais elevadas são atenuadas.

A tensão de saída sobre o resistor é dada pelo divisor de tensão:

$$V_o = V_i \frac{X_R}{X_R + X_L}$$

Logo, a função de transferência deste é dada por:

$$H(j\omega) = \frac{R}{j\omega L + R}$$

Dividindo o numerador e o denominador pelo valor da indutância obtemos:

$$H(j\omega) = \frac{\frac{R}{L}}{j\omega + \frac{R}{L}}$$

Extraindo seu módulo temos:

$$|H(j\omega)| = \frac{\frac{R}{L}}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}}$$

Para encontramos então a frequência de corte, utilizamos sua definição:

$$|H(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} H_{máx}$$

Como  $H_{máx}$  ocorre quando  $\omega = 0$ , temos a seguinte igualdade:

$$|H(j\omega_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{\frac{R}{L}}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}}$$

Da qual obtemos a frequência de corte deste filtro:

$$\omega_c = \frac{R}{L}$$

Como o desejado é um filtro com  $f_c = 500\text{hz}$ , escolhemos os valores hipotéticos para componentes  $R=3,14 \Omega$  e  $L=100\mu\text{H}$ . Esses não são valores reais, sendo utilizados apenas para simulação.

A figura abaixo apresenta o resultado de uma simulação do comportamento deste filtro, realizada no programa Microcap.



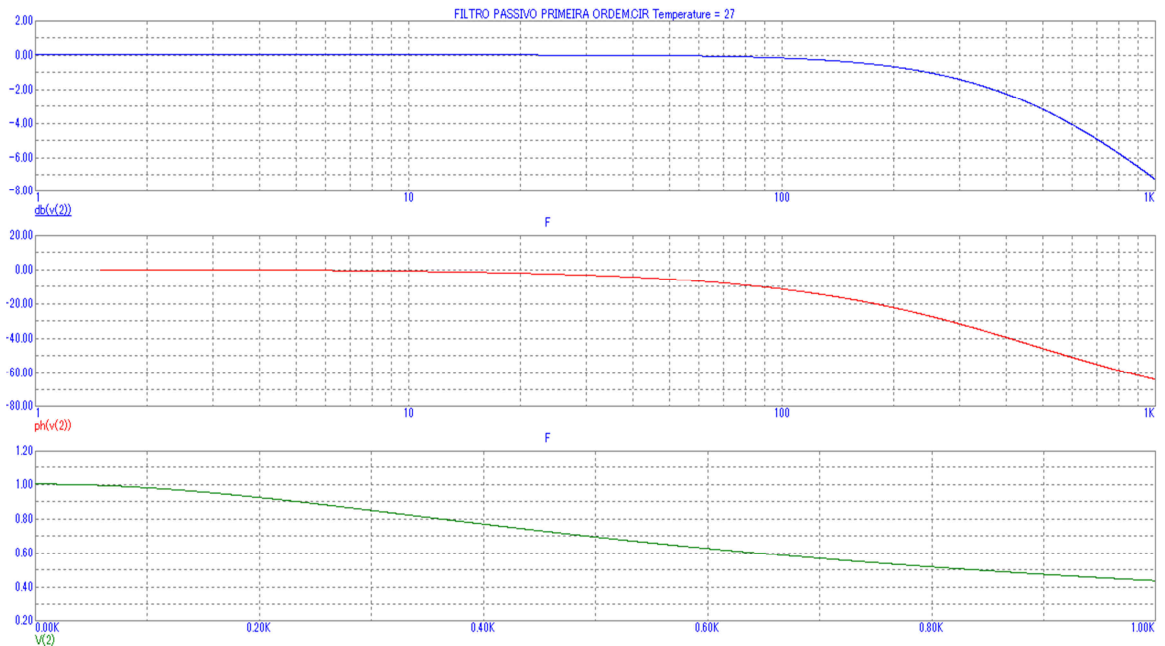


Figura 37: Simulação de filtro passivo de primeira ordem.

Podemos ver pelos gráficos que as frequências mais elevadas são atenuadas, enquanto as frequências mais baixas são menos afetadas. Conforme o afirmado anteriormente, para a frequência de corte definida temos:

$$|H(2\pi j * 500)| = \frac{1}{\sqrt{2}} H_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.7$$

Esse filtro chamado de filtro passivo, uma vez que utiliza apenas elementos passivos. Apesar de ser um filtro de relativa facilidade de projeto e implementação, apresenta algumas desvantagens quando comparado aos filtros ativos, nome pelo qual são chamados aqueles que utilizam amplificadores operacionais.

Por exemplo: é possível projetar filtros ativos de banda de passagem e banda de rejeição sem recorrer a indutores. Isso é desejável porque os indutores são em geral mais volumosos, pesados e dispendiosos do que outros componentes e podem introduzir interferências eletromagnéticas capazes de prejudicar a resposta de frequência do sistema. [4]

Além disso, os filtros passivos nunca tem o módulo de sua função de transferência maior do que a unidade, não sendo capazes de amplificar os sinais de entrada. Isso não é verdade para os filtros ativos. Além disso, para os primeiros, a resposta do sistema depende da carga ligada ao filtro. Devido às vantagens apresentadas, foi decidido pela utilização de um filtro ativo neste projeto.

Para a comparação, foram simulados três tipos de filtros diferentes, sendo os mesmos aqui apresentado:

### Filtro Ativo de Primeira Ordem:

O primeiro circuito simulado que implementa um filtro ativo é mostrado na figura abaixo:

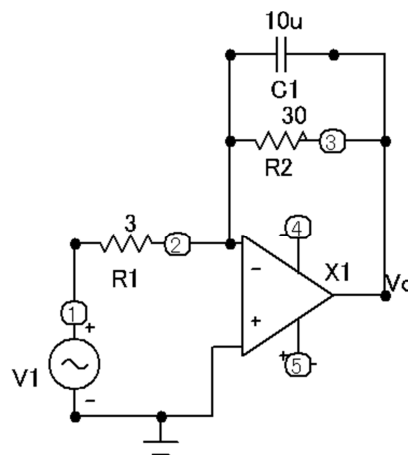


Figura 38: Circuito de filtro ativo de primeira ordem.

Como em um amplificador ideal ambas entradas tem o mesmo nível de tensão, podemos considerar que existe um terra virtual no nó 2 deste circuito. A tensão de saída será igual à tensão existente no paralelo entre as impedâncias  $R_2$  e  $C_1$ . A corrente que passa por essa impedância é a mesma que passa em  $R_1$ , desprezando-se a corrente de entrada do amplificador.

