

# AFINADOR SEMIAUTOMÁTICO PARA VIOLÃO

Vinícius de Paula Oliveira (FHO - Fundação Hermínio Ometto) vdepaulaoliveira@gmail.com  
Mauricio Acconcia Dias (FHO - Fundação Hermínio Ometto) macdiaspae@gmail.com

## Resumo

Este trabalho objetiva a construção de um circuito capaz de realizar a automação de um afinador para violão. O usuário faz a seleção da corda e a entrada de sinal analógico (microfone) é processada pela placa Nodemcu e convertida para o domínio da frequência (Hertz). O processo de conversão possibilita a definição de uma frequência para ser comparada à valores de referência, sendo estes, os padrões para afinação de cada corda do instrumento. A comparação entre os valores permite quantificar a defasagem de afinação definindo o quão mais grave ou mais agudo a corda deve estar. Um motor de passos recebe como parâmetro de operação a quantidade de passos necessários para afinar a corda, conforme valor de defasagem. O motor tem como objetivo regular a tensão mecânica nas tarraxas do violão fazendo a afinação do instrumento. A validação dos resultados do projeto traz um comparativo de custos entre dispositivos disponíveis no mercado e segure adequações no hardware.

**Palavras-Chaves:** Afinador. Automação. Nodemcu

## 1. Introdução

A afinação de um instrumento musical é um aspecto de extrema importância, pois garante a reprodução exata de uma determinada nota. As notas musicais são caracterizadas por símbolos que representam a altura da música (MED, 1996). O conceito de altura pode ser facilmente confundido com o volume (intensidade de um som) mas, na verdade, representa sua frequência em hertz (Hz). A partir deste ponto, pode-se associar, conforme Roederer (2008), a altura de uma nota musical à uma grandeza física. Para Becchi (2017), as notas musicais são sons emitidos em frequências específicas e, apesar de serem popularmente conhecidas como: dó; ré; mi; fá; sol; lá e si, (notas fundamentais) têm sua representação pelos símbolos conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Nomes, símbolos e frequências das notas musicais

Nome	Símbolo	Frequência (Hz)
------	---------	-----------------

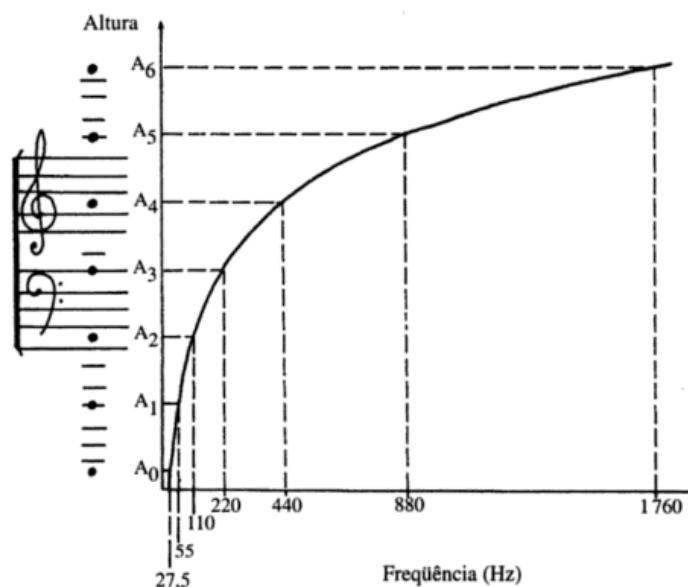
Dó	C	261.625 Hz
Ré	D	293.664 Hz
Mi	E	329.627 Hz
Fá	F	349.228 Hz
Sol	G	391.995 Hz
<b>Lá</b>	<b>A</b>	<b>440.000 Hz</b>
Si	B	493.883 Hz

Fonte: Autor

Em concordância com Menezes (2004), a associação entre frequência e altura não significa que ambas sejam idênticas, ou seja, uma nota musical pode ser representada em frequências diferentes. “A percepção em relação às frequências é logarítmica, geométrica, enquanto que a dos intervalos ou notas musicais (das alturas) corresponde a mudanças perceptivas lineares e aritméticas” (MENEZES, 2004).

O intervalo no qual ocorre a repetição de uma nota musical em frequências diferentes é chamado de oitava e este corresponde à metade ou dobro do valor anterior ou posterior para uma mesma nota, conforme Figura 1, na qual observa-se várias frequências para a nota lá até a sexta oitava.

Figura 1 - Relação entre altura e frequência



Fonte: MENEZES, 2004.

A afinação em instrumentos de cordas consiste no processo de girar uma tarraxa que regula a tensão mecânica da corda, assim, aumentando ou diminuindo a frequência produzida ao ser tocada (BECCHI, 2017). O violão pode ser considerado como o mais popular entre os instrumentos de cordas com suas primeiras versões datadas de 2.000 A.C., atualmente aceita-se as teorias de que sua origem advém da cítara romana e do alaúde árabe.

Com o avanço da eletrônica digital resultando na miniaturização de seus componentes e circuitos, surgem dispositivos relativamente pequenos com grande capacidade computacional, sistemas embarcados ou sistemas de computação embarcada. Neste cenário destaca-se a popularidade do Arduino que, de forma sucinta, é um pequeno computador que possibilita programação para acesso de suas entradas e saídas (analógicas ou digitais/pwm) as quais fazem a comunicação entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele. Em outras palavras pode ser definido como uma plataforma de computação embarcada, ou seja, um sistema que pode interagir com seu ambiente por meio de hardware e software (MCROBERTS, 2015). Desde que surgiu, em 2005 na Itália, o Arduino passou por várias melhorias e está disponível em várias versões dentre as quais o Arduino Uno, criado em 2010, é uma das mais populares.

