

Harryson Barbosa Palheta

Analizador de Espectro com Arduino na Faixa de Rádio FM para Fins Didáticos

Manaus, AM

2020

Harryson Barbosa Palheta

Analizador de Espectro com Arduino na Faixa de Rádio FM para Fins Didáticos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Campus Manaus Distrito Industrial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (CMDI/IFAM), como requisito parcial para obtenção do grau de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM
Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações
Programa de Graduação

Orientador: Dr. Vitor Bremgartner da Frota

Manaus, AM

2020

Harryson Barbosa Palheta

Analisador de Espectro com Arduino na Faixa de Rádio FM para Fins Didáticos/
Harryson Barbosa Palheta. – Manaus, AM, 2020.

60p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. Vitor Bremgartner da Frota

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Amazonas - IFAM., 2020.

1. Analisador. 2. Espectro. 3. Arduino. I. Dr. Vitor Bremgartner da Frota. II.
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM. III. Curso
de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações. IV. Analisador de Espectro com
Arduino na Faixa de Rádio FM para Fins Didáticos

Harryson Barbosa Palheta

Analizador de Espectro com Arduino na Faixa de Rádio FM para Fins Didáticos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Campus Manaus Distrito Industrial, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (CMDI/IFAM), como requisito parcial para obtenção do grau de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Trabalho aprovado. Manaus, AM, 26 de outubro de 2020:



Dr. Vitor Bremgartner da Frota
Orientador



Professora Avaliadora
Me. Priscila Silva Fernandes

NIVALDO
RODRIGUES E
SILVA:14248298287

Assinado de forma digital
por NIVALDO RODRIGUES
E SILVA:14248298287
Dados: 2020.10.26
19:37:51 -04'00'

Professor Avaliador
Me. Nivaldo Rodrigues e Silva

Manaus, AM
2020

*Este trabalho é dedicado a todos que acreditaram em mim
mais que eu mesmo*

Agradecimentos

Os agradecimentos acadêmicos docentes são direcionados à professora Laura, professor Gabriel, professor João Batista, diretor Nivaldo Rodrigues e todos aqueles que contribuíram, e ainda contribuem, para que a aprendizagem torne-se prazerosa e significativa, além, é claro, que tornaram a produção deste trabalho possível.

Agradeço também ao orientador Vitor Bremgartner, cujo o sobrenome não sou capaz de pronunciar, mas que nos dedica grande atenção e paciência para a produção de um trabalho bem feito.

Os agradecimentos acadêmicos discentes são direcionados a Ricardo Araújo, Allan Araújo, Wagner, Rafael Velas, Ralleson Oliveira, Ênio Nicolas entre muitos outros que me ajudaram a entender boa parte de eletrônica e outros conceitos importantes para o meu prosseguimento do curso.

Agradecimentos especiais são direcionados à minha Mãe e meu Pai, que desde sempre ensinaram-nos a importância dos estudos, às minhas irmãs e irmãos, de sangue ou não, amigos, à minha esposa, Jamiles Carvalho e a todos que me incentivam sempre, até mesmo quando tenho preguiça.

*“Com numerosos cálculos, pode-se obter a vitória.
Teme quando os cálculos forem escassos.
E quão poucas chances de vencer tem aquele que nunca calcula!”
(Sun Tzu)*

Resumo

Esta monografia apresenta o desenvolvimento de um software que simula um Analisador de Espectro para fins didáticos feito com Arduino e uma *shield* TEA5767 de rádio FM na frequência de 87,5 a 108 MHz interagindo com um computador pessoal qualquer. Além de analisar as funcionalidades do projeto comparando com um Analisador de Espectro real, ou um Osciloscópio com função compatível, e comparar também com projetos semelhantes já publicados.

Palavras-chave: Analisador de Espectro. Arduino. Software.

Abstract

This monograph presents the development of software that simulates a Spectrum Analyzer for didactic purposes made with Arduino and a TEA5767 FM radio *shield* in the frequency of 87.5 to 108 MHz, interacting with any personal computer. In addition to analyzing the project's functionalities, comparing it with a real Spectrum Analyzer, or an oscilloscope with compatible function, and also comparing it with projects already published.

Keywords: Spectrum Analyzer. Arduino. Software.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação da propagação de ondas eletromagnéticas	20
Figura 2 – Tipos de formas de ondas representada graficamente.	21
Figura 3 – Representação do período em forma de onda.	22
Figura 4 – Tensão pico a pico de 20V.	24
Figura 5 – Modulação em Amplitude (AM)	27
Figura 6 – Modulação em Frequência (FM)	28
Figura 7 – Osciloscópio Tektronix MDO3014	29
Figura 8 – Transformação de sinal através do algoritmo FFT	30
Figura 9 – Placa Arduino com cabo de comunicação/alimentação	32
Figura 10 – Shield TEA5767 com Antena conectada	34
Figura 11 – Montagem do Arduino com a Shield TEA5767.	42
Figura 12 – Montagem do completa do circuito do Simulador com um computador, cabo USB/Speed e Arduino com a Shield TEA5767.	43
Figura 13 – Clonagem do projeto Plot Spectrum do GitHub.	44
Figura 14 – Tela Inicial do Simulador de Analisador de Espectro.	44
Figura 15 – Plot Spectrum após o carregamento das frequências.	45
Figura 16 – Cabo de alimentação do Tektronix MDO3014.	46
Figura 17 – Antena de 50 ohms.	46
Figura 18 – Gerador de Sinais Tektronix AFG 3101.	47
Figura 19 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 87,5 a 108 MHz.	48
Figura 20 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 200 mVpp do Gerador.	48
Figura 21 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 300 mVpp do Gerador.	49
Figura 22 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 500 mVpp do Gerador.	49
Figura 23 – Captura de Tela do Gráfico do Plot Spectrum representado todos os pontos de identificação da Frequência Central.	53
Figura 24 – Identificação da Frequência Central no Analisador de Espectro.	53

Lista de quadros

Quadro 1 – Valores de saída do Gerador em dBm para as tensões pico a pico. . . .	41
Quadro 2 – Valores captados na frequência de 89,1 MHz para diferentes tensões pico a pico captados via antena.	50
Quadro 3 – Valores relativos de potência de uma tensão para outra.	50

Lista de abreviaturas e siglas

SI	Sistema Internacional de Unidades
Hz	Hertz
f	Frequência
T	Período
dBm	Decibel
dBm	Decibel Miliwatt
mW	Miliwatt
log	Logaritmo
PdBm	Potência dBm
FFT	Transformada Rápida de Fourier
RBW	Resolução da largura de Banda
ULA	Unidade Lógica e Aritmética
USB	Porta Serial Universal
ROM	Memória Somente de Leitura
SRAM	Memória Estática de Acesso Aleatório
UART	Receptor/Transmissor Universal Assíncrono
Vdc	Voltagem em Corrente Contínua
Kb	Kilobyte
MHz	Megahertz
SDA	Dado Serial
SLC	Tempo Serial
IDE	Ambiente Integrado de Desenvolvimento
HTML	Linguagem de Marcação

CSS Linguagem de Formatação de Estilo

COBENGE Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia

FM Modulação em frequência

Lista de símbolos

λ Letra grega lambda

Ω Letra grega omega

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Tema	17
1.2	Problema	17
1.3	Hipótese	18
1.4	Objetivos	19
1.4.1	Geral	19
1.4.2	Específicos	19
2	REFERENCIAIS TEÓRICOS	20
2.1	Sinais (Ondas eletromagnéticas)	20
2.1.1	Onda Senoidal	21
2.2	Frequência	21
2.3	Período	22
2.4	Grandezas Elétricas	23
2.4.1	Tensão	23
2.4.1.1	Tensão de Pico a Pico	23
2.4.2	Corrente	24
2.4.3	Resistência	24
2.5	Potência	25
2.5.1	Valor Eficaz	25
2.5.2	Potência Média	25
2.5.3	dBm	26
2.6	Modulação	26
2.6.1	Transmissão Análogica	27
2.6.1.1	Modulação de Amplitude (AM)	27
2.6.1.2	Modulação em Frequência (FM)	27
2.7	Analizador de Espectro	28
2.7.1	FFT	29
2.7.2	SPAN	29
2.7.3	Frequência Central	30
2.7.4	Nível de Referência	30
2.7.5	Escala	30
2.7.6	RBW	30
2.7.7	Marcadores	31
2.8	Microcontroladores	31

2.8.1	Arduino	31
2.8.1.1	Shield	33
2.8.1.2	TEA5767	33
2.8.1.2.1	Protocolo I2C	33
2.9	Software Arduino (IDE)	34
2.9.1	Backend	34
2.9.2	Firmware	35
2.9.3	Comunicação	35
2.10	Software Electron (Interface Gráfica)	35
2.10.1	Frontend	35
2.10.2	Electron	35
2.10.3	HTML	36
2.10.4	CSS	36
2.10.5	Java Script	36
2.10.6	NodeJS	37
2.10.7	Git	37
2.11	Sistema Operacional	37
2.11.1	Linux	37
3	TRABALHOS RELACIONADOS	38
4	METODOLOGIA	40
5	EXPERIMENTOS	41
5.1	Componentes	41
5.2	Preparativos	42
5.2.1	Simulador Plot Spectrum	42
5.2.2	Analisador de Espectro	45
5.2.3	Gerador de Sinais	46
5.3	Coleta de Dados	47
6	RESULTADOS	50
6.1	Comparação das funcionalidades	51
6.1.1	FFT	51
6.1.2	SPAN	52
6.1.3	Frequência Central	52
6.1.4	Nível de Referência	52
6.1.5	Escala	52
6.1.6	RBW	54
6.1.7	Marcadores	54
6.2	Comparação com os Trabalhos Relacionados	54

7	CONCLUSÕES	55
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	56
	REFERÊNCIAS	57

1 Introdução

1.1 Tema

Analisador de Espectro com Arduino na Faixa de Rádio FM para Fins Didáticos

1.2 Problema

Muitas vezes, em disciplinas do cursos de telecomunicações, como Micro-ondas, Ondas e Antenas entre outras que fazem estudos de sinais, utilizamos o analisador de espectro, instrumento que serve para a análise de sinais alternados no domínio da frequência. Nele é possível efetuarmos medidas de modulação, distorção e ruído.