Essa corrente é dada por:

$$I_1 = \frac{V_i}{R_1} A$$

E o paralelo entre as duas impedâncias é dado por:

$$Z_p = \left( \frac{R_2}{1 + sC_1R_2} \right) \Omega$$

Multiplicando se ambas, temos a tensão de saída do circuito:

$$V_o = -\frac{V_i}{R_1} \left( \frac{R_2}{1 + sC_1R_2} \right) Volts$$

Da qual podemos obter:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \left( \frac{1}{1 + sC_1R_2} \right) = -K \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Volts$$

Aonde podemos obter o ganho do filtro na banda passante:

$$K = \frac{R_2}{R_1}$$

E a sua frequência de corte:

$$\omega_c = \frac{1}{R_2C_1} rad/s$$

Para simulação, foram selecionados os valores de  $C_1=10 \mu F$ ,  $R_2 = 30\Omega$  e  $R_1 = 10\Omega$ .

Esta simulação é mostrada na figura abaixo:

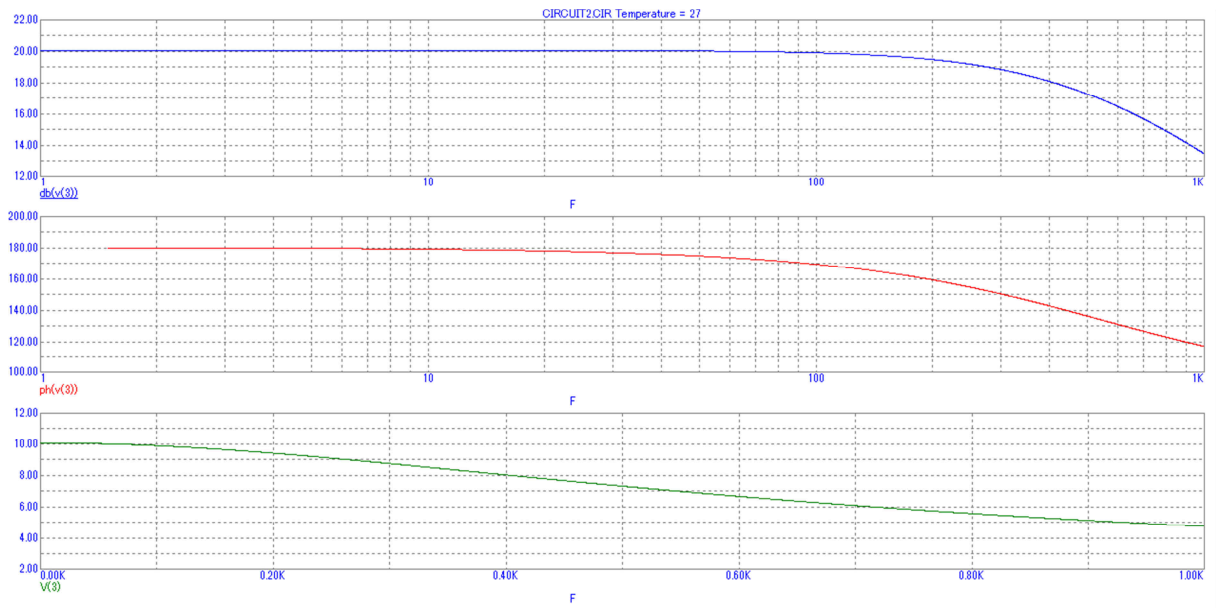


Figura 39: Simulação de filtro ativo de primeira ordem.

### Filtro de Butterworth de segunda ordem:

Os filtros de Butterworth passa-baixos de ordem  $n$  são definidos como tendo módulo de sua função de transferência respeitando a equação abaixo:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_c)^{2n}}}$$

De onde pode-se obter que:

$$|H(j\omega)|^2 = H(j\omega)H(-j\omega)$$

Ao equacionar os filtros de Butterworth, normalmente é utilizado um filtro protótipo, isto é, é realizado o cálculo para um filtro tendo frequência de corte de um radiano por segundo, e depois de terminados os cálculos é realizada uma mudança de escala para definir os componentes.

Com isso, é possível dizer que para esse filtro protótipo:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} = \frac{1}{1 + (-1)^n s^{2n}}$$

O próximo passo a ser realizado é o cálculo das raízes do denominador. Quando são obtidos estes valores, atribuímos as raízes localizadas no semiplano direito a  $H(-j\omega)$  e as demais a  $H(j\omega)$ . Assim é obtida como resposta um filtro que será estável.

Para um filtro de ordem 2, temos que encontrar as raízes para:

$$1 + (-1)^2 s^4 = 0$$

Ou seja:

$$s^4 = -1$$

Temos então quatro raízes:

$$s_1 = 1/\sqrt{2} + j/\sqrt{2}$$

$$s_2 = 1/\sqrt{2} - j/\sqrt{2}$$

$$s_3 = -1/\sqrt{2} + j/\sqrt{2}$$

$$s_4 = -1/\sqrt{2} - j/\sqrt{2}$$

Como as duas primeiras estão no semiplano esquerdo, são as duas raízes de  $H(j\omega)$ .

Assim:

$$\begin{aligned} H(j\omega) &= \frac{1}{(1/\sqrt{2} + j/\sqrt{2})(1/\sqrt{2} - j/\sqrt{2})} \\ &= \frac{1}{(j\omega)^2 + \sqrt{2}(j\omega) + 1} \end{aligned}$$

O circuito de Butterworth utilizado para obter essa equação de transferência é mostrado novamente na figura abaixo.

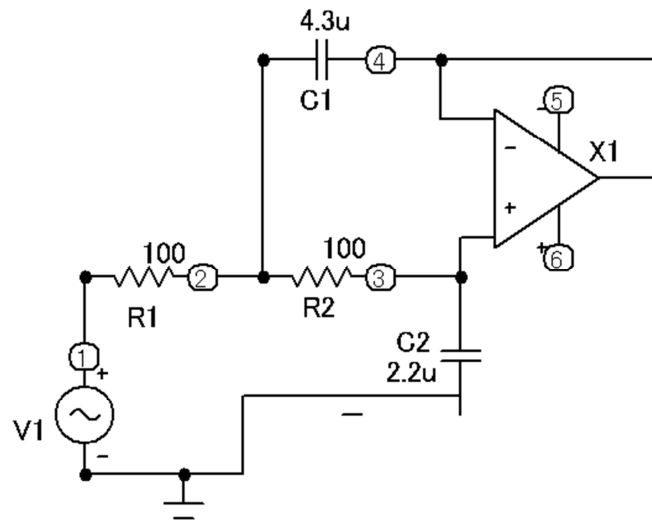


Figura 40: Circuito de filtro Butterworth de segunda ordem.