Em termos de hardware, a grande diferença do Arduino Uno para seus antecessores é o microcontrolador (computador em um único chip, segundo Penino e Trindade 2013) programado ATmega8U2 como um conversor USB-para-serial, de maneira a substituir o chipset FTDI presente nas versões anteriores (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM 2013). O microcontrolador ESP8266 destaca-se como um componente bastante comum no contexto de IoT (*Internet of Things* – Internet das Coisas) sendo esta uma área da tecnologia que busca a integração entre equipamentos de uso cotiado e a internet em, por exemplo, aplicações de automação residencial devido a sua conectividade WiFi e *bluetooth*. Tendo como base o ESP8266 vários módulos estão disponíveis no mercado dentre eles o módulo ESP-01, ideal para aplicações simples, e o módulo ESP-12 voltado para integrar placas de circuito ou protoboards com outros componentes eletrônicos (OLIVEIRA, 2017).

O NodeMcu pode ser resumido, conforme Oliveira 2017, em um módulo ESP-12 com conversão USB-serial, ou ainda, para Rodrigues 2017, uma plataforma *opensource* a qual pode ser programada através na linguagem Lua ou mesmo pela própria IDE do Arduino na linguagem C. A linguagem de programação Lua foi desenvolvida por um conjunto de professores da PUC-Rio no ano de 1993 e, segundo Duarte 2016, trata-se de uma linguagem de *scripting* de fácil utilização.

## 2. Referencial Teórico

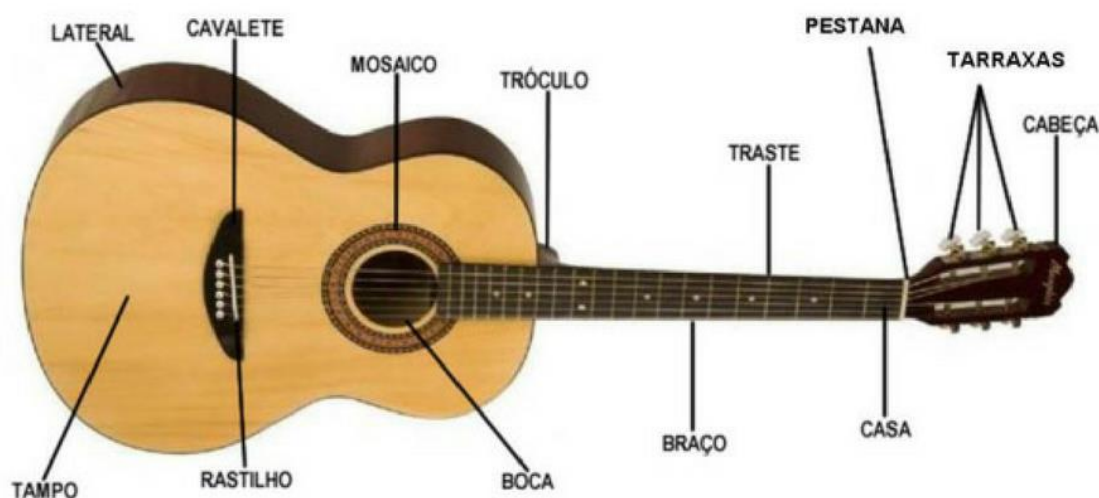
Nesta sessão são abordados os principais conceitos teóricos utilizados como ferramentas para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. Revisam-se conceitos básicos sobre o instrumento, conteúdos matemáticos utilizados em análise de sinais, programação de microcontroladores até modelos de afinadores disponíveis no mercado.

### 2.1 O violão acústico

O violão (Figura 2) é um instrumento musical de cordas pertencente à família dos instrumentos temperados, ou seja, instrumentos de som fixo. Em sua versão mais popular possui 6 cordas. As notas musicais são geradas a partir da combinação entre o toque das cordas e o pressionamento das mesmas ao longo do braço do instrumento.

Os acordes musicais são formas específicas de pressionar as cordas tomando como referência as casas e o trastes do braço.

Figura 2 - Partes do violão



Fonte: Disponível em:< <https://comoaprendertocarviolao.com/partes-do-violao/> >. Acesso em: 10 abr. 2019

#### 2.1.1 Afinação padrão

A afinação padrão (*standard*) para violão segue os parâmetros da Tabela 2. Os números utilizados como sufixo na notação das cordas em função das notas musicais representam as oitavas na quais as notas se encontram.

O instrumento pode ter sua afinação alterada sempre que for necessário, em geral, altera-se a afinação buscando a concordância com outros instrumentos ou a voz.

Tabela 2 - Afinação padrão

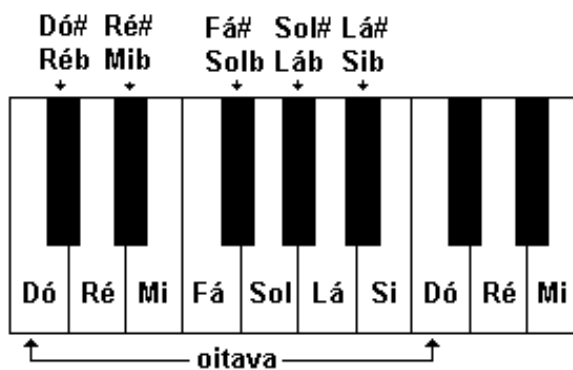
Corda Nº	Nota	Notação	Frequência (Hz)
1	Mi	E4	330 Hz
2	Si	B3	247 Hz
3	Sol	G3	196 Hz
4	Ré	D3	146 Hz
5	Lá	A2	110 Hz
6	Mi	E2	82 Hz

Fonte: Autor

## 2.2 Percepção musical

O processamento de informações acústicas provenientes de uma ou mais fontes, em diferentes sons e ritmos, compõem, para Roederer 1998, a percepção musical. Além das sete notas fundamentais, exemplificadas na sessão anterior (Figura 2), existem mais cinco notas intermediárias as quais são representadas por (#) sustenido ou (b) bemol. O conjunto de doze notas musicais (fundamentais e intermediárias) compõem o que é chamado de oitava musical.