Operar esses equipamentos requer muita atenção, leitura dos manuais de operação, treinamentos e entendimentos de conceitos físicos como frequência, potência, tensão e período para que não haja equívocos no seu manuseio.

Ter a leitura desses dados em uma tela digital colorida, torna-se a experiência de aprendizagem muito mais atrativa, encurtando a dificuldade existente em matérias que utilizem esses equipamentos.

Em uma breve pesquisa nas literaturas a respeito da utilização do Analisador de Espectro e em lojas especializadas, percebemos que o preço desse equipamento com suas funcionalidades básicas custa em torno de R\$ 1.300,00, como podemos ver no modelo **Hantek DSO8060 5-em-1 Handheld** no site **Banggood.com**. Enquanto um com funcionalidades completas e de marca conhecida no segmento de eletrônica custa em torno de USD 24.760,00 (R\$ 93.840,40 em conversão direta), como é o caso do **Tektronix MDO4104C**.

A obtenção dos equipamentos em uma instituição de ensino, não é algo simples, pois dependem de vários processos burocráticos que levam tempo a serem concluídos, se aprovados, além, é claro, de recursos financeiros. Em alguns casos até ultrapassa o período (6 meses) de uma matéria. O que nos traz a alternativa de fazer a própria ferramenta, são os chamados *makers*, elaborando-a de forma mais rápida, podendo-se pedir os componentes através da Internet e chegando em torno de duas semanas a um mês, ou até dois meses pedindo em alguns sites chineses.

Os *Makers* provêm 'Movimento Maker' que tem a filosofia do "Make Yourself", que em inglês quer dizer "Faça você mesmo". O que geralmente é feito por um custo menor que as ferramentas originais e as vezes com alguns recursos limitados, embora funcionais.

Para essa tarefa de "faça você mesmo", existem várias tecnologias disponíveis no mercado para elaboração de circuitos eletrônicos como resistores capacitores, transistores, diodos, LEDs, placas de cobre, fontes de alimentação, CIs¹,etc. Existem também circuitos prontos como Arduino, Raspiberry Pi, Orange Pi e muitos outros que ajudam nas práticas de automação².

Além de toda essa disponibilidade no mundo da eletrônica, a confecção dos próprios instrumentos recebem amplo apoio das comunidades na Internet como os sites **Felipeflop**³, Clube do Hardware⁴ e até mesmo o **Youtube**⁵.

Para confecção do próprio analisador de espectro devemos seguir etapas que nos ajudam a entender como o mesmo funciona. Etapas como plotagem de gráfico, coleta dos dados, criação a interface, interação com a interface, setagem de valores e configurações, permitindo melhor simular um equipamento real, ou chegar o mais perto disso possível.

Tais etapas são descritas nesse trabalho, onde tem todo referencial possível para a compreensão do dispositivo criado, mostrando algumas etapas do desenvolvimento do software, uma vez que este envolve muitos conhecimentos aplicados, o que não é o foco deste projeto.

Logo após os métodos de fabricação do software e comunicação dos dispositivos, serão feitos experimentos com um analisador real em comparação com o projeto criado para validar seu funcionamento, uso e competência.

Por fim, após os conceitos, a metodologia, trabalhos relacionados e experimentos realizados, é possível descobrir se um analisador de espectro feito com as próprias mãos está apto para fins didáticos.

1.3 Hipótese

Parte-se do pressuposto que a partir do problema apresentado, a implantação de um simulador de um analisador de espectro com fabricação própria torna-se uma alternativa mais barata e ágil para uso didático dentro de um período do curso de Telecomunicações.

¹ Circuitos Integrado.

² Automação é um sistema que emprega processos automáticos que comandam e controlam os mecanismos para seu próprio funcionamento.

³ <<https://www.filipeflop.com/>>

⁴ <<https://www.clubedohardware.com.br>>

⁵ <<https://www.youtube.com/>>

1.4 Objetivos

1.4.1 Geral

Fornecer uma ferramenta de auxílio para o entendimento dos conceitos das disciplinas que utilizem o Analisador de Espectro por meio de um *software* Simulador integrado com Arduino.

1.4.2 Específicos

Desenvolver uma interface amigável e intuitiva para o *software* Simulador com maior semelhança possível a de um Analisador de Espectro.

Incentivar os estudantes de Telecomunicações praticar o desenvolvimento de aplicações e de projetos com autoria própria ajudando a outros ao decorrer do curso.

Estimular o estudo de frequências e potências de forma prazerosa com mais prática que teoria observando o funcionamento do Simulador e comparando-o com um analisador de Espectro real.

Possibilitar alternativas de baixo custo para confecção de equipamentos próprios nas disciplinas que utilizem o Analisador de Espectro.

Prover um projeto comum onde todos de uma turma podem melhorá-lo ao mesmo tempo compartilhando os conhecimentos adquiridos ao longo do seu processo.

2 Referenciais Teóricos

Em telecomunicações, a comunicação sem fio é amplamente usada para longas distâncias sendo necessário analisar e escolher qual a forma que o sinal será transmitido. Assim uma transmissão de um sinal mais eficiente, que poupe energia, pode ser recepcionada com o mínimo de interferências possível.

Para garantir essa eficiência na transmissão de sinais são usados equipamentos que mensuram a recepção do sinal nas áreas onde estes podem sofrer interferência e daí definir estratégias de melhorias na transmissão.

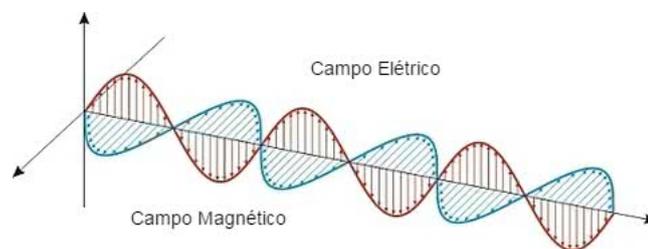
Antes de compreender o que esse equipamento exatamente faz, é preciso entender alguns conceitos básicos de eletrônica e magnetismo, entre outros assuntos que envolvam a confecção deste trabalho.

2.1 Sinais (Ondas eletromagnéticas)

Ondas eletromagnéticas são aquelas que resultam da libertação das fontes de energia elétrica e magnética em conjunto.

Quando se movimenta velozmente, com a velocidade da luz, a energia liberada apresenta o aspecto de onda. Assim nomeando de onda eletromagnética, como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Representação da propagação de ondas eletromagnéticas



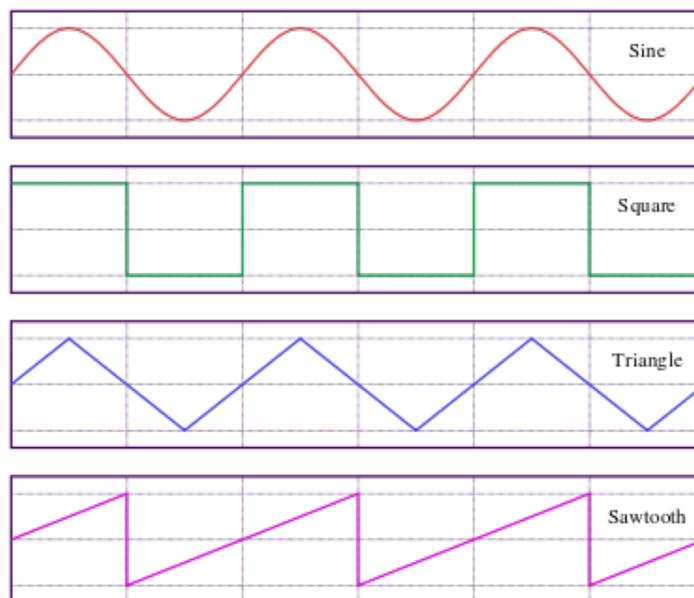
Fonte: (TODA MATÉRIA, 2018)

Essas mesmas ondas podem ser observadas por equipamentos específicos, como o que será simulado mais a frente neste trabalho, que as captam e geram gráficos mostrando as frequências (2.2) e as potências (2.5).

2.1.1 Onda Senoidal

A onda senoidal é uma curva matemática que descreve uma oscilação periódica suave. Uma onda senoidal é uma onda contínua. É nomeado após a função seno, da qual é o gráfico (GOR'KOV, 2014). A Figura 2, abaixo, mostra os tipos de forma de onda:

Figura 2 – Tipos de formas de ondas representada graficamente.



Fonte: (GOR'KOV, 2014)

A forma de onda senoidal é amplamente usada neste trabalho para gerar e visualizar os gráficos nas telas do Simulador e Analisador de Espectro, mostrado com mais detalhes no próximos capítulos.

2.2 Frequência

A frequência é definida como o número de voltas realizadas por um objeto em movimento circular para um intervalo de tempo determinado. Também pode ser definida como a quantidade de ondas geradas em um tempo específico. De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade que define a frequência é a rotação por segundo, definida como hertz (Hz) (JÚNIOR, 2019).

Para melhor compreensão temos o exemplo de um lâmpada, que pisca 60 vezes em um segundo, mas pisca tão rápido parecendo que está acesa sem interrupções, essas 60 vezes são exatamente 60 Hz da energia elétrica alternada que temos na tomadas, uma vez que esta frequência é padrão no Brasil.

A faixa de frequência deste trabalho é o mesmo utilizado na Europa, parecido com a do Brasil, e que também é suportado pela placa utilizada para confecção do simulador Plot Spectrum, explicado mais a frente, compreende de 87.5 à 108 MHz (??).