Podemos escrever para o nó 2, considerando um amplificador ideal e duas resistências iguais  $R=1\Omega$ :

$$V_2 - V_i + (V_2 - V_o)sC_1 + V_2 - V_3 = 0$$

E para o nó 3:

$$V_3sC_2 + V_3 - V_2 = 0$$

Considerando que  $V_3 = V_o$ , podemos obter:

$$V_2(sC_1 + 2) - V_o(sC_1 + 1) = V_i$$

$$V_o(sC_2 + 1) = V_2$$

Substituindo a segunda equação na primeira obtemos:

$$V_i = V_o(sC_1 + 2)(sC_2 + 1) - V_o(sC_1 + 1)$$

Desenvolvendo a equação obtemos:

$$\begin{aligned} V_i &= V_o(s^2C_1C_2 + 2sC_2 + sC_1 + 2 - sC_1 - 1) \\ &= V_o(s^2C_1C_2 + 2sC_2 + 1) \end{aligned}$$

O que equivale a equação de transferência:

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(s^2 C_1 C_2 + 2s C_2 + 1)} = \frac{1/C_1 C_2}{s^2 + \frac{2}{C_1} s + \frac{1}{C_1 C_2}}$$

Comparando com a equação do filtro, vemos que temos duas condições a cumprir, sendo elas:

$$\frac{2}{C_1} = \sqrt{2}$$

$$\frac{1}{C_1 C_2} = 1$$

Obtemos assim, para o filtro protótipo,  $C_1 = 1,41F$  e  $C_2 = 0.707F$  como valores de componentes. Porém esses valores não são realistas, nem correspondem a frequência de corte desejada. Para adaptá-los são utilizados dois conceitos: Mudança de escala de amplitude e escala de frequência.

Para a mudança da escala de amplitude de um circuito, é multiplicada a amplitude de suas impedâncias para uma determinada frequência por um valor de escala, que aqui será chamado de  $k_m$ . Assim, são obtidos como novos valores:

$$R' = k_m R \text{ e } C' = C / k_m$$

Para a mudança da escala de frequência de um circuito, são alterados os parâmetros do circuito de tal forma que as impedâncias dos mesmos sejam a mesma na nova frequência como eram na antiga. A impedância dos resistores não é alterada pela frequência da fonte. Já a dos capacitores pode ser calculada utilizando um valor de escala, aqui chamado de  $k_f$ .

$$C' = C / k_f$$

Quando são aplicadas as duas ao mesmo tempo, temos que:

$$R' = k_m R \text{ e } C' = C / k_m k_f$$

Como é desejada uma frequência de corte de 500 Hz, para a alteração do valor dos componentes será utilizado  $k_f = 2\pi(500)$  e um fator de escala de amplitude arbitrário de 100. Com isso, são calculados os componentes e escolhidos os valores comerciais mais próximos.

$$C_1 = 4,7\mu F, C_2 = 2,2\mu F \text{ e } R = 100\Omega$$

Para comparação, outro modelo de filtro ativo foi simulado. Este é um filtro ativo de segunda ordem e corresponde a dois filtros como os apresentados anteriormente ligados em cascata.

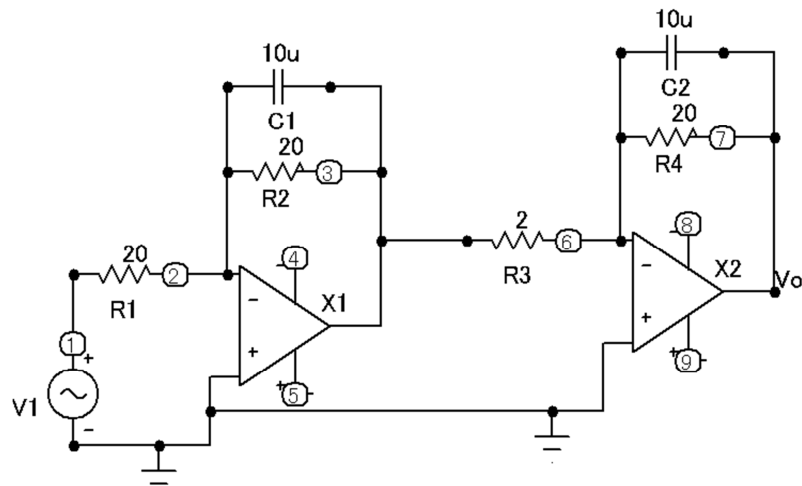


Figura 41: Circuito de filtro ativo de segunda ordem.

Ambos são filtros de segunda ordem, e apresentaram um resultado simulado mais próximo do filtro ideal do que os dois circuitos seletores de frequência apresentado anteriormente. Como forma de comparação, foram simuladas as respostas sobrepostas de ambos os filtros:



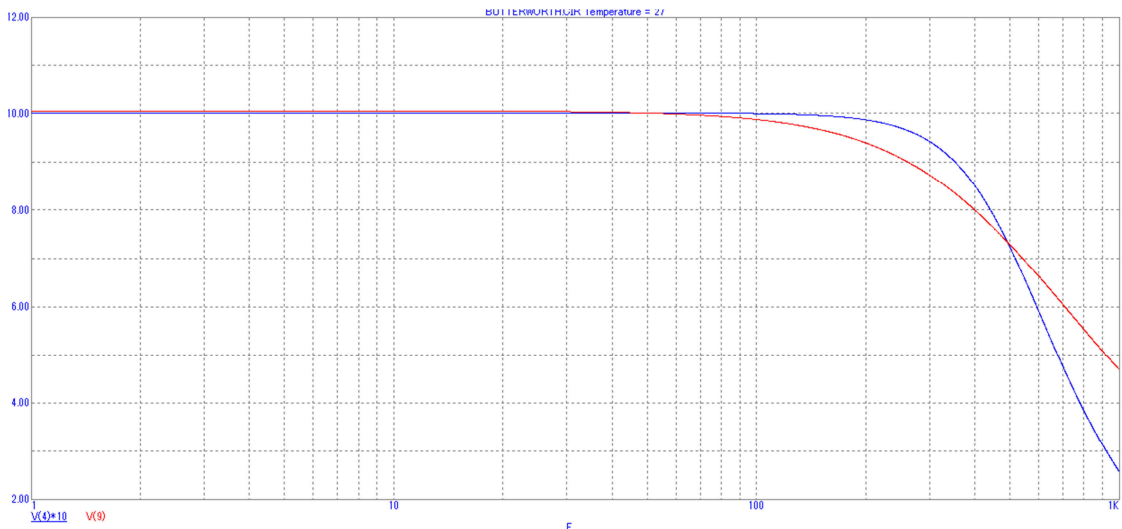


Figura 42: Comparação da resposta dos filtros de segunda ordem.