Figura 3 - Oitava musical



Fonte: Disponível em:

<[https://musicaeadoracao.com.br/recursos/imagens/tecnicos/teoria/teoria\\_online/intervalos\\_03c.gif](https://musicaeadoracao.com.br/recursos/imagens/tecnicos/teoria/teoria_online/intervalos_03c.gif)>. Acesso em: 20 abr. 2019

### 2.2.1 Equação fundamental

A definição das frequências das notas musicais é dada a partir da Equação 1. Por convenção adotou-se a frequência de 440 Hz referente à nota lá na quarta oitava (A4).

$$f = 2^{\frac{n}{12}} \times 440 \quad (1)$$

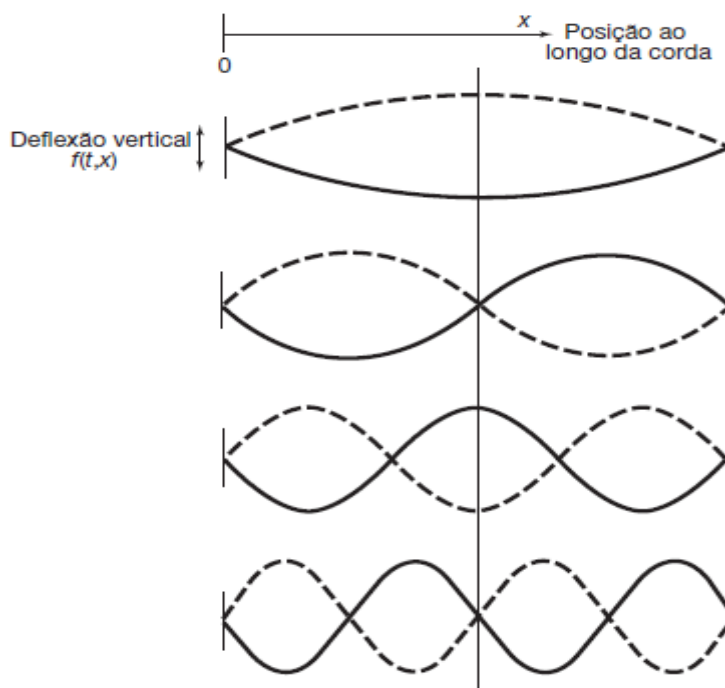
Onde, conforme Becchi 2017,  $f$  representa a frequência da nota musical em hertz e  $n$  é o número de notas musicais entre a nota calculada e a referencial A4. O valor de  $n$  pode ser positivo ou negativo.

## 2.3 Transformada de Fourier

Até sua definição final a Transformada de Fourier contém a participação de diversos raciocínios que buscavam a explicação matemática de fenômenos físicos. Entre elas pode-se destacar, inicialmente, Leonhard Paul Euler (1707 – 1783) no ano de 1748 o qual analisou o movimento de uma corda vibrante.

Para Oppenheim 2010, considerando uma deformação vertical  $f(t, x)$  na corda em um instante  $t$  e a uma distância  $x$  ao longo da corda, logo, para todo  $t$  fixo do tempo, os modos normais são funções senoidais de  $x$  relacionadas de forma harmônica (Figura 4).

Figura 4 - Definição de Euler



Fonte: Oppenheim 2010

Meio século depois Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 – 1830) apresentou suas ideias relacionadas ao fenômeno de propagação e difusão do calor por meio de séries harmônicas. Um diferencial característico da análise de Fourier é lidar com o domínio de frequência e o domínio do tempo, podendo adequar-se ao cenário de acordo com as necessidades. (CHAPRA; CANALE, 2011).

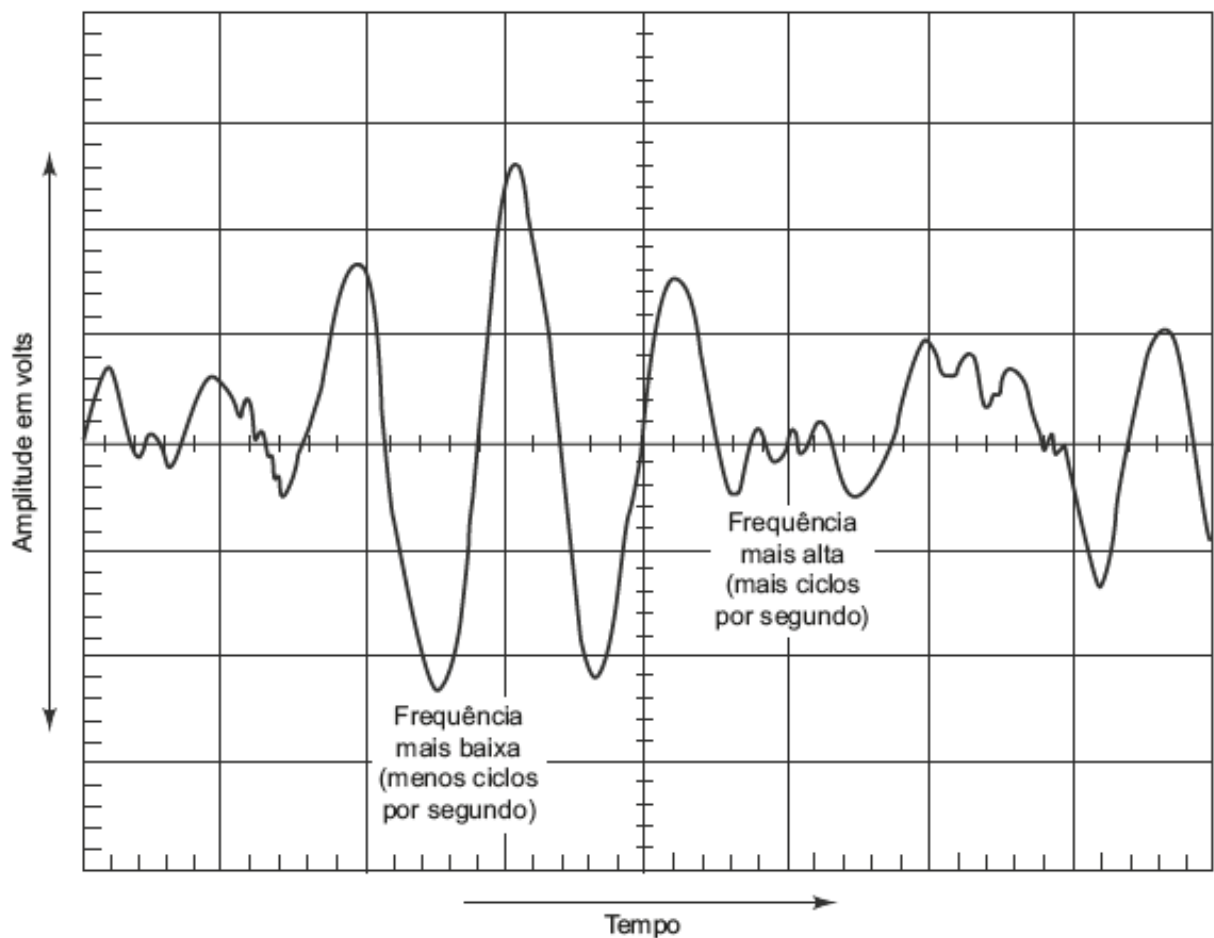
Todos os conceitos correlatos apresentados ao longo dos anos serviram como base para a análise de sinais e sistemas de tempo contínuo e tempo discreto. Destaca-se a implementação digital do algoritmo FFT (*fast Fourier transform*) o qual reduziu drasticamente o tempo necessário para o cálculo de transformadas (OPPENHEIM, 2010).