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

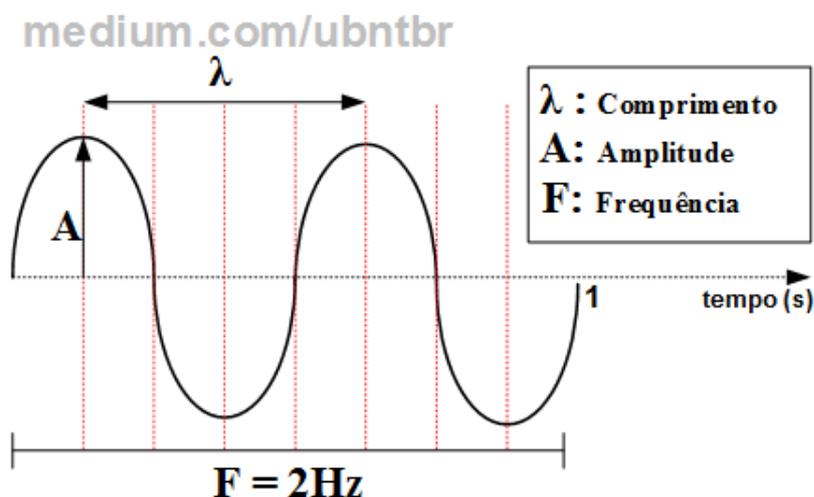
onde:

f - é a **frequência**.

T - é o **período**.

Em outras palavras, a frequência é a repetição do período, como podemos ver na Figura 3.

Figura 3 – Representação do período em forma de onda.



Fonte: (BRITO, 2019)

Esta unidade é a base de observação deste trabalho, pois será ela a analisada nos gráficos gerados a partir do dispositivo criado.

2.3 Período

O período é o tempo necessário para que um objeto em movimento circular conclua uma volta. No caso da geração de ondas, é o tempo necessário para que uma onda seja formada. De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de medida para o período é segundos (s) (JÚNIOR, 2019). A equação abaixo mostra a relação entre período e frequência:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.2)$$

onde:

T - é o **período**.

f - é a **frequência**.

Pode-se observar que esta unidade é proporcionalmente inversa a frequência, ou seja, quando a frequência aumenta, o período diminui e vice-versa.

Resumidamente, o período é o comprimento de uma onda como foi mostrado na Figura 3.

No gráficos apresentados pelo equipamento, esta unidade não será vista de forma transparente, mas é necessária para compreensão uma vez que não se separa o período da frequência.

2.4 Grandezas Elétricas

Ao fazermos o experimentos e medições com circuitos elétricos, sempre devemos considerar as três principais grandezas elétricas: tensão, corrente e resistência (MARIA, 2020).

Abaixo são explicadas cada uma delas e onde se aplicam neste trabalho.

2.4.1 Tensão

Quando entre dois corpos ou entre dois pontos existe uma diferença de quantidade de cargas dizemos que temos uma diferença de potencial ou uma tensão elétrica representada pela letra "E" (MARIA, 2020).

Fazendo uma analogia é como se dois tanques com água, um com mais e outro com menos (diferença de potencial, d.d.p.), tivessem uma interação, onde o tanque com mais água cedesse para o com menos até nivelar por completo. Essa diferença é medida em Volt (V).

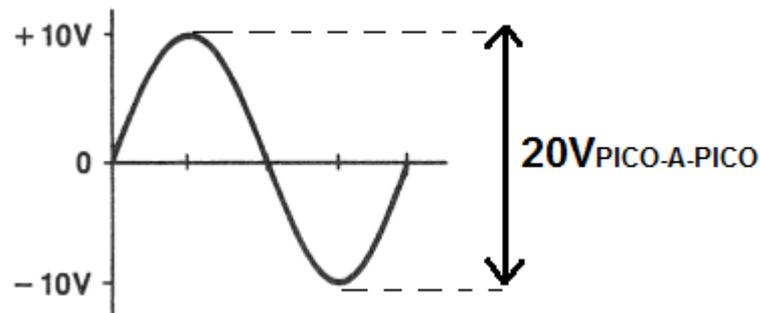
2.4.1.1 Tensão de Pico a Pico

A tensão de pico a pico é uma forma de onda de tensão onde na parte superior é chamada de crista e na parte inferior é chamada de calha.

Abaixo, na Figura 4 é exemplificado o valor de 20Vpp (volts pico a pico):

Onde podemos concluir que o valor de pico é exatamente a metade do valor pico a pico, dado no exemplo anterior, calculando transforma-se na seguinte formula:

Figura 4 – Tensão pico a pico de 20V.



Fonte: (ELETRÔNICOS, 2020)

$$V_{pp} = V_{p+} - V_{p-} = 10V - (-10V) = 20V \quad (2.3)$$

Onde:

V_{pp} - é a tensão de pico a pico.

V_{p+} - é a tensão de pico positiva.

V_{p-} - é a tensão de pico negativa.

2.4.2 Corrente

A corrente elétrica é causada por uma diferença de potencial elétrico (d.d.p./tensão), explicada anteriormente. Quando o fluxo de "água"(elétrons), pegando o exemplo anterior, desloca-se de um lado para o outro, mantém uma velocidade devido a d.d.p., essa velocidade da passagem, a corrente, é medida em Ampères (A) (INFORMAÇÃO, 2020).

2.4.3 Resistência

A resistência elétrica é definida como a capacidade que um corpo tem de opor-se à passagem da corrente elétrica. A unidade de medida da resistência no SI é o Ohm (Ω), em homenagem ao físico alemão George Simon Ohm, e representa a razão Volt/Ampère (JÚNIOR, 2020).

Segundo a "Primeira Lei de Ohm", a resistência pode sofrer alterações dependendo da corrente ou da tensão aplicada no circuito, como mostra a equação abaixo:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.4)$$

onde:

R - é a **resistência**, medida em ohms (Ω).

V - é a **tensão**, medida em volts (V).

I - é a **corrente**, medida em ampères (A).

2.5 Potência

Potência é uma grandeza física usada para calcular a quantidade de energia concedida ou consumida por unidade de tempo. Em outras palavras, é a taxa de variação da energia em função do tempo. A potência é útil para medir a rapidez com a qual uma forma de energia é transformada por meio da realização de um trabalho (MONQUEIRO, 2011).

Existem várias unidades de medidas que abrangem a potência, mas a que é relevante para este trabalho é o **dBm** e para chegar nele, devemos entender conceitos como o **valor eficaz** e a **potência média**.

2.5.1 Valor Eficaz

Valor eficaz ou RMS (Root Mean Square) de uma onda periódica de corrente e tensão está relacionado com o calor dissipado em uma resistência (NAKASHIMA, 2013). Esse valor pode ser encontrado através da seguinte equação:

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

onde:

- V_{RMS} é o valor eficaz medido em volts
- V_m é a tensão média em volts

2.5.2 Potência Média

O Valor Médio de uma onda periódica de tensão, corrente e potência (e outras grandezas físicas) está relacionado com a componente contínua desta onda e o interesse por este valor está relacionado com o resultado após a “filtragem” do sinal (NAKASHIMA, 2013). Para encontrar esse valor na potência, é utilizado a seguinte equação:

$$P_m = \frac{V_{\text{RMS}}^2}{R} \quad (2.6)$$

onde:

- P_m é a potência média em watts
- V_{RMS} é o valor eficaz medido em volts
- R é a resistência em ohms

2.5.3 dBm

dBm ou dBmW (decibel miliwatt) é uma unidade de medida utilizada principalmente para telecomunicações para expressar a potência absoluta mediante uma relação logarítmica. Define-se como o nível de potência em decibéis em relação ao nível de referência de um 1 mW (MONQUEIRO, 2011). Pode ser expressa através da equação:

$$P_{dBm} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_m}{1mW} \right) \quad (2.7)$$

onde:

- P_{dBm} é a potência em dBm
- P_m é a potência média em watts

Está unidade é utilizada como métrica neste trabalho para medir a potência que os dispositivos simulador e analisador de espectro emitem no capítulo de [Experimentos](#).

2.6 Modulação

A modulação é o processo realizado sobre o sinal que deseja transmitir, sinal este que contém informações e devem ser interpretado pelo receptor. A escolha da técnica de modulação permite “moldar” as características do sinal a transmitir e adaptá-lo às características do canal (MOREIRA, 1999).

Entre outros aspectos, a operação de modulação permite: (i) deslocar o espectro do sinal a transmitir para a banda de frequências mais apropriada/disponível; (ii) produzir um sinal modulado com um espectro mais estreito (ou mais largo) que o sinal original; (iii) tornar o sistema de transmissão mais robusto relativamente a algum tipo de ruído e/ou interferência; (iv) adaptar a sensibilidade do receptor às características do canal (MOREIRA, 1999).

As técnicas de transmissão dividem-se em dois grandes grupos: analógico e digital. A transmissão analógica, embora ainda muito utilizada, contém interferências, algo solucionado com a transmissão de dados digitais, por esse motivo há uma migração constante desses serviços para o meio digital.

A este trabalho cabe entender como a transmissão analógica funciona, não será abordado os conceitos de transmissão digital¹, embora a teoria seja bem parecida de ambos meios.

2.6.1 Transmissão Análogica

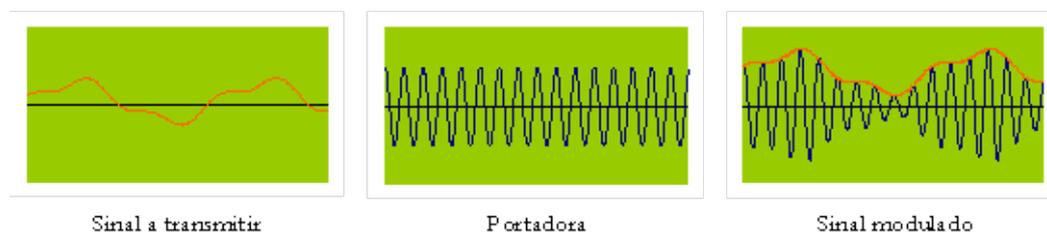
A transmissão de sinais analógicos recorrendo a técnicas baseadas na modulação de portadoras é muito utilizada na difusão de som (radiodifusão) e sinais de televisão. As duas principais técnicas são a modulação de amplitude (AM) e a modulação de frequência (FM) (PIZZOTTI, 2013).