O cruzamento de ambas as curvas se dá aproximadamente na frequência de corte do sistema. É possível então de verificar que a curva proveniente do filtro de Butterworth, exibida em azul no gráfico, apresenta uma atenuação menor na banda passante do sinal, e uma transição mais rápida para a banda de rejeição.

Assim, sua resposta se aproxima mais da resposta do filtro ideal. Com isso, neste projeto será utilizado um filtro Butterworth de segunda ordem como elemento de filtragem.

## Anexo B – Análise do programa desenvolvido.

A primeira parte do programa é mostrada na figura abaixo:

```

;-----
; ENTRADAS
;-----
START      BIT P3.7  ;Comando indicando que o programa pode (RE)começar a execução
SEG_TABELA BIT P3.6  ;Indica que a frequencia desejada é maior que 255 Hertz
CONTA      BIT P3.5  ;Bit de entrada do contador. Ligado ao circuito condicionador

REFERENCIA EQU P0    ;Porta aonde deve ser fornecida a referência.

;-----
; SAIDAS
;-----
MAIOR      BIT P3.0  ;Indica que a freq atual é maior que a da referência
MEIOPASSO  BIT P3.1  ;Indica que o motor de passo está operando com meio passo
AFINANDO   BIT P3.2  ;Pisca enquanto a afinação é executada
AFINADO    BIT P3.3  ;Indica que afinação está completa
ERROR      BIT P3.4  ;Indica a existência de um erro

MOTOR      EQU P2    ;Porta que fornecerá o sinal para o driver do motor de passo

;-----
; POSIÇÕES DE MEMÓRIA
;-----
INI_ROM     EQU 0000H

INT_EXT0    EQU 0003H
INT_TIMO    EQU 000BH
INT_EXT1    EQU 0013H
INT_TIM1    EQU 001BH

INI_PROGR   EQU 0033H

TIMERaux    EQU R0
INDEX       EQU R3
BUFFER      EQU R5
RECARGA     EQU R6

;Define o endereço das interrupções, do início da memória e do programa.

```

Figura 43: Programa Desenvolvido, Parte 1.

Nesta parte estão definidas as variáveis que serão utilizadas dentro do programa. Por exemplo, a partir deste ponto, poderemos tanto MOTOR quanto P2, sendo ambas equivalentes. Também são definidas posições de memória como forma de facilitar a organização do programa.

Essa etapa de definição tem duas funções principais. Primeiramente, ela facilita a programação, uma vez que é mais simples identificar o funcionamento do programa

utilizando uma variável com um nome significativo do que um elemento que remete a um componente físico.

A segunda vantagem, ainda mais importante, é que essa definição aumenta a flexibilidade do código, permitindo que futuras mudanças ou correções sejam realizadas mais rapidamente. Por exemplo, se fosse necessário alterar a porta utilizada para enviar o sinal ao driver do motor de passo, somente teríamos que mudar seu valor nesta definição, e não em todos os pontos do programa em que o mesmo se refere.

As variáveis aqui descritas serão comentadas com mais detalhes conforme as mesmas forem sendo utilizadas durante o programa. A parte seguinte do programa é mostrada abaixo:

```

;-----
; Pula para o início do programa
ORG INI_ROM

NOT_START:

    JNB START,NOT_START ;Somente inicia o programa quando for dado o start
    JMP INICIO

;-----
; Pula para o tratamento da interrupção Timer 0
ORG INT_TIMO
    JMP ROT_INT_TIMO

```

Figura 44: Programa Desenvolvido, Parte 2.

Existem duas posições de memória definidas. A primeira é o início de execução do programa e a segunda a posição de memória da interrupção do timer 0. Em ambos os casos realizamos um pulo para outro ponto do programa.

Esse pulo é utilizado uma vez que algumas posições de memória iniciais são utilizadas para as diversas interrupções existentes no microcontrolador. Assim, qualquer código aqui colocado teria que possuir um tamanho limitado, além de possivelmente impedir o uso futuro de uma interrupção. Com este salto, nos liberamos destas limitações.

No início da execução do programa, é realizado o teste de uma condição antes do pulo para o INICIO. Isso permite que a afinação só comece após um comando do utilizador, permitindo um maior controle por parte deste e a interconexão de diversos módulos, o que será apresentado no capítulo específico.

A parte seguinte do programa é mostrada abaixo:

```

;-----
;-----
; PROGRAMA PRINCIPAL
;-----
;-----
ORG INI_PROGR
INICIO:

    MOV A,REFERENCIA          ;Verificação do valor de referencia.
    JB SEG_TABELA, p0acimaDoMinimo ;Utilizado para evitar que um valor.
    ANL A, #0EOH              ;invalido seja fornecido.
    JNZ p0acimaDoMinimo
    SETB ERROR                 ;Indica que um erro ocorreu.
    JMP INICIO                 ;Retorna ao início do programa.
p0acimaDoMinimo:
    CLR MEIOPASSO              ;Início do processo de afinação
    CLR AFINADO                ;Resetando algumas saídas do programa.
    CLR MAIOR

```

Figura 45: Programa Desenvolvido, Parte 3.

Nesse início do programa, é verificado o valor da referência fornecido para a afinação. Caso o mesmo for menor que um determinado valor, o programa não executa e um erro é indicado. Isso é feito para evitar que o sistema utilize um valor de referência sem sentido prático, levando a um mal comportamento do sistema.

O bit SEG\_TABELA indica que o valor da referência é maior que 255. Ele é utilizado uma vez com 8 bits de entrada não podemos representar toda a faixa de frequências de referência definidas. Com 9 bits representando intervalos de 1 Hz, toda a faixa de entrada é atingida.