## 2.4 Sinal analógico e sinal digital

De forma sucinta um sinal analógico é caracterizado por uma modulação, proporcional à grandeza analisada, variante no tempo. Sua representação é dada na forma de onda para a qual valem os conceitos: frequência, amplitude e período.

A Figura 5 apresenta um modelo de sinal analógico referente ao funcionamento de um microfone elétrico. Deve-se destacar que os valores das amplitudes podem variar em uma faixa contínua (máximo e mínimo), conforme Tocci 2011.

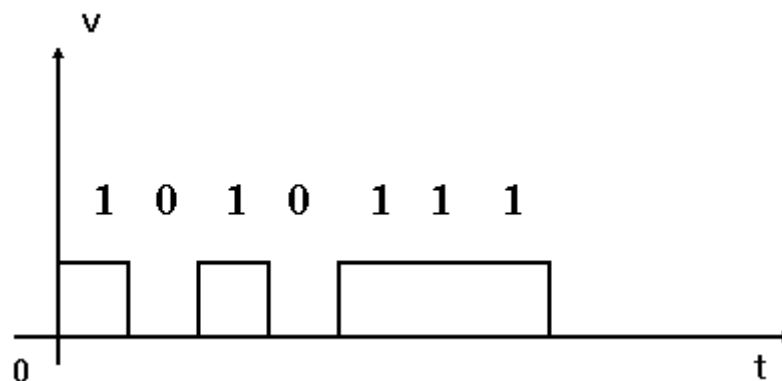
Figura 5 - Sinal analógico



Fonte: Tocci, 2011

Os sinais digitais, como o nome sugere, são formados por dígitos em uma sequência discreta. Assumem valores e tempos finitos, conforme Figura 6, em representação por números binários.

Figura 6 - Sinal digital



Fonte: Adaptado. Disponível em: < <http://redescomunicacao11i.blogspot.com/2012/10/trabalho-de-pesquisa-2492012-sinais.html> >. Acesso em: 20 de abr. 2019

#### **2.4.1 Conversão analógico-digital**

Uma vez que sistemas digitais remetem à dispositivos com capacidade de manipular informações lógicas e quantidades físicas que possam assumir valores discretos. Sistemas analógicos lidam com quantidades físicas que possam variar dentre determinada faixa de valores (Tocci, 2011). Surge a necessidade de sistemas que lidam com ambos os sinais.

Para exemplificar pode-se considerar o funcionamento de uma balança digital. A informação analógica referente a carga é convertida em sinal digital para ser exibida no *display*. Com o avanço da eletrônica os circuitos capazes de fazer a conversão analógico-digital ficaram cada vez menores e mais potentes.

#### **2.5 Motor de passos**

O motor de passos tem aplicações em muitos dispositivos que trabalham com movimento de precisão como impressoras e drives de discos flexíveis, “[...] essencialmente um dispositivo que serve para converter informação de entrada e forma digital para uma saída mecânica.” (TORO, 1999). O nome “passos” advém do modo de operação que consiste em uma série de passos discretos de acordo com o ângulo de passo característico para cada modelo de motor, para um ângulo de 1,8 grau o número de passos é proveniente da divisão deste valor por 360, ou seja, 200 passos para realizar uma volta completa no sentido horário ou anti-horário (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM 2013).

#### **2.6 Programação de microcontroladores**

Os microcontroladores, em geral, aceitam programação em linguagem C. A linguagem C, conforme Schildt 1997, compõe o grupo de linguagens de programação estruturadas. Um componente muito importante de sua estrutura são as funções.



Funções, ainda para Schildt 1997, são blocos de atividades programados separadamente permitindo a modularização do código.

A programação básica de microcontroladores como Arduino e Nodemcu consiste no uso de duas funções: *setup* e *loop* (MONK, 2014). A função *setup* é executada apenas uma vez sempre que o microcontrolador é ligado ou reiniciado, nela devem ser especificados o mapeamento dos pinos, ou, em outras palavras, deve-se definir as entradas e saídas analógicas ou digitais.

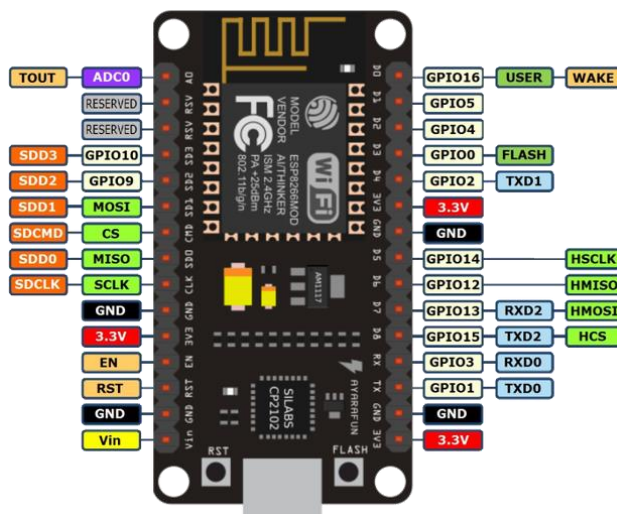
Em contrapartida, a função *loop* (laço), é executada repetidamente enquanto a placa estiver ligada. São definidas nesta função todas as ações que serão executadas, por exemplo, o acionamento de um *LED* a partir da leitura de algum sensor de outro sensor ou por ação do usuário.