2.6.1.1 Modulação de Amplitude (AM)

A amplitude da portadora de um transmissor é variada de acordo como o sinal em função do sinal de interesse, que é o sinal modulador. A frequência e a fase da portadora são mantidas constantes. Um sinal AM é muito sujeito a estática e a outras interferências elétricas (PIZZOTTI, 2013).

A Figura 5 demonstra a modulação em amplitude.

Figura 5 – Modulação em Amplitude (AM)



Fonte: (MOREIRA, 1999)

2.6.1.2 Modulação em Frequência (FM)

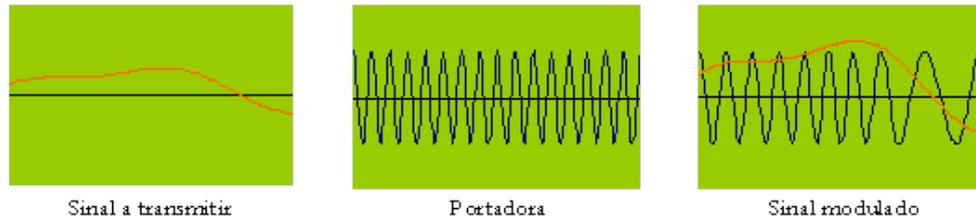
Em FM, ao contrário da AM, a amplitude da portadora é mantida constante, mas sua frequência é alterada conforme variações no sinal enviado.

A FM é menos suscetível que a AM a certos tipos de interferência, como a causada por temporais e por correntes elétricas fortuitas de equipamentos e outras fontes relacionadas. Esses ruídos afetam a amplitude da onda de rádio mas não sua frequência, assim um sinal de FM permanece virtualmente inalterado (PIZZOTTI, 2013).

¹ Para mais informações acesse: <http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/TecModul.html>.

O total de largura de banda necessário para transmitir um sinal de FM é maior que para AM, o que é um limite para alguns sistemas. A figura 6 mostra de forma visual como é a modulação em frequência.

Figura 6 – Modulação em Frequência (FM)



Fonte: (MOREIRA, 1999)

Esta modulação é usada como métrica para coletar dados do dispositivo criado para simular um **analisador de espectro**.

2.7 Analisador de Espectro

O analisador de espectro é um instrumento de medição através do qual os sinais elétricos podem ser avaliados em determinadas frequências (FERRER, 2019).

Através de uma tela, os analisadores mostram os componentes espectrais encontrados na entrada de um sinal elétrico, óptico ou acústico.

Com equipamento configurado corretamente, o sinal e a potência podem ser exibidos. No eixo vertical, vemos o conteúdo espectral do sinal em dB, e na horizontal, a frequência. Essa análise é baseada na revelação de todos os componentes. Ele também tem a capacidade de modelar luz, ondas de rádio e som, que podem ser combinados ou sobrepostos.

O modelo, MDO 3014, da Tektronix, usado para esta monografia é um osciloscópio com a função de analisador de espectro, mas que atende plenamente as funções básicas requeridas, e tem a precisão muito próxima de um analisador de espectro como propriamente dito. Abaixo vemos sua ilustração na Figura 7.

Se tratando de interpretar o *display* de um analisador, temos destaques há alguns elementos como FFT, SPAN, faixa, frequência central, RBW, escala, nível de referência e marcadores.

Figura 7 – Osciloscópio Tektronix MDO3014



Fonte: (PALHETA, 2020a)

2.7.1 FFT

FFT em inglês é *Fast Fourier Transform*, ou Transformada Rápida de Fourier é um algoritmo criado para diminuir o processamento do osciloscópio na transformação da frequência captada em um pico de potência e vice-versa (TEKTRONIX, 2014).

A FFT não tem interação direta com o equipamento, mas é graças a ela que obtemos os dados necessário só para a plotagem.

As imagens abaixo é um exemplo de transformação de sinal através do algoritmo FFT, como é visto na Figura 8:

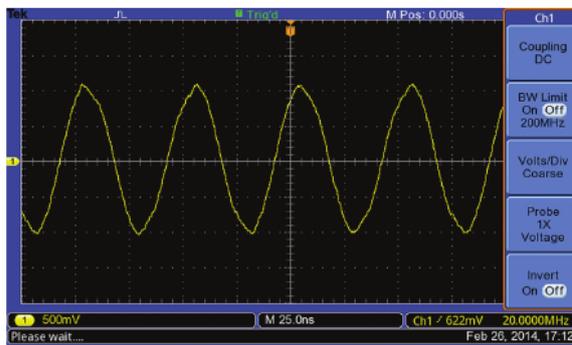
Na Figura 8a, o sinal está no domínio do tempo, é como se o sinal captado estivesse de lado, onde todas as frequências estivessem indo por um só caminho.

Na Figura 8b, o sinal está no domínio da frequência, é como se o mesmo sinal do domínio do tempo estivessem de frente e todas a frequências se separassem.

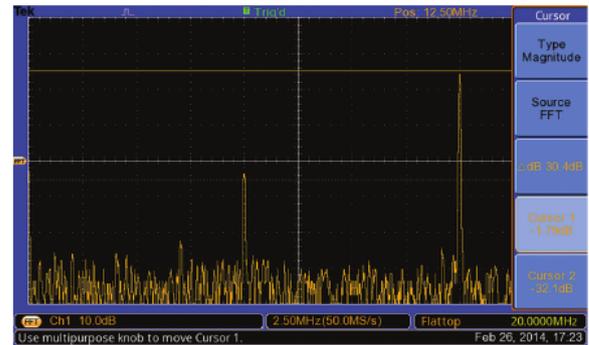
2.7.2 SPAN

É a frequência total analisada, desde a frequência inicial até a final. A largura de banda de um analisador de espectro é a faixa de frequência para a qual o analisador de espectro não afeta a amplitude do sinal em teste (ARTS, 2019)

Figura 8 – Transformação de sinal através do algoritmo FFT



(a) Visualização no domínio do tempo do sinal de *clock* de 20 MHz, mostrando quantidades de distorção nos picos. Isso implica que o sinal está sendo modulado por uma fonte de frequência mais baixa.



(b) Visualização no domínio da frequência do relógio de 20 MHz. Um pico a 10 MHz revela a fonte da modulação.

Fonte: (TEKTRONIX, 2014)

2.7.3 Frequência Central

É a frequência que deseja analisar horizontalmente na tela, por exemplo, temos uma faixa que vai de 0 Hz (Hertz) a 20 Hz, a frequência central seria 10 Hz.

2.7.4 Nível de Referência

O nível de referência é o elemento vertical da tela. É onde se inicia o nível da potência, analisado de baixo para cima, quando ele está em zero dB, o nível de referência é 1mW (miliWatt), esta unidade é de potência elétrica.

O Watt não é usado como unidade para aferição devido a trabalhar com números muito altos. Daí a adoção de dBm por se tratar de uma unidade comparativa relativa.

2.7.5 Escala

É a relação entre os elementos mostrados em tela e o tamanho do sinal analisado. Mostra as divisões no *display* para melhor referência dos valores analisados.

2.7.6 RBW

O RBW (resolution bandwidth) é o intervalo em que as amostras da frequência são coletadas dentro da largura de banda. Por exemplo, temos 20 MHz de faixa a ser analisada, o RBW é de 1 MHz, então o RBW coletará 20 amostras dentro da faixa. A

fórmula abaixo nos ajuda compreender melhor a relação entre a largura de banda e o RBW.

2.7.7 Marcadores

Marcadores são os pontos de frequência onde são analisados em tela. Mostra detalhes podendo acompanhar ou pausar o que está mostrado em tela para melhor ser analisado.

2.8 Microcontroladores

Um microcontrolador é, em última análise, um computador em um único chip. Esse *chip* contém um processador (Unidade Lógica e Aritmética – ULA), memória, periféricos de entrada e de saída, temporizadores, dispositivos de comunicação serial, dentre outros (TRINDADE., 2013). Os microcontroladores surgiram como uma evolução natural dos circuitos digitais devido ao aumento da complexidade dos mesmos. Chega um ponto em que é mais simples, mais barato e compacto, substituir a lógica das portas digitais por um conjunto de processador e software. Esse dispositivo permite a criação de um *software* para praticamente qualquer atividade eletrônica repetitiva. Para este trabalho, com a ajuda de um microcontrolador será possível coletar os dados necessários para dispor as informações em tela.

2.8.1 Arduino

Segundo o site oficial do Arduino, é definido como "O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar"(ARDUINO, 2019a).

Podemos utilizar o Arduino para:

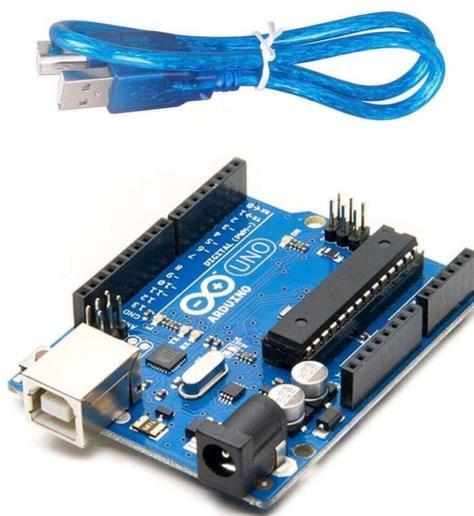
- Controle de motores;
- Carrinhos de controle remoto;
- Robôs de combate;
- Automação residencial;
- Controle de acesso;
- Controle de medições (temperatura, umidade, calor, tensão, corrente, etc);
- Comunicação sem fio;

- Qualquer projeto que trabalhe com módulos e sensores.