Já a saída ERROR indica a existência de um erro, mostrando para o usuário que o sistema não está se comportando adequadamente. Com isso, esse pode procurar o problema e

corrigi-lo. Antes da continuidade do programa, alguns bits utilizados para configuração do funcionamento são limpos, de forma que seu valor anterior não influencie o comportamento atual do sistema. O programa continua com:

```

; PROGRAMAÇÃO DO TIMER 0 QUE SERA USADO COMO TIMER DE UM SEGUNDO
; PROGRAMAÇÃO DO TIMER 1 QUE SERA USADO PARA CONTAR OS PULSOS

MOV TMOD, #01010001b

; PROGRAMAÇÃO DAS INTERRUPÇÕES

SETB EA      ; habilita as interrupções
SETB ETO     ; habilita a interrupção por overflow do timer 0
CLR ET1      ; desabilita a interrupção do timer 1

; INICIALIZAÇÕES

MOV TIMERAux, #14d ;Utilizado para controle do número de
                  ;Overflows do timer 0
MOV RECARGA, #15d  ;Valor que será recarregado no TIMERAux
MOV INDEX, #0      ;Utilizado para procura de elementos na tabela

CALL ROT_INT_TIM0 ; Configura o timer para sua primeira execução

SETB TR0        ; Inicia o timer
SETB TR1        ; Inicia o contador

NAOafinado:
JNB AFINADC,NAOafinado ;Não permite recomeçar antes de estar afinado.

FIM:
JNB START,FIM          ;Enquanto não tem start, não recomeça
JMP INICIO              ;Recomeçar

```

Figura 46: Programa Desenvolvido, Parte 4.

Nesse ponto, é feita a configuração do microcontrolador, utilizando-se os registradores internos específicos. O primeiro destes utilizado é o TMOD, ou TIMER/COUNTER MODE CONTROL REGISTER. Este registrador configura o funcionamento dos dois timers internos do 8051 e não é endereçável bit a bit. Sua estrutura interna é mostrada na figura 47:

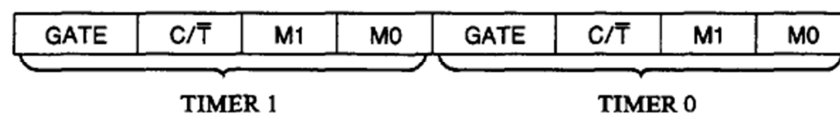


Figura 47: Estrutura do Registrador TMOD.

Suas funções são as seguintes:

**GATE:** Quando em nível alto, o timer ou contador é habilitado por um nível lógico alto em pinos do 8051. Quando é zerado, o timer ou contador é habilitado por software, em um bit no registrador TCON. Neste projeto, ambos os timers serão habilitados por software.

**C/T:** Quando zerado, o timer conta intervalos de tempo correspondente a frequência do cristal oscilador dividida por 12. Quando setado, este se comporta como um contador, contando o número de pulsos em um dos pinos de entrada. Neste projeto, o timer 1 será utilizado como contador e o timer zero como medida de tempo.

M1 e M0 definem o modo de operação do timer entre um dos 4 possíveis. Aqui, para ambos os timers, será utilizado M1=0 e M0=1. Esta configuração corresponde a timers ou contadores de 16bits.

Os valores atuais do timer ou contador se encontram então divididos em dois registradores, chamados de nível alto e baixo, ou THi e TLi, respectivamente. Podemos alterar esses dois registradores caso queiramos alterar o valor atual dos timers. Com o overflow do timer, uma interrupção é então gerada.

O comportamento do timer em modo de operação 0 é mostrado na figura abaixo. A única diferença existente com relação ao modo utilizado neste projeto é que TL1 passa a comportar 8 bits.

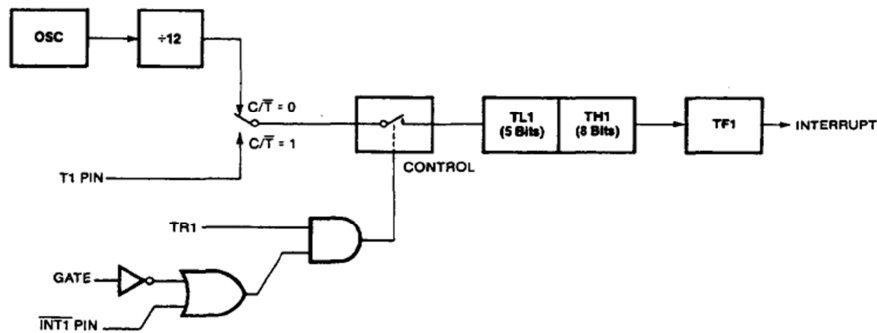


Figura 48: Diagrama Interno dos Timers.

Após o ajuste dos timers, são as interrupções que são configuradas. Isso é feito no registrador IE ou INTERRUPTION ENABLE. Este registrador é endereçável bit a bit e tem sua estrutura interna mostrada abaixo:

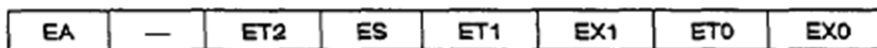


Figura 49: Estrutura do Registrador IE.

A primeira operação que fazemos é setar o bit EA. Esse bit serve como um controle geral de todas as interrupções. Em seguida, também setamos o bit ET0 e zeramos ET1. Assim habilitamos a interrupção gerada por *overflow* do timer zero, utilizado para contagem do tempo e desabilitamos a do timer um, responsável por estimar a frequência. As demais interrupções não são aqui utilizadas e por isso continuam desabilitadas. As prioridades das interrupções também não são alteradas.

Em seguida, é atribuído um valor inicial a variável `TIMERaux`. Essa variável é incrementada a cada *overflow* do timer zero e comparada com uma constante. Sua função é permitir que a contagem de pulsos fosse realizada por um intervalo de tempo maior que o de *overflow* do timer 0.

A variável RECARGA guarda um valor com o qual TIMERAux é recarregado a cada vez que este ultrapassa um certo limite. Isso permite que este valor de recarga não seja uma constante e possa ser modificado durante a execução do programa. Assim é possível o uso de tempo de contagem de pulsos variáveis durante a execução do programa.

A variável INDEX, por sua vez, é utilizada como índice para a procura em uma tabela que será realizada para gerar a lógica do motor de passo. Essa variável é zerada de forma a utilizar inicialmente o primeiro valor da tabela.

Não mostrada na figura pelo fato de ter sido incluída posteriormente, uma verificação é realizada para que o sistema só comece sua execução quando a corda estiver sendo tocada. Isso permite evitar falsas medidas ocorrendo quando a corda é tocada no meio de um intervalo de contagem.

Em seguida, é chamada a rotina ROT\_INT\_TIM0. Esta rotina realiza parte da configuração e é a mesma que é executada a cada interrupção por overflow do timer 0. Ela será mostrada em breve neste documento.