Para a execução de recursos específicos de programação pode-se adicionar bibliotecas externas e fazer uso de suas funções. Conforme Schildt 1997, as bibliotecas são coleções de funções.

## 2.7 Nodemcu

As entradas e saídas da placa (*pinout*) podem ser observadas na Figura 7. Existem determinações específicas para uso da pinagem, conforme Murta 2018, os pinos RX e TX são utilizados para carregar programas na memória *flash*.

Figura 7 - Pinout Nodemcu



Fonte: Disponível em <[https://pradeepsinghblog.files.wordpress.com/2016/04/nodemcu\\_pins.png?w=616](https://pradeepsinghblog.files.wordpress.com/2016/04/nodemcu_pins.png?w=616)>. Acesso em: 16 mai. 2019.

## 2.8 Afinadores disponíveis no mercado

Sem a presença de recursos eletrônicos, a afinação do violão, como de qualquer outro instrumento, faz uso do ouvido humano através um som de referência. O diapasão (Figura 8) é um aparelho muito comum no contexto de afinação, possui versões em metal ou sopro, e emite um determinado som em frequência definida (ZUBEN, 2004). Ao tocar o diapasão tem-se, por exemplo, a nota lá na segunda oitava (110 Hz) a qual, conforme sessão 2.1.1 (Tabela 2), é padrão para afinação quinta corta.

Figura 8 - Diapasão metálico



Fonte: Disponível em: < <http://o-violonista.blogspot.com/2011/10/tutorial-como-afinar-o-violao.html>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

É evidente que o processo acima requer aptidão do ouvido humano e sempre lida com certo grau de imprecisão. Excluindo a necessidade da audição, os afinadores eletrônicos (Figura 9) fazem a captação da frequência da corda indicando a necessidade de apertar ou afrouxar as tarraxas.

Figura 9 - Afinador digital



Fonte: Disponível em:< <http://www.ainstrumental.net.br/2017/04/28/aprenda-como-usar-o-afinador-digital/>>. Acesso em: 10 de nov. 2018.

Ambas as figuras acima referenciam afinadores que, de alguma maneira, necessitam de intervenção do usuário. A década passada marca o início de um novo conceito de afinadores, os afinadores automáticos.

Sem necessitar da intervenção do usuário, os afinadores automáticos (Figura 10) possuem motores que fazem a movimentação das tarraxas conforme a necessidade da afinação passada por parâmetro. Alguns modelos são acoplados diretamente no braço do instrumento.

Figura 10 - Afinador automático Tronical Tune



Fonte: Disponível em:< <https://guitarrainteligente.blogspot.com/2013/04/tronictune-o-novo-sistema-de-afinacao.html?m=0>>. Acesso em: 23 de abr. 2019

### 3. Materiais e Métodos

No desenvolvimento deste experimento foram considerados os materiais listados abaixo para construção e programação do *hardware*, bem como, os métodos para montagem do circuito e programação dos componentes.

#### 3.1 Materiais utilizados

Para construção do circuito foram utilizados os materiais conforme Tabela 3. A montagem do foi feita inicialmente com auxílio de simulação (*software*) e posteriormente passado para a *protoboard*.

Tabela 3 – Lista de materiais

Descrição	Qtde.	Val. unitário	Valor total
Bateria 9V	1	R\$ 11,00	R\$ 11,00
Motor de passo + Drive	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
Nodemcu	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Protoboard	2	R\$ 9,90	R\$ 19,80
Microfone Max4466	1	R\$ 43,99	R\$ 43,99
Display 7 segmentos 1 dig.	1	R\$ 4,50	R\$ 4,50
Cd4511	1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
Resistor 150 $\Omega$	2	R\$ 0,50	R\$ 1,00
Resistor 220 $\Omega$	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Resistor 1 K $\Omega$	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Resistor 10 K $\Omega$	1	R\$ 0,50	R\$ 0,50
Capacitor cerâmico 47 nF	1	R\$ 1,00	R\$ 1,00
Chave tátil	1	R\$ 2,00	R\$ 2,00

Jumpers	-	-	
TOTAL	-	-	<b>R\$ 149,79</b>

Fonte: Autor

### 3.2 Softwares

Na elaboração do código e montagem do circuito no computador (simulação de montagem) foram utilizados, respectivamente, os softwares Arduino IDE e Fritzing os quais possuem distribuição gratuita.

#### 3.2.1 Bibliotecas FHT e Stepper

A biblioteca FHT (*Fast Hartley Transform*) implementa a FFT (sessão 2.3) apenas para número reais, ou seja, trazendo os dados de domínio do tempo para o domínio da frequência. A particularidade de trabalhar com números reais faz a FHT, em fase à FFT, ter um ganho considerável de otimização em tempo de processamento OPEN MUSIC LABS, 2016.

Conforme ARDUINO a biblioteca Stepper disponibiliza funções que permitem o controle e programação de motores de passos (unipolar e bipolar). Destacam-se as funções de definição de quantidade de passos por volta (*steps*) e da velocidade de rotação em rmp (revoluções por minuto).

### 3.3 Calibração do motor de passos

Conforme especificações técnicas disponibilizadas pelo fabricante (*datasheet*) o motor possui um ângulo de passo igual à 1,8°, sendo assim, necessita de 200 passos para realizar uma volta completa (360°). A Tabela 4 mostra a quantidade de passos necessários para alterar a frequência de uma determinada corda em 1 Hz, conforme definido por Becchi 2017 o qual utilizou um motor com o mesmo ângulo de passo.