O modelo utilizado é o Arduino Uno, uma versão mediana que contém processamento e memória que atende a finalidade deste trabalho.

Abaixo na Figura 9 podemos ver a placa Arduino Uno junto ao cabo de comunicação:

Figura 9 – Placa Arduino com cabo de comunicação/alimentação



Fonte: (CIRCUITO, 2018)

Essas rotinas são programadas e enviadas para memória da placa que opera sem cessar enquanto estiver com a alimentação correta.

Abaixo podemos ver algumas especificações deste dispositivo necessárias para o melhor entendimento:

- Modelo: Arduino Uno R3;
- Microcontrolador: ATmega328;
- Conversor USB/Serial: ATmega16U2;
- Velocidade do Clock: 16 MHz;
- Memória ROM: 1 Kb (ATmega328);
- Memória SRAM: 2 Kb (ATmega328);
- Memória Flash: 32 Kb (0,5 Kb usado pelo Bootloader);
- Tensão de Alimentação: 7 à 12 Vdc (Conector Jack e pino Vin);

- Tensão de Operação: 5 Vdc;
- Tensão de Nível Lógico: 5,0 Vdc (Tolera 3,3 Vdc);
- Interfaces: UART(1 canal), SPI (1 canal), I2C (1 canal);
- Tipos GPIO: Pinos digitais I/O (14), pinos analógicos 10-Bits (6 canais), pinos PWM (6 canais);
- Temperatura de trabalho: -40° à +85° C;
- Dimensões: 55 x 75 x 13 mm (L x C x A);
- Peso: 50 g;

2.8.1.1 *Shield*

Uma definição para *Shield*, segundo o site oficial é "Os *shields* são placas que podem ser conectadas na parte superior do PCB² do Arduino, estendendo suas capacidades. Os diferentes *shields* seguem a mesma filosofia do kit de ferramentas original: são fáceis de montar e baratos de produzir."(ARDUINO, 2019b). O *Shield* utilizado neste trabalho, será de rádio FM, chamado TEA5767.

2.8.1.2 TEA5767

O Shield TEA5767 para arduino serve para a captação de radiofrequência na faixa de 88 a 108 MHz, que também é a faixa das estações de rádio no Brasil.

Abaixo, na Figura 10 temos a Placa TEA5767 com antena:

Essa placa é a principal fonte de coleta de dados para esse trabalho, coletando a potência e a frequência em conjunto, do que é captura em tempo real.

Ela trabalha fazendo a varredura do início ao fim da frequência setada.

Utiliza do protocolo I2C para fazer a comunicação entre Arduino de o computador.

2.8.1.2.1 Protocolo I2C

O modo de funcionamento do protocolo I2C é baseado na interação entre elementos seguindo a hierarquia mestre/escravo (MADEIRA, 2017).

A estrutura na qual o protocolo I2C atua é uma estrutura de barramento, que por sua vez, consiste em um arranjo em que todos os elementos encontram-se conectados a um ramal principal (MADEIRA, 2017).

² É abreviação de "Printed circuit board", em português, placa de circuito impresso (MORIMOTO, 2005).

Figura 10 – Shield TEA5767 com Antena conectada



Fonte: (PALHETA, 2017)

O barramento de comunicação I2C pode ser dividido em dois barramentos. Um deles é denominado SDA (Serial Data), o qual, é responsável pela troca de dados entre os dispositivos do arranjo e o outro barramento, denominado SCL (Serial Clock), possui a função de sincronizar os dispositivos e garantir a confiabilidade do sistema.

2.9 Software Arduino (IDE)

O serviço que envia dados para interface, é o próprio Arduino com um código escrito na própria Arduino IDE³ e injetado dentro da Placa que por sua vez opera interruptamente, desde que alimentada corretamente.

Esse fornecimento de dados por meio de consultas periódicas tem nome específico na programação, aqui adotaremos o mesmo nome para melhor entender a estrutura de funcionamento, chamamos de *backend*.

2.9.1 Backend

O conceito de *backend* no desenvolvimento de aplicações é utilizado para as ações que ficam geralmente em um servidor onde faz-se tratamento ou armazenamento de dados. Em outras palavras são ações que não tem interações diretas com o usuário (LAMIM, 2014).

O *backend* desenvolvido para este trabalho está em um projeto do Github⁴, um repositório de códigos online, podendo ser utilizado conforme for preciso.

³ *Integrated Development Environment* - Ambiente Integrado de Desenvolvimento, um editor de texto integrado com a linguagem.

⁴ <<https://github.com/rexrod/plot-spectrum>>

Este código utilizado junto a placa Arduino, utiliza uma biblioteca própria para o *Shield*, o *firmware*, e em conjunto, fornecem os dados necessários da aplicação.

2.9.2 Firmware

Também conhecidos pela nomenclatura “software embarcado”, os *Firmware* são um conjunto de instruções operacionais que são programadas diretamente no hardware de equipamentos eletrônicos (RIBEIRO, 2014).

Os códigos transcritos por este tipo de programa residente são fundamentais para iniciar e executar os hardwares e os seus recursos, fornecendo informações idênticas sempre que o dispositivo for ligado.

O *firmware* para este trabalho é o software que operará dentro da placa arduino fazendo a transformada de Fourier a partir da Biblioteca do TEA5767.

2.9.3 Comunicação

A comunicação do software IDE Arduino com a placa, dar-se pelo taxa de transmissão denominada de "baud rate", que neste trabalho tem por padrão "9600 bauds", taxa em segundos.

2.10 Software Electron (Interface Gráfica)

A interface do simulador é escrito em Electron⁵, uma tecnologia *Desktop* que gera interface e interações baseado em tecnologias Web feito com Node.js⁶, que é uma espécie de linguagem Web baseada em JavaScript⁷ voltada para serviços.

2.10.1 Frontend

Utiliza-se o conceito de *frontend* para toda aplicação que tem interação com o usuário (LAMIM, 2014).

Neste trabalho o *frontend* será a interface interativa do estudante, o simulador do analisador de espectro construído em Electron e chamado de **Plot Spectrum**.

2.10.2 Electron

A explicação do que se trata o Electron é melhor exemplificado pelo próprio site na citação abaixo:

⁵ <https://electronjs.org/>

⁶ <https://nodejs.org/en/>

⁷ <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Aprender/JavaScript>

“O Electron é uma biblioteca de código aberto desenvolvida pelo GitHub⁸ para criar aplicativos de área de trabalho de plataforma cruzada com HTML, CSS e JavaScript. O Electron faz isso combinando o Chromium e o Node.js em um único tempo de execução e os aplicativos podem ser empacotados para Mac, Windows e Linux.” (ELECTRON, 2014)

Em outras palavras, o Electron é a interface que faz a ponte do *frontend* para se comunicar com o sistema operacional e por sua vez se comunica com o *backend* feito em linguagens web.

2.10.3 HTML

A definição de HTML é melhor explicada por uma das especificações da Linguagem, citada abaixo:

“HTML é a linguagem de marcação principal da World Wide Web. Originalmente, o HTML foi projetado principalmente como uma linguagem para descrever semanticamente documentos científicos. Seu design geral, no entanto, permitiu que ele fosse adaptado, nos anos subsequentes, para descrever vários outros tipos de documentos e até mesmo aplicativos.” (HTML, 2019)

Esta linguagem é utilizada como padrão na Web e é suportada pelo Electron.

2.10.4 CSS

Cascading Style Sheets (CSS) é um mecanismo simples para adicionar estilo (fontes, cores, espaçamento) para documentos Web (RAGGETT, 2002).

O CSS trabalha em conjunto do HTML, onde o HTML estrutura o documento e o CSS estiliza-o. Com ele conseguiremos deixar o simulador do analisador de espectro mais parecido e amigável com um equipamento real.

2.10.5 Java Script

JavaScript é uma linguagem de programação que permite implementar funcionalidades mais complexas em páginas web. A cada momento uma página web faz mais do que apenas mostrar informações estáticas para você - elas mostram em tempo real conteúdos atualizados, ou mapas interativos, animações gráficas em 2D/3D, vídeos, etc., você pode apostar que o javascript provavelmente está envolvido (POMPEU, 2019).

As ações da interface com HTML e CSS só são possível graças a uma linguagem de programação que interaja com esses elementos, como é o caso do Javascript.

⁸ GitHub é uma plataforma de hospedagem de código-fonte com controle de versão usando o Git.

2.10.6 NodeJS

Como um tempo de execução JavaScript orientado a eventos assíncronos, o Node foi projetado para criar aplicativos de rede escalonáveis. No seguinte exemplo de "hello world", muitas conexões podem ser tratadas simultaneamente. Em cada conexão, o retorno de chamada é demitido, mas se não houver trabalho a ser feito, o Node irá dormir ([SENKPIE, 2015](#)).

O nodejs é uma linguagem de programação JavaScript versátil usada no frontend e backend onde produz integrações com o sistema operacional (Windows, Mac, Linux, etc).

2.10.7 Git

Segundo sua apresentação do site oficial o Git é um sistema de controle de versão distribuído de código aberto e gratuito, projetado para lidar com tudo, de projetos pequenos a grandes, com velocidade e eficiência ([TORVALDS, 2020](#)).

Em outras palavras, o Git congela os códigos da aplicação a cada alteração confirmada, isso faz-se necessário para a proteção do software pois quando altera-se coisas que podem quebrá-lo (deixa de funcionar), pode-se voltar ao ultimo estado de funcionamento, ou até mesmo recuperar partes do código que foram deletadas.

2.11 Sistema Operacional

Os sistemas operacionais são interfaces que permitem aos usuários interagir com o computador sem que seja necessário saber “falar a língua” dele ([DELFINO, 2019](#)).

Existem sistemas operacionais disponíveis para computadores pessoais, celulares, carros, TV's, entre outros.

Neste trabalho utilizaremos sistemas para computadores pessoais e entre eles estão Windows, Linux e Mac como os principais, sendo que o Linux nossa opção.