Em seguida, os timers são habilitados. Isso é feito setando TR1 e TR0, ambos presentes no registrador TCON, ou TIMER/COUNTER CONTROL REGISTER. Como apenas estes dois bits serão utilizados, a estrutura do registrador não será aqui mostrada.

Em seguida, é realizado um salto condicional. A variável AFINADO indica que a referência e a medida possuem o mesmo valor. Enquanto essa condição não é verdadeira, o programa permanece continuamente nesta mesma linha, ficando virtualmente parado. Outro código só é executado durante as interrupções do timer 0.

Quando a guitarra é então afinada, é realizado um segundo salto condicional. Este permite que o processo de afinação somente seja reiniciado quando a entrada START for habilitada.



Enquanto o sistema esta em processo de afinação, a cada estouro do timer 0 é realizado o seguinte código de tratamento de interrupção:

```

;-----
; SUBROTINAS DE
; ATENDIMENTO DAS INTERRUPTÇÕES
;-----
; Interrupção Timer 0
ROT_INT_TIMO:

    CLR EA                ;Desabilita as interrupções

    MOV TH0, #04cH
    MOV TL0, #000H       ; (RE)carregou timer 0

    INC TIMERAux
    CJNE TIMERAux, #20D, SAI    ; Compara para termos N overflows do timer 1

;Tempo desejado decorrido

    CLR TR0              ;Para o timer 0
    CLR TR1              ;Para o contador

    CALL CONTROLE        ;Chama a rotina de controle

```

Figura 50: Programa Desenvolvido, código de tratamento de interrupção.

A primeira operação realizada é a de desabilitar as interrupções. Assim é garantido que a ocorrência de outra interrupção, como um novo estouro do contador, não afetará a rotina que esta sendo executada.

Em seguida, o timer 0 é carregado um valor inicial. Com o uso de um cristal de frequência de 11 MHz a frequência de contagem do timer é de aproximadamente 921 quilohertz. Com os valores utilizados, a cada overflow do timer são realizadas 46079 contagens, o que corresponderia aproximadamente a 5 ms.

Com o auxílio da variável TIMERAux, podemos realizar um número qualquer de contagens de forma a obter diferentes valores de tempo transcorrido. Essa variável é incrementada e comparada com um valor fixo a cada estouro do timer. Quando o tempo desejado for transcorrido, ambos os valores serão iguais.

Enquanto o tempo transcorrido for inferior ao de amostragem as interrupções são restabelecidas e a rotina retorna ao programa principal. Quando o tempo for o desejado, a execução do código da rotina de interrupção prossegue.

Neste segundo caso, inicialmente são parados o timer e o contador de forma que os mesmos não tenham seu valor alterado. É então chamada a rotina de controle. Essa rotina é a responsável por analisar os valores do contador e da referência e determinar se a corda deve ser puxada ou solta, ou se a mesma está afinada.

A rotina responsável pelo controle é mostrada posteriormente. Após o retorno desta, o seguinte código é executado:

```

MOV TH1, #00H      ;Zera o contador
MOV TL1, #00H
CPL AFINANDC      ;Pisca o bit que indica que estamos afinando
MOV BUFFER,A
MOV A,RECARGA
MOV TIMERaux,A
MOV A,BUFFER

JB AFINADO, SAI   ;Se estiver afinado, sai sem recomeçar os contadores
SETB TRO         ;Renicia o timer
SETB TR1        ;Reinicia o contador

;fim do código de controle
SAI:
SETB EA         ; habilita as interrupções
RETI

```

Figura 51: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 1.

Primeiramente o contador de pulsos é zerado. Em seguida, o bit que indica que o processo de afinação esta sendo executado tem seu valor invertido. Com isso, é possível indicar ao operador que o sistema está executando e não em estado de erro ou travado.

A variável TIMERaux é recarregada com o valor contido na variável RECARGA, que pode ter sido mudada pela rotina de controle como forma de alterar o tempo de contagem de

pulsos. A variável BUFFER é utilizada para que o valor do acumulador não seja perdido, o que não seria aqui necessário, mas evita possíveis erros futuros em expansões do projeto.

Após essas operações, é feita uma verificação do bit que indica o estado da afinação. Caso a guitarra esteja afinada, a rotina retorna sem reabilitar os timers, garantindo assim que não serão geradas novas interrupções. Caso a guitarra não esteja afinada, o timer, o contador e as interrupções são reabilitados e a rotina retorna.

O diagrama pode ser melhor compreendido analisando o código da rotina de controle, cuja primeira parte é mostrado a seguir:

```

CONTROLE:
    PUSH ACC

    CJNE RECARGA,#15,nao4
;-----
; verificação de Erros 4hz
;-----
    MOV A, TL1
    ANL A, #10000000b
    JNZ error4hz
    MOV A, TL1
    ANL A, #0FOH
    JZ error4hz
    CLR ERROR
    JMP normal4hz
error4hz:
    SETB ERROR
    JMP SemMudar

```

Figura 52: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 2.

Primeiramente o valor do acumulador é guardado na pilha, como forma que esse não seja perdido durante a execução da rotina. Em seguida, o valor de RECARGA é comparado com um valor fixo. Como esta variável controla o tempo decorrido entre duas execuções da rotina, ela pode indicar qual das rotinas de controle deve ser executada.

Caso o valor de RECARGA for igual a 15, o tempo decorrido entre duas amostras é de 250 ms segundos. Assim é procedido a rotina de verificação de erros para a frequência de 4 Hz. Caso os valores forem diferentes, o programa salta para outra parte da rotina, mostrada posteriormente.

Durante a verificação de erros, primeiramente é analisado o valor do contador. Se este tiver um valor maior que 128, significa que a frequência medida é maior do que 512 Hz. Conforme definido anteriormente, esta não é uma frequência de entrada válida, sendo que provavelmente ocorreu algum erro de medida no sistema. Portanto a entrada de erro deve ser setada e a rotina retorna sem enviar nenhum sinal de controle ao motor de passo.

Após uma segunda comparação é feita. Se o valor do contador for menor do que 15, temos que a frequência amostrada é menor do que 60Hz. Mais uma vez, essa é uma frequência não válida, e mais uma vez a entrada de erro deve ser setada e a rotina retorna sem envio de sinais ao motor.

Esse procedimento de testes dificulta que, caso a corda não seja tocada e algum sinal espúrio chegue ao contador, que o mesmo seja processado como se tratasse de um sinal válido. Ele é realizado para cada um dos diferentes tempos de amostragem.