Tabela 4 - Calibração do motor

Corda Nº	Nota	Notação	Nº passos
1	Mi	E4	178
2	Si	B3	173
3	Sol	G3	167
4	Ré	D3	161
5	Lá	A2	153
6	Mi	E2	144

Fonte: Adaptado de Becchi 2017

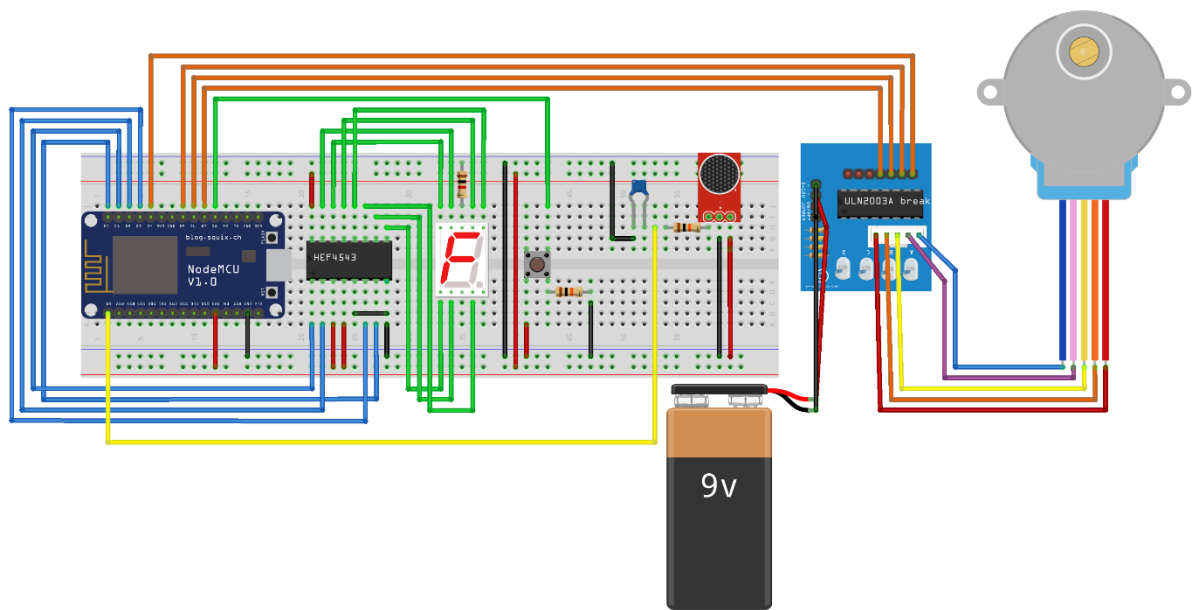
## 4. Resultados

Nesta sessão estão apresentados os resultados obtidos no desenvolvimento do experimento classificados entre circuito e código (sistema).

### 4.1 Circuito

A Figura 11 exhibe o circuito final em digrama montado no *software* Fritzing.

Figura 11 - Circuito

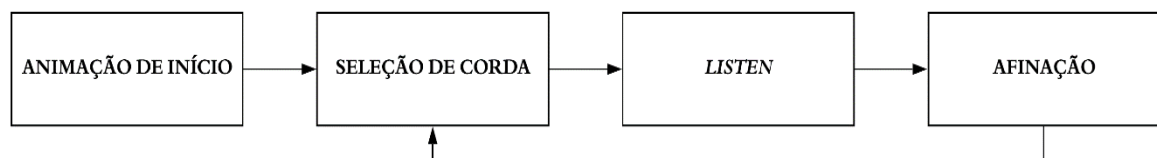


Fonte: Autor

### 4.2 Código

O código desenvolvido tem o objetivo de programar o Nodemcu possibilitando a leitura da entrada analógica do microfone e acionar o motor de passos. Seu funcionamento é composto por quatro etapas, conforme Figura 12.

Figura 12 – Fluxograma de funcionamento



Fonte: Autor

#### 4.2.1 Animação de início

A animação de início representa uma espécie de inicialização de sistema, fazendo analogia à sistemas que piscam suas luzes de ao ligar. O *display* exibe os números de um a seis

e as letras E; B; G; D; A, E representando, respectivamente, as cordas do violão e as notas de afinação padrão.

O sistema funciona normalmente caso seja programado para iniciar diretamente na etapa de seleção.

#### 4.2.2 Seleção de corda

Para a escolha da corda usa-se a chave táctil (*push botton*) pressionando-a para seleccionar a corda desejada. O código faz a tratativa de estado inicial da chave (degraus de subida ou descida) para evitar erros na contagem, bem como, o contador é reiniciado ao chegar no número seis.

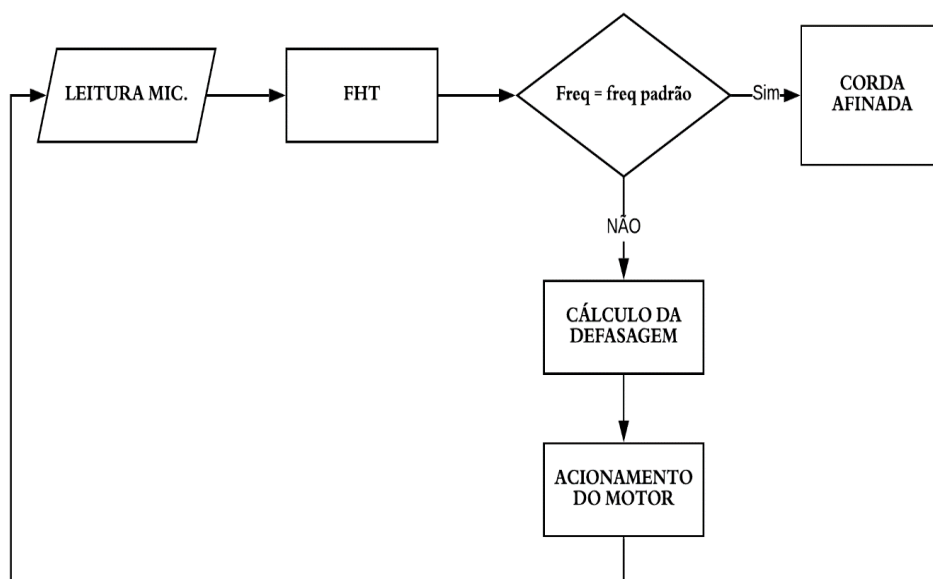
A transmissão da informação conta com auxílio do circuito integrado CD4511 o qual atua como decodificador BCD (*Binary-coded Decimal*), recebendo códigos em binário e decodificando para hexadecimal para exibição no *dipslay* de 7 segmentos.