2.11.1 Linux

O Linux é um sistema Operacional para computadores pessoais e servidores de código aberto, que não tem que ter licença para usá-lo, muito utilizado na área do desenvolvimento de software.

O sistema como base nos teste é o Linux Ubuntu 20.04, mas o software é escrito de maneira genérica para atender todos os principais sistemas operacionais voltado para *desktop* (computadores pessoais).

3 Trabalhos Relacionados

A seguir são citados três trabalhos relacionados onde serão comparados, com as semelhanças e diferenças com este aqui desenvolvido, mais a frente nos [Resultados](#), após os [Experimentos](#).

O primeiro, nota-se semelhante, não específico para a análise da frequência, mas também voltado para a aprendizagem, é um dos artigos publicados em 2016 pelo COBENGE¹, consiste em aprimorar o ensino da teoria de Processamento Digital com uma interface amigável usando MATLAB no domínio do tempo e da frequência ([GUEDES; GÓES; SILVA, 2016](#)).

Nesse trabalho de 2016, foi desenvolvida três interfaces para consolidar, na prática, aulas teóricas da disciplina de Processamento de Sinais, onde o usuário pode acompanhar graficamente e escolher o tipo da análise (tempo ou frequência) do sinal em questão. É utilizado o GUIDE² do MATLAB para desenvolver as interfaces de interação com o usuário setando parâmetros para a compreensão de assuntos como amostragem, transformada de Fourier, filtros e janelamento.

Todos os temas envolvem setagem de parâmetros para o estudo do comportamento após as modificações, o foco da primeira interface está na compreensão da amostragem. Já a segunda interface foca no janelamento. Enquanto a última está voltada para o estudo de dos filtros.

O segundo trabalho do COBENGE, de 2018, parecido com o anterior apresentado (de 2016), facilitando também a compreensão de disciplinas difíceis para curso de engenharia, é sobre o desenvolvimento de ferramenta que possibilita o estudo de modulações utilizando também o MATLAB ([FRANCHI et al., 2018](#)).

A didática, deste artigo de 2018, consiste em aplicar conceitos como sinal modulante, portadora e sinal modulado de forma visual. É possível configurar os parâmetros e as fórmulas do sinal desejado. Cada sinal fica em gráficos separados na interface. Além disso há um relatório que explica com mais detalhes que ocorrem na tela.

E por último, temos o terceiro, e mais atual, trabalho, de 2019, é também do COBENGE, sobre um "projeto multidisciplinar de um analisador de espectro com banco de filtros e subamostragem" ([MELO et al., 2019](#)), como diz no próprio nome do título, utiliza-se de recursos de um analisador para difundir conhecimento em várias matérias que utilizem este equipamento no curso de engenharia eletrônica. É utilizado também conversores A/D (analógico para digital) de baixo custo em paralelo. Além disso possui

¹ Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia

² Graphical User Interface Design Environment

filtros, simulações e altas taxas de amostragem com melhorias na captura. Para prover todos esses recursos, as simulações são feitas no MATLAB.

Os Procedimentos de decomposição e recomposição do sinal, onde é apresentado 7 blocos (etapas) de filtros. Na amostra apresentada são coletados 20 canais analógicos de faixas diferentes onde comprimem para um único canal e recompõe os 20 canais após passarem pelo sistema somador transformando-os em onda digital (quadrada).

4 Metodologia

O trabalho de pesquisa compreende um estudo de caso, do software simulador desenvolvido, nomeado de Plot Spectrum, analisado no laboratório de medições do Instituto Federal do Amazonas (IFAM) - unidade Campus Manaus Distrito Industrial (CMDI), curso de telecomunicações, onde utiliza-se o instrumento Osciloscópio Tektronix MDO3014 (100MHz/ 2.5G/s) com função de Analisador de Espectro o qual será usado como equipamento modelo para comparação.

O método utilizado para alcançar os resultados consiste em três etapas. A primeira: foi o levantamento bibliográfico nos [Referenciais Teóricos](#) (capítulo 2), onde foram estudados os princípios ondas eletromagnéticas, alguns conceitos elétricos, de modulação, sobre o analisador de espectro e tecnologias usadas para o desenvolvimento do simulador.

Na segunda etapa, é desenvolvido o simulador onde elaborou-se uma interface bastante similar a de um analisador de espectro, implementando-se o *software* com tecnologias *WEB* integrando-o com o *hardware* em Arduino e a *shield* TEA5767 até a satisfação das funcionalidades básicas.

E por terceiro, foi realizado os experimentos com o analisador de espectro e o simulador, onde é detalhado todos os passos necessários para obtenção dos dados para a comparação entre os dois equipamentos emitindo um parecer sobre o uso do mesmo como ferramenta auxiliar educacional.

5 Experimentos

Nesta epata é mostrado os componentes necessários para montar o simulador, os preparativos para fazer o simulador e o analisador de espectro funcionarem, coleta de dados dos dois equipamentos após o funcionamento, análise dos dados obtidos e, a comparação das funcionalidades do analisador e simulador conforme o item 2.7 dos Referenciais Teóricos.

Para a simulação ter dados mais estáveis na recepção dos dois equipamentos em teste, é transmitido um sinal na frequência de **89,1 MHz** a partir de um Gerador de Sinais (Tektronix AFG3101). Essa frequência foi escolhida de forma analítica para não interferir em outras frequências de rádio já existente e próximas do local testado.

No gerador, inicialmente, é emitido uma tensão de $200mV_{pp}$, passando para $300mV_{pp}$ e, por último, $500mV_{pp}$ onde a impedância de todas tensões é de 50Ω (ohms). Aplicando nas equações 2.5, 2.6 e 2.7, obtemos o seguinte Quadro 1:

Quadro 1 – Valores de saída do Gerador em dBm para as tensões pico a pico.

mV_{pp} (Volts)	mV_p (Volts)	V_{RMS} (Volts)	P_m (Watts)	Saída (dBm)
200	100	$7,07 \times 10^{-2}$	1×10^{-4}	-10
300	150	$1,06 \times 10^{-1}$	$2,247 \times 10^{-4}$	-6,48
500	250	$1,76 \times 10^{-1}$	6.25×10^{-4}	-2.04

Fonte – (PALHETA, 2020b)

Essas três aferições dão valores suficientes para a comparação simulador em relação ao analisador de espectro, que é o equipamento de referência, assim como pode-se obter a potência relativa de um para o outro validando sua precisão.

5.1 Componentes

A lista de componentes usados neste projeto consiste em:

- 1 Placa Arduino Uno
- 1 Shield TEA5767
- 1 cabo usb/speed
- 1 computador pessoal (Notebook Ideapad 320)
- 1 Osciloscópio com função de analizador (Tektronix MDO 3014)
- 1 Gerador de Sinais (Tektronix AFG 3101)

- 2 antenas com entrada de 50 ohms com conector N fêmea

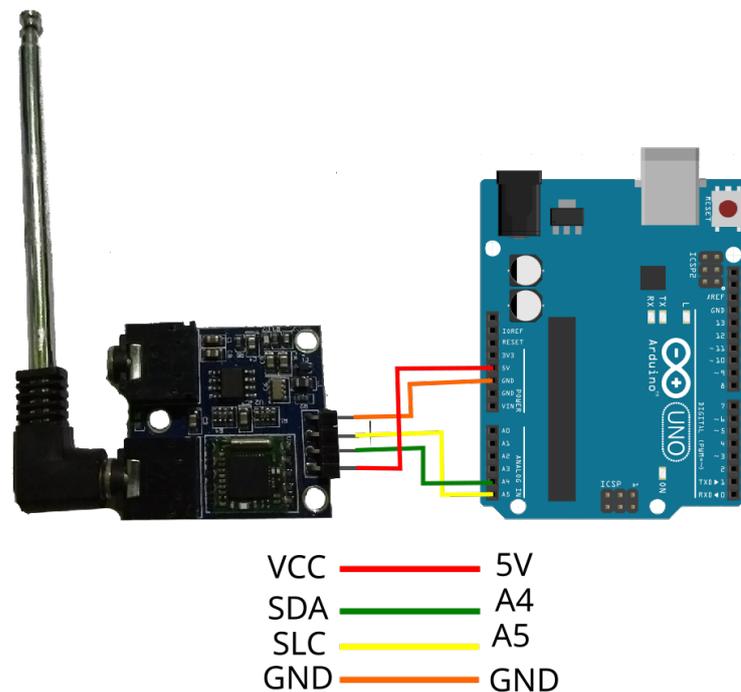
5.2 Preparativos

Para deixar este trabalho em perfeito funcionamento, é necessário dois preparativos: um, que consiste no passo a passo da montagem do simulador e o outro é a setagem das configurações corretas do Analisador de Espectro divididos nas seções abaixo.

5.2.1 Simulador Plot Spectrum

Nesta seção é feito o passo a passo da montagem do simulador até o seu funcionamento na frequência suportada de 87,5 a 108 MHz. Podemos ver o esquema da montagem do circuito na Figura 11.

Figura 11 – Montagem do Arduino com a Shield TEA5767.



Fonte: (PALHETA, 2020c)

O esquema da Figura 11 será conectado a um computador comum, um notebook com o Sistema Operacional Linux no caso, através do cabo USB, resultando no esquema que ver na Figura 12.

Após o circuito montado, os procedimentos restantes devem ser através do computador. Primeiro, instale a ferramenta Git, tem para todos os sistemas operacionais, para

Figura 12 – Montagem do completa do circuito do Simulador com um computador, cabo USB/Speed e Arduino com a Shield TEA5767.



Fonte: (PALHETA, 2020d)

fazer isso no Linux aqui adotado, faça o seguinte comando em um terminal ¹:

```
sudo apt install git
```

Após isso, entre na pasta dos projetos (uma pasta pessoal qualquer) e abra um terminal dentro desta pasta. Baixe o código do GitHub ² com o comando:

```
git clone https://github.com/rexrod/plot-spectrum
```

Deverá aparecer algo semelhante a Figura 13.