A próxima parte de código representa o tratamento para a obtenção da lógica de controle para o sistema operando com resolução de 4Hz:

```

normal4hz:
    MOV A, TL1
    CLR C
    RLC A
    RLC A
    JB SEG_TABELA, deveserum4hz

deveserzero4hz:
    SETB MAIOR
    JC FIMcontrole
    JMP continua4hz

deveserum4hz:
    CLR MAIOR
    JNC FIMcontrole
    JMP continua4hz

continua4hz:
    CLR C
    SUBB A, REFERENCIA
    ANL A, #11111100b
    JZ mudaPara2
    JC MenorQreferencia4hz

MaiorQreferencia4hz:
    SETB MAIOR
    JMP FIMcontrole

MenorQreferencia4hz:
    CLR MAIOR
    JMP FIMcontrole

mudaPara2:
    MOV RECARGA, #10
    JMP SemMudar

```

Figura 53: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 3.

O valor de frequência adquirido é deslocado duas vezes para esquerda. Essa operação é o equivalente a uma multiplicação por 4. Assim, pode-se obter a estimativa da frequência em Hz, uma vez que a amostragem neste ponto do programa se dá a cada 250ms. Como com o uso da instrução RLC utiliza o bit de carry durante a rotação, após essas operações, este bit contém o valor do bit mais significativo do contador.

Esse bit é então usado em duas comparações. Na primeira este é comparado com o bit mais significativo da referência, representado pela entrada SEG\_TABELA. Caso esse bit seja verdadeiro, o bit mais significativo do sinal adquirido deve ser um. Senão, deve ser zero.

Isso leva a duas comparações exclusivas. Na primeira delas, esperasse que o bit seja zero. A saída MAIOR, que serve para indicar que a frequência adquirida é maior do que o da referência é setado. Caso o de carry for um, já é possível afirmar que a referência é maior do que o desejado. Assim a rotina envia um sinal ao motor de passo e retorna. Porém o carry for zero, nada podemos afirmar sobre o bit MAIOR, e a execução normal continua. A segunda comparação é semelhante à primeira, porém desta vez esperasse que o bit mais significativo seja um.

Na continuidade da rotina o carry é limpo para que seu valor não afete as próximas operações. Em seguida, subtraímos do acumulador, que contém a estimativa da frequência atual o valor da referência. Ao resultado da subtração é aplicada uma máscara. Essa operação é realizada devido ao fato de que a resolução máxima neste ponto do programa é de 4 hertz devido ao tempo de aquisição utilizado. Assim estes dois últimos bits não contém informação válida.

Se o resultado destas operações for zero, temos uma indicação que a frequência atual da corda é próxima da desejada. Assim, o valor de RECARGA é atualizado para 10, permitindo que o intervalo de tempo entre duas aquisições passe a ser de 500 ms, levando a uma melhor resolução de saída. Neste caso, como não temos informações sobre a relação entre a referência e o valor atual, nenhum sinal é enviado ao driver.

Caso o resultado da subtração for diferente de zero, a frequência atual da corda ainda se encontra longe do indicado pela referência. Assim RECARGA não é modificada e o tempo entre duas aquisições continua igual. Como em uma subtração o bit de carry guarda a relação

entre os operandos, pode-se com este determinar o valor do bit MAIOR e assim enviar um sinal ao driver.

O código a seguir é executado quando a frequência de amostragem for diferente de 4Hz:

```

nao4:
CJNE RECARGA,#10,nao2|
;-----
;  verificação de Erros 2hz
;-----
    MOV A, TH1
    JNZ error2hz
    MOV A, TL1
    ANL A, #0E0H
    JZ error2hz
    CLR ERROR
    JMP normal2hz
error2hz:
    SETB ERROR
    JMP SemMudar

normal2hz:
    MOV A, TL1
    CLR C
    RL A
    SUBB A,REFERENCIA
    ANL A,#11111110b
    JZ mudaPara1
    JC MenorQreferencia2hz

MaiorQreferencia2hz:
    SETB MAIOR
    JMP FIMcontrole

MenorQreferencia2hz:
    CLR MAIOR
    JMP FIMcontrole

mudaPara1:
    MOV RECARGA,#0
    JMP SemMudar

```

Figura 54: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 4.

Primeiramente, começamos com uma comparação do valor de RECARGA. Assim podemos determinar se a frequência de aquisição é de um ou dois hertz. No primeiro caso, há um salto para a rotina específica que será mostrada mais adiante. No segundo, é feita a rotina de verificação de erros.

Primeiramente é verificado o valor de TH1. Se o mesmo for diferente de zero, a frequência medida é de mais de 510 Hz, ou seja, maior do que o desejado. A saída ERROR é setada e a rotina retorna sem alterar o posicionamento do motor. O mesmo ocorre se caso a segunda comparação determinar que o valor medido é menor do que 32, ou seja, representa uma frequência maior do que 64 Hz.

Caso um erro não seja detectado, a rotina continua sua execução. As comparações realizadas são bastante semelhantes às antes realizadas e, por isso, não serão aqui detalhadas. Caso a referência e o valor amostrado forem bastante próximos, RECARGA passa a ter o valor zero. Desta forma, o tempo entre duas amostragens passará a um segundo.

A parte do código que trata do controle para 1 Hz é mostrada a seguir:

```
nao2:
-----
; verificação de Erros 1hz
-----
MOV A, TH1
ANL A, #0FEH
JNZ erro1hz
MOV A, TL1
ANL A, #0EOH
JZ erro1hz
CLR ERROR
JMP normal1hz
erro1hz:
SETB ERROR
JMP SemMudar
```



```
normal1hz:
    SETB MEIOPASSO
    CLR C
    MOV A, TL1
    SUBB A, REFERENCIA
    JZ Afinou
    JC MenorReferencia

    SETB MAIOR
    JMP FIMcontrole

MenorReferencia:
    CLR MAIOR
    JMP FIMcontrole

Afinou:
    SETB AFINADO
    POP ACC
    RET

FIMcontrole:
    CALL TODRIVER

SemMudar:
    POP ACC
    RET
```

Figura 55: Programa Desenvolvido, rotina de controle, parte 5.

Primeiramente, de forma análoga, é executada uma verificação de erros. Caso TH1 for maior que 510 Hz ou menor que 31 Hz temos a saída de erro modificada para um. No caso em que nenhum erro é detectado, o sinal de saída para o driver do motor de passo passa a operar em meio passo. Isso é feito utilizando a saída MEIOPASSO.

Mais uma vez, uma comparação entre o valor do contador e da referência é realizada. Ao contrário das comparações feitas anteriormente, desta vez não é aplicada uma máscara, uma vez que todos os bits contém informação válida para o sistema.