#### 4.2.3 Listen

Feita a seleção de corda inicia-se o processo de aquisição de frequência por meio da conversão das leituras analógicas do sensor max4466 (microfone). São necessários os recursos da biblioteca FHT para obter valores no domínio da frequência. A Figura 13 apresenta, em resumo, o funcionamento desta etapa.

A definição do valor de entrada é feita considerando a média aritmética entre quatro leituras consecutivas do microfone, considerando pulsações maiores que 1 segundo.

Figura 13 - Fluxograma modo *Listen*



Fonte: Autor

#### 4.2.4 Afinação

Para cada uma das 6 cordas tem-se a frequência padrão de para afinação (Tabela 2), após o modo *Listen* o sistema conhece a frequência atual da corda selecionada. Com base nesses dados é possível, por meio de subtração, saber quantos Hertz faltam para chegar no objetivo.

O resultado da subtração entre a referência de afinação padrão e o valor atual, ou seja, a defasagem da corda, torna-se parâmetro para o acionamento do motor de passos (segundo Tabela 4). A Figura 14 possibilita a identificação, no próprio código (adaptado), a operação supracitada como parâmetro para chama do motor.

Figura 14 - Trecho de código

```
if(frequencia>scale[nota+12*i]->freq_high&&frequencia<scale[nota+12*i+1]->freq_high){//Maior que o limite e menor que o limite da nota seguinte.
    notas(scale[nota+12*i+1]->letra);//Nota seguinte
    digitalWrite(VERDE,LOW);
    digitalWrite(VERMELHO,HIGH);//Muito apertada -> LUZ VERMELHA
    digitalWrite(AMARELO,LOW);
    myStepper.step(defasagem);// sentido anti-horario.
    break;
}
if(frequencia<scale[nota+12*i]->freq_low&&frequencia>scale[nota+12*i-1]->freq_low){//Menor que o limite e maior que a nota anterior
    notas(scale[nota+12*i-1]->letra);//Nota anterior
    digitalWrite(VERDE,LOW);
    digitalWrite(VERMELHO,LOW);
    digitalWrite(AMARELO,HIGH);//Muito frouxa -> LUZ AMARELA
    myStepper.step(defasagem * -1);// sentido horario.
    break;
}
```

Fonte: Autor

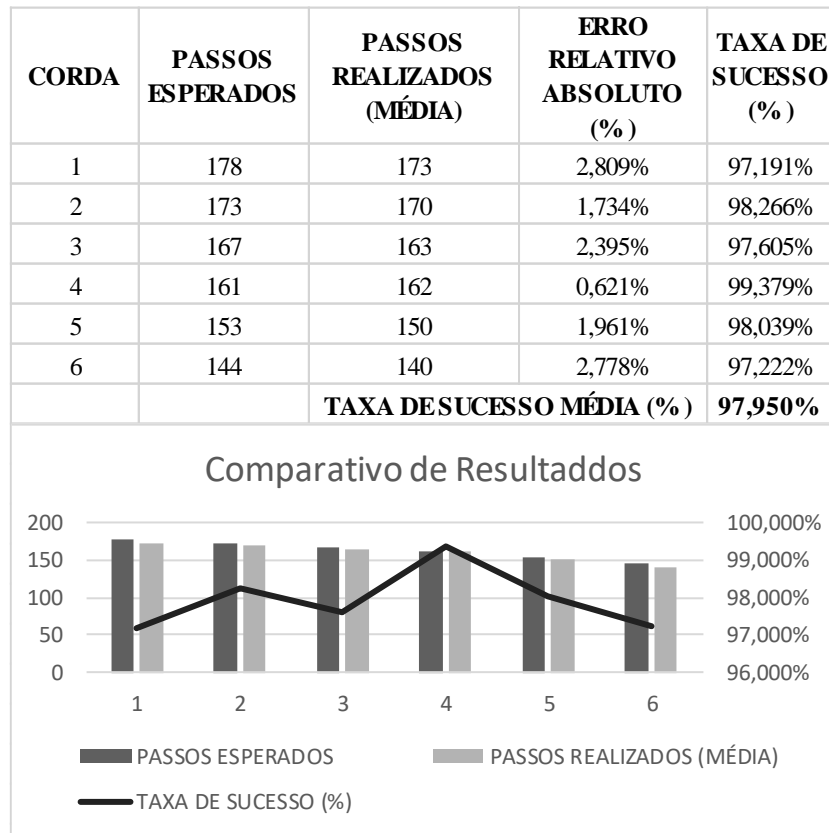
#### 4.3 Validação dos resultados

Com base nos parâmetros estabelecidos por Becchi 2011 (tabela 4), a Figura 15 apresenta a comparação entre os resultados esperados para o motor e a média dos resultados obtidos. Foram consideradas 10 amostras por corda.

Para realização dos testes foi considerado um ambiente ideal com o intuito de minimizar as interferências externas. Fora deste ambiente o aproveitamento ficou por volta de 85%.

A distância entro o violão e o circuito também interfere no funcionamento correto do sistema. Na validação abaixo foi considerada uma distância máxima de 0,5 metros.