Agora deve-se atualizar o software para o funcionamento correto do Arduino. Para realizar esse procedimento, primeiro coloque a pasta "TEA5767" que está dentro da pasta "Arduino" no projeto, dentro da pasta "Arduino" que fica no diretório "home/usuário". Abre-se a IDE do Arduino ³ (v1.8.12), abre-se o código que está na pasta "arduino" do código baixado com o nome de "fm.ino".

Agora já temos o necessário para atualizar o software na placa Arduino, continuando na Interface de Desenvolvimento do Arduino, também em "Ferramentas", selecione a porta

¹ Interpretador de comandos *Shell* amplamente utilizado em sistemas operacionais Linux e Mac.

² Plataforma de repositórios de códigos online baseada em Git

³ Este software pode ser encontrado aqui: <https://www.arduino.cc/>

Figura 13 – Clonagem do projeto Plot Spectrum do GitHub.

```
harry@harry-PC:~/projects$ git clone https://github.com/rexrod/plot-spectrum
Cloning into 'plot-spectrum'...
remote: Enumerating objects: 44, done.
remote: Counting objects: 100% (44/44), done.
remote: Compressing objects: 100% (31/31), done.
remote: Total 138 (delta 23), reused 28 (delta 13), pack-reused 94
Receiving objects: 100% (138/138), 78.31 KiB | 94.00 KiB/s, done.
Resolving deltas: 100% (66/66), done.
```

Fonte: (PALHETA, 2020e)

de comunicação, aqui no caso será a porta `"/dev/ttyACM0"`⁴ devido ao Sistema Operacional utilizado. Então aperte em "Carregar" para o código criado operar dentro do Arduino.

Após "carregar", deve-se rodar o simulador dentro da pasta do código baixado. Instale todas as dependências do Software com o comando:

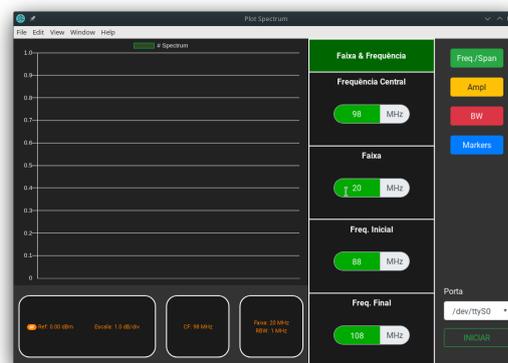
```
npm install
```

Após finalizar, inicie a aplicação executando:

```
npm start
```

Na tela Inicial, deve aparecer a seguinte janela, Figura 14.

Figura 14 – Tela Inicial do Simulador de Analisador de Espectro.

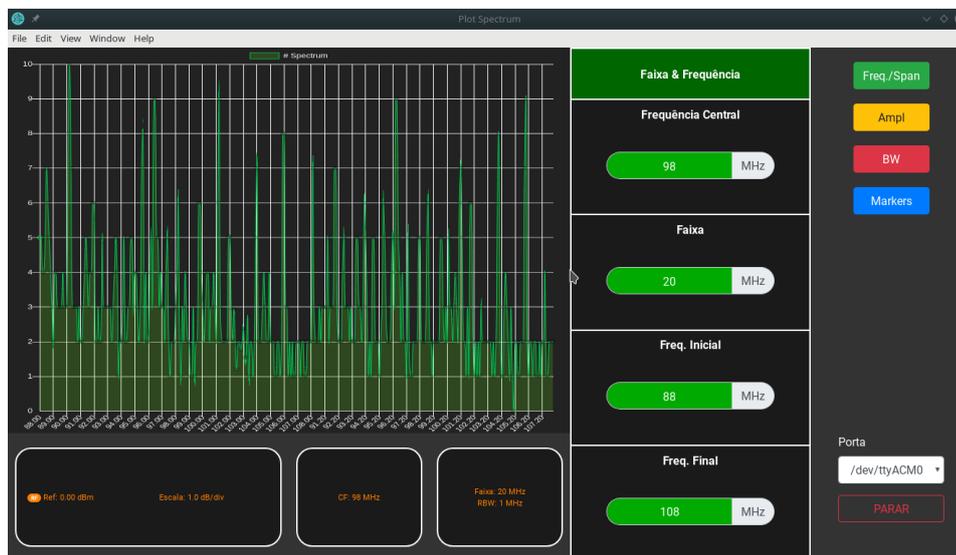


Fonte: (PALHETA, 2020f)

⁴ Neste ponto deve-se aplicar permissão de leitura e escrita ao dispositivo ou adicionar o usuário ao grupo de comunicação (dialout). Leia o manual do Arduino encontrado aqui: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Linux>.

O tempo de carregamento deve levar em torno de 15 a 20 segundos após apertar o botão "INICIAR", se a porta de comunicação estiver corretamente selecionada e configurada, aparecerá a os gráficos plotados em tela como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Plot Spectrum após o carregamento das frequências.



Fonte: (PALHETA, 2020g)

Ao iniciar o software Plot Spectrum, automaticamente é setada a frequência de 87,5 à 108 MHz, logo, neste ponto, já temos todos os preparativos para a configuração do Analisador de Espectro e posteriormente obter dados para a comparação.

5.2.2 Analisador de Espectro

A preparação do Osciloscópio MDO3014 com função de Analisador de Espectro, já mostrado na figura 7, inicia-se conectando o cabo de alimentação, Figura 16, ao equipamento e na fonte de alimentação.

Após isso, é ligado o equipamento no botão “POWER” no canto inferior esquerdo.

Aperta-se no botão “RF” ao centro direito para entrar nas funções de Frequência de Rádio.

É setada a faixa de 87.5 a 108 MHz apertando em “Freq/Span” no valor “Iniciar” é setado o 87.5 MHz e no valor “Parar” é setado o 108 MHz, obtém-se a seguinte imagem captando o sinal com uma antena com a impedância de 50 ohms (Figura 17).

A largura de banda, botão “BW”, é setado modo RBW para “Automático”, assim o próprio equipamento atribui o melhor valor para a captura das frequências.

Figura 16 – Cabo de alimentação do Tektronix MDO3014.



Fonte: (PALHETA, 2020h)

Figura 17 – Antena de 50 ohms.



Fonte: (PALHETA, 2020i)

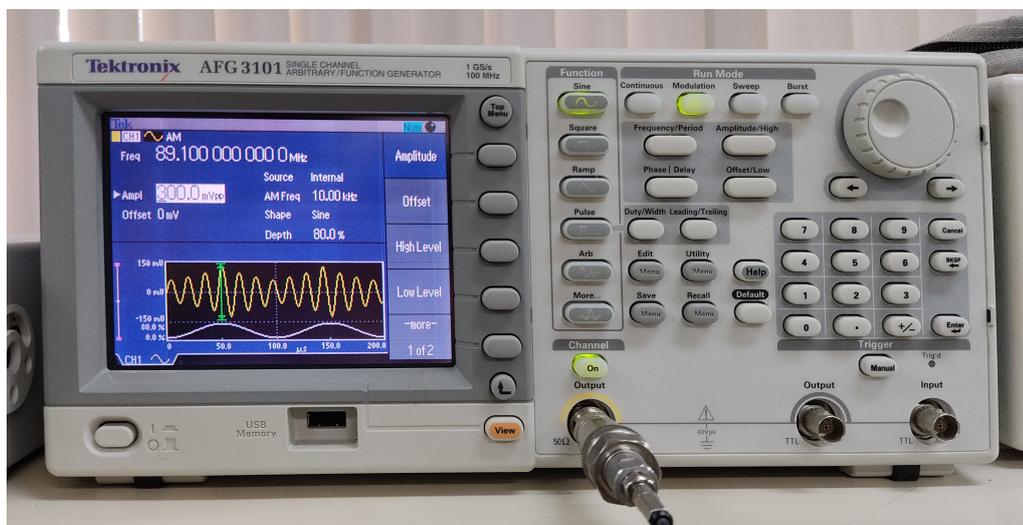
5.2.3 Gerador de Sinais

O gerador de sinais Tektronix AFG 3101 (Figura 18), após está conectado no cabo de alimentação, é ligado no botão do canto inferior esquerdo.

Logo após, conecta-se uma antena de 50 ohms na saída do gerador. A saída por sua vez também é 50 ohms, havendo assim o casamento de impedância, citado no capítulo 2.5.

Para o primeiro teste, na tela do AGF 3101, é setada a amplitude indo em “Am-

Figura 18 – Gerador de Sinais Tektronix AFG 3101.



Fonte: (PALHETA, 2020j)

plitude/Level Menu”, depois “Amplitude”, no teclado numérico é digitado o valor "200" e concluído apertando em “mVpp”.

Para o segundo e terceiro teste, é repetido os passos da setagem anterior, só alterando o valor para 300 e 500 mVpp respectivamente conforme o Quadro 1.

Todos testes serão na mesma frequência, setadas na tela inicial do gerador de sinais, em “Frequency/Period/Phase Menu”, indo em “Frequency” e digitando “89.1”, finalizando ao apertar o “MHz”.

Para transmitir o sinal, deve ser apertado o botão “ON” no canal de saída. Mas essa ação é feita após a primeira coleta de dados.

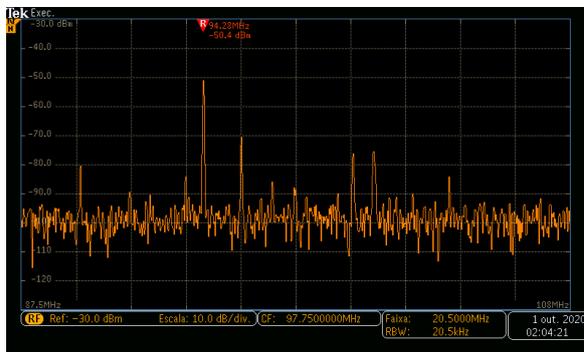
5.3 Coleta de Dados

A primeira coleta dos dados consiste na captura de tela na faixa de 87,5 a 108 MHz de ambos equipamentos analisados, do simulador e do analisador de espectro. Isso nos gera as seguintes Figura 19.