Como resultado da comparação, existem três possibilidades. Caso a referência seja igual ao valor medido, a saída AFINADO é colocada em um para indicar o fim do processo

de afinação. Caso forem diferentes, o sinal MAIOR tem seu valor definido e a rotina TODRIVER é chamada. Esta é a responsável por gerar o sinal de saída correto.

O código que realiza este diagrama se encontra detalhado abaixo:

```

TODRIVER:
    CLR C
    MOV BUFFER, A
    JB MAIOR, decrementaindex
incrementaindex:
    INC INDEX
    JB MEIOPASSO, FIMINDEX
    INC INDEX
    JMP FIMINDEX
decrementaindex:
    DEC INDEX
    JB MEIOPASSO, FIMINDEX
    DEC INDEX
FIMINDEX:
    CJNE INDEX, #08d, ok1
    MOV INDEX, #00

ok1:
    CJNE INDEX, #0FFH, ok2
    MOV INDEX, #07d
ok2:
    CJNE INDEX, #09d, ok3
    MOV INDEX, #01
ok3:
    CJNE INDEX, #0FEH, ok4
    MOV INDEX, #06d
ok4:
    MOV A, INDEX
    MOV DPTR, #TABELA
    MOVC A, @A+DPTR
    MOV MOTOR, A
    MOV A, BUFFER
    RET
TABELA:
    DB 01H, 03H, 02H, 06H
    DB 04H, 0CH, 08H, 09H
END

```

Figura 56: Programa Desenvolvido, rotina de lógica para o driver.

Essa rotina é responsável por, com o uso dos sinais MAIOR e MEIOPASSO, gerar o sinal correto para o driver do motor de passo. No fim do código, no label TABELA, existe uma tabela com os valores possíveis da saída utilizados para o motor de passo. Percorrendo a tabela um elemento por vez, geramos a saída com lógica de meio passo. Caso a lógica

desejada seja de passo inteiro, os valores devem ser percorridos dois a dois. A variável INDEX indica o índice da tabela aonde será buscado o valor fornecido para a saída.

Na entrada desta rotina, o valor do acumulador é armazenado para que o mesmo não seja perdido. De acordo com o sinal de MAIOR, é determinada a direção de rotação do motor e, conseqüentemente, se a entrada INDEX deve ser incrementada ou decrementada. A entrada MEIOPASSO determina então se esta operação sobre o índice deve ser realizada uma ou duas vezes.

Após as operações sobre o index, são feitas quatro verificação, para os casos em que a variável INDEX ultrapassar seus valores limites. Caso isso ocorra, seu valor corrigido. A procura na tabela é então realizada, e o valor recuperado é colocado na saída MOTOR, ligada ao driver do motor de passo. Com isso, é terminada a análise do programa.

## Anexo C – Placa de Circuito Impresso.

A placa de circuito impresso da figura abaixo representa a placa que foi projetada para este projeto. Porém a placa não foi realizada, sendo o projeto montado em uma placa wire-wrap.

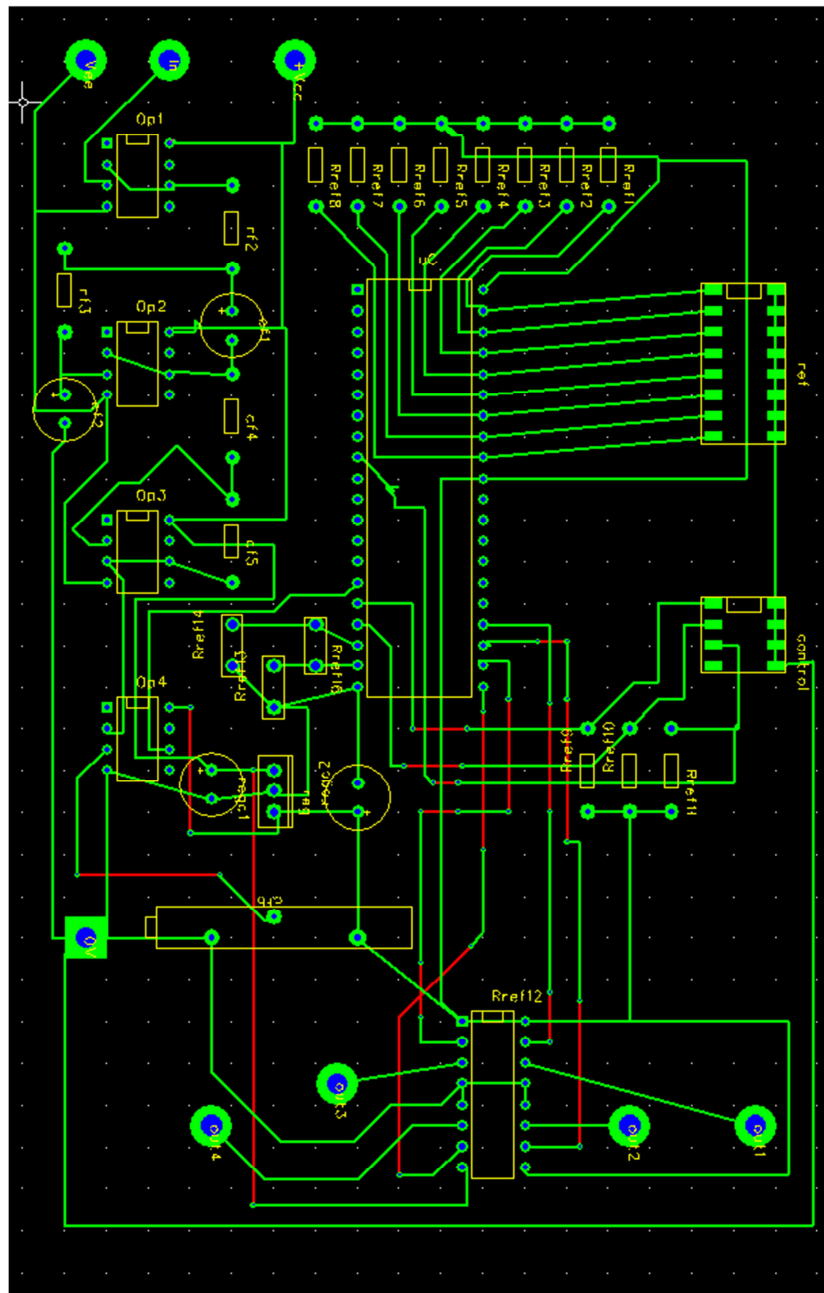


Figura 57: Placa de circuito impresso.