Figura 15 - Comparativo de resultados

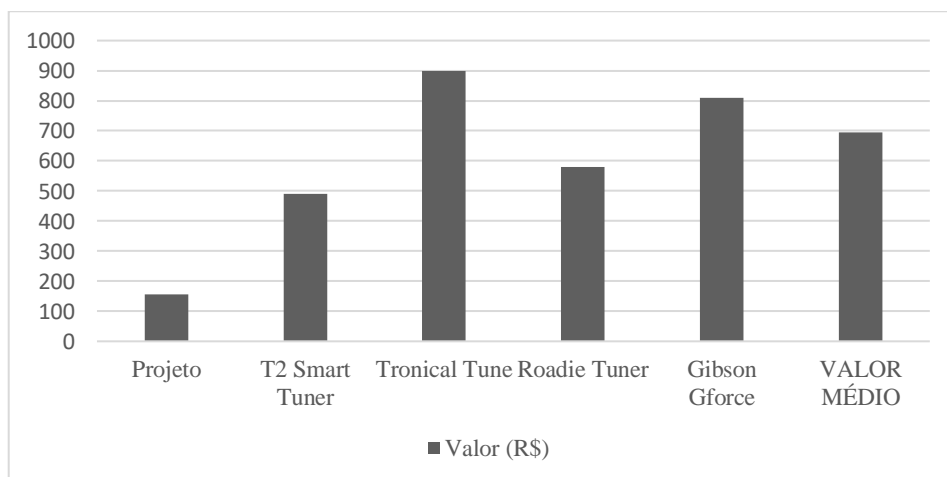


Fonte: Autor

#### 4.4 Comparativo de custos

O gráfico presente na Figura 16 traz um comparativo entre a média de preços de afinadores automáticos disponíveis no mercado. Não foram considerados os custos de envio e outras taxas pertinentes para produtos importados.

Figura 16 – Comparativo de custos



Fonte: Autor



## 5. Conclusão

Este trabalho obteve sucesso em apresentar um circuito de automação capaz de realizar a afinação de um violão de forma semiautomática. A validação do experimento deu-se seguindo os parâmetros de funcionamento do motor definidos por Becchi 2011, entretanto, sem a necessidade de plugar o instrumento no próprio circuito.

Em contrapartida a própria forma de captação das frequências das cordas traz alguns empecilhos para o funcionamento adequado do sistema, há presença constante de ruído. Os testes foram realizados em ambiente classificado como ideal, ou seja, com baixa incidência de interferências externas.

O custo de total do projeto representa cerca de 25% do valor médio dos produtos disponíveis no mercado e, mesmo com as adequações sugeridas, dificilmente ultrapassará 50% da precificação média.

### 5.1 Adequações

Para o funcionamento em situações reais é necessário a substituição do motor de passos por um modelo que possua maior torque. A tensão nas tarraxas é variável e o funcionamento do motor não pode ser comprometido.

Na prática o violão, como outros instrumentos, pode ser afinado em padrões diferentes de acordo com a necessidade do contexto. O sistema pode ser programado para oferecer mais opções de afinação. Vale ressaltar que disponibilizar uma nova interação para o usuário requer, também, adequações no circuito o qual já lida com o limite de pinos disponíveis.

### 5.2 Continuidade

Em versões futuras estuda-se realizar a solda dos componentes em placa PCB com a finalidade da construção de um dispositivo que saia do âmbito experimental, ou seja, fora de *protoboards*.

O Nodemcu, como já dito, possui fácil comunicação com meios sem fio como *bluetooth* e *wi-fi*. São funcionalidades que podem ser exploradas buscando a interligação com *smartphones* pelo intermédio de aplicativos.

## REFERÊNCIAS

ARDUINO. **Stepper Library**. Disponível em:  
<<https://www.arduino.cc/en/reference/stepper>>. Acesso em: 01 de mai 2019.

BECCHI, Natan Gabriel. **SISTEMA AUTOMATIZADO PARA AFINAÇÃO DE VIOLÃO ELÉTRICO**. 2017. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Centro Universitário Univates, Lajeado, 2017.

CHAPRA, Steven C; CANALE, Raymond P.. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5 ed. São Paulo: AMGH Editora, 2008. 865p.

DUARTE, Luiz. **Introdução à linguagem de programação Lua**. 2016. Disponível em: <<https://www.luiztools.com.br/post/introducao-a-linguagem-de-programacao-lua/>>. Acesso em: 26 fev. 2019.

EVANS, Martin; NOBLE, Joshua; HOCHENBAUM, Jorfan. **Arduino em Ação**. São Paulo: Novatec, 2013. 424 p. Tradução: Camila Paduan.

MCROBERTS, Michael. **Arduino Básico**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2015. 512 p. Tradução: Rafael Zanfolin.

MED, Bohumil. **Teoria da Música**. 4. ed. Brasília: Musimed, 1996. 420p.

MENEZES, Flo. **A Acústica Musical em Palavras e Sons**. 1. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003. 277 p.

MONK, Simon. **Programação com Arduino II: Passos Avançados com Sketches**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 260p. Tradução: Anatólio Laschuk.

MURTA, José Gustavo Abreu. **Guia completo de NodeMCU – ESP12 – Introdução (1)**. Blog Eletrogate. 2018. Disponível em: <<http://blog.eletrogate.com/nodemcu-esp12-introducao-1/cao-1/>>. Acesso em: 16 mai. 2019

OLIVEIRA, Sérgio de. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI**. 1. ed. São Paulo: Novatec, 2017.

OPEN MUSIC LABS. **Arduino FHT Library**. 2016. Disponível em: <<http://wiki.openmusiclabs.com/wiki/ArduinoFHT>>. Acesso em: 02 de mai 2019.

OPPENHEIM, Alan V.; WILLISKY, Alan S.. **Sinais e Sistemas**. 2 ed. São Paulo: Pearson, 2010. 568p.

PENINO, Édilys de Carvalho Castro; TRINDADE, Ronaldo Silva. **Microcontroladores**. Ouro Pedro: Rede e-Tec Brasil – Ministério da Educação, 2013. 80p.

RODRIGUES, Oliveira Ricardo. **USO DO MICROCONTROLADOR ESP8266 PARA AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL**. 2017. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Escola Politécnica – UFRJ, Rio de Janeiro, 2017.

ROEDERER, Juan G. **The Physics and Psychophysics of Music: An Introduction**. 4. ed. New York: Springer, 2008. 221 p.

SCHILDT, Herbert. **C Completo e Total**. 3. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1997. 811p. Tradução: Roberto Carlos Mayer.

TOCCI, Ronald J.; WIDMER, Neal S.; MOSS, Gregory L.. **Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2011. 817 p. Tradução: Jorge Ritter.

TORO, Vincent Del. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 1999. 546p. Tradução: Onofre de Andrade Martins.

ZUBEN, Paulo. **Música e Tecnologia: O Som e Seus Novos Instrumentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Irmãos Vitale, 2004. 68p.