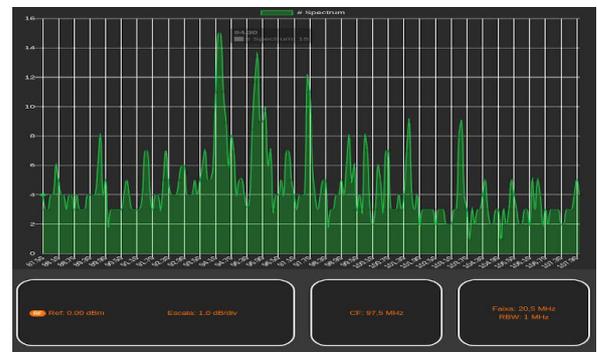
Igualando-se os testes, devido a limitação do simulador, as próximas coleta, são na faixa de frequência criada pelo gerador de sinais, 89,1 MHz, que é a frequência central, onde na "Faixa" de ambos os equipamentos é setado 1 MHz para a comparação.

São três coletas registrados no Quadro 1, sendo assim, para 200 mVpp, 300 mVpp e 500 mVpp, o qual resulta nas seguintes Figuras 20, 21 e 22.

Figura 19 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 87,5 a 108 MHz.



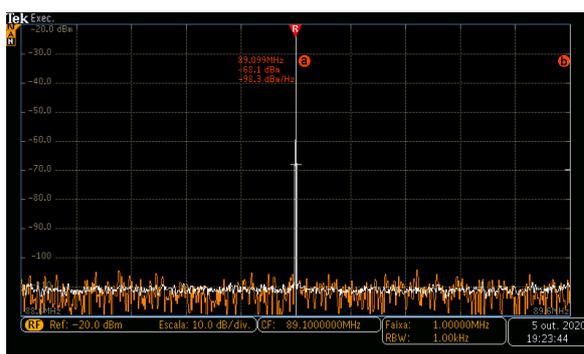
(a) Visualização no domínio da frequência do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 na faixa de 87,5 a 108 MHz.



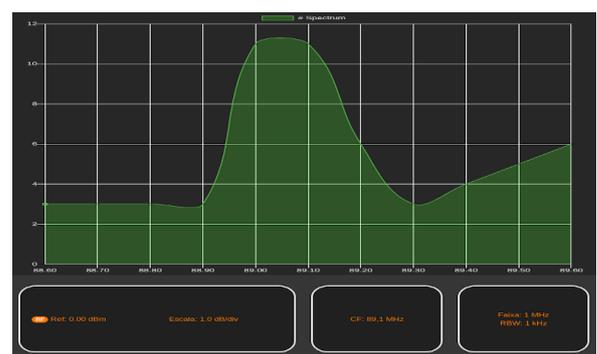
(b) Visualização no domínio da frequência do Simulador Plot Spectrum na faixa de 87,5 a 108 MHz.

Fonte: (PALHETA, 2020k)

Figura 20 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 200 mVpp do Gerador.



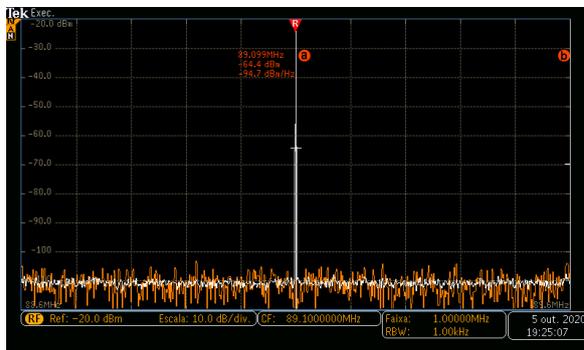
(a) Visualização no domínio da frequência do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 na faixa de 89,1 MHz.



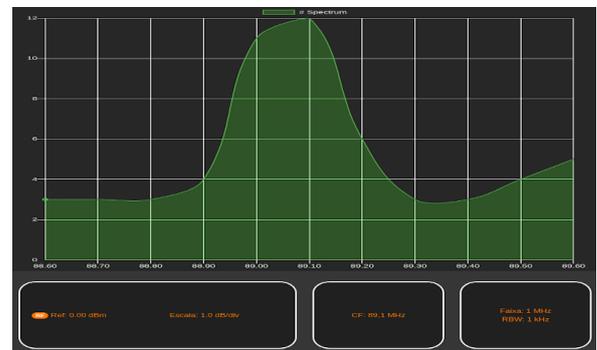
(b) Visualização no domínio da frequência do Simulador Spectrum na faixa de 89,1 MHz.

Fonte: (PALHETA, 2020l)

Figura 21 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 300 mVpp do Gerador.



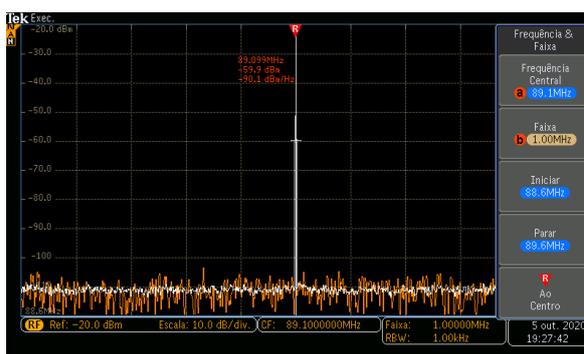
(a) Visualização no domínio da frequência do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 na faixa de 89,1 MHz.



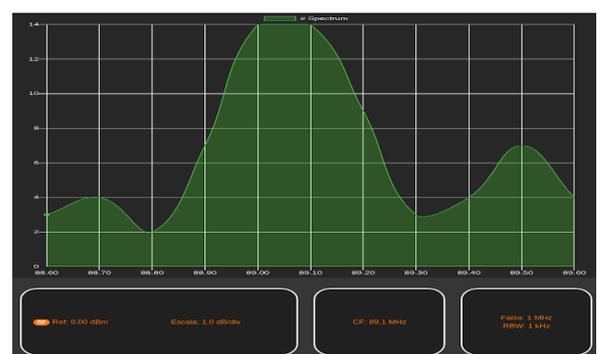
(b) Visualização no domínio da frequência do Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz.

Fonte: (PALHETA, 2020m)

Figura 22 – Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 500 mVpp do Gerador.



(a) Visualização no domínio da frequência do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 na faixa de 89,1 MHz.



(b) Visualização no domínio da frequência do Simulador Spectrum na faixa de 89,1 MHz.

Fonte: (PALHETA, 2020n)

6 Resultados

Nesta seção é interpretado os dados coletados através das Figuras 19 20, 21 e 22 para a análise dos resultados. Ao final é comparado com os [Trabalhos Relacionados](#) (seção 3).

Analisando a Figura 19, vemos muita semelhança nos gráficos, tanto na figura 19a quanto na figura 19b, onde há seis frequências em destaques em relação a potência das demais, são as seguintes estações de rádio¹: **89,7 MHz** (Rádio Tiradentes FM), **94,3 MHz** (FM do Povo), **95,1 MHz** (Nativa FM), **97,5 MHz** (Rádio Diário), **101,5 MHz** (Rádio CBN Amazônia) e **103,5 MHz** (Rádio Rio Mar), sendo a 94,3 MHz com maior potência com **-50.4 dBm** no Analisador de Espectro e **14 dBm** no Simulador.

Interpretando os dados obtidos na frequência **89,1 MHz**, temos as Figuras 20, 21 e 22, mas para uma análise melhor dos valores em dBm, foi gerada a seguinte Quadro 2:

Quadro 2 – Valores captados na frequência de 89,1 MHz para diferentes tensões pico a pico captados via antena.

mV_{pp} (Volts)	Saída (dBm)	Ent. Analisador (dBm)	Ent. Simulador (dBm)
200	-10	-68,1	11
300	-6,48	-64,4	12
500	-2,04	-59,9	14

Fonte – (PALHETA, 2020o)

Com esse quadro acima, é interessante observar a diferença da potência de uma tensão pico a pico para outra em relação a saída no gerador, é o que chamamos de **potência relativa**, ou seja, a diferença que der na saída do gerador, deve ser a mesma diferença, ou bem próxima, captada pela antena do Analisador e do Simulador. Assim é elaborado um novo quadro para melhor comparar tais potências, disposto no Quadro 3:

Quadro 3 – Valores relativos de potência de uma tensão para outra.

mV_{pp} (Volts)	Saída (dBm)	Ent. Analisador (dBm)	Ent. Simulador (dBm)
200-300	-3,52	-3,7	-1
300-500	-4,44	-4,5	-2

Fonte – (PALHETA, 2020p)

¹ Todas as estações de Manaus podem ser consultadas no seguinte link: <http://worldradiomap.com/br/manaus>

6.1 Comparação das funcionalidades

A comparação das funcionalidades, como dito anteriormente nos Referências Teóricas (2.7) é através das principais funções que engloba os conceitos de um analisador de espectro, onde dar-se por: FFT, SPAN, frequência central, nível de referência, escala, RBW, Marcadores.

6.1.1 FFT

A validação do algoritmo FFT aplicado em ambos equipamentos analisados, consiste na forma que o gráfico se dispõe em tela através da frequência e potência. No trecho de código abaixo é mostrado como esses dados são enviado para o simulador interpretar:

```
void loop () {  
  ...  
  if (Radio.read_status(buf) == 1) {  
  
    current_freq = floor (Radio.frequency_available (buf) / 100000) / 10;  
    stereo = Radio.stereo(buf);  
    signal_level = Radio.signal_level(buf);  
  
    Serial.println(current_freq + ";" + signal_level);  
  
  }  
  ...  
}
```

Explicando o trecho acima, ao final de cada processamento é enviado dados da “frequência atual” e da “potência atual” no momento que é coletada separada por “;”, onde será interpretada pela aplicação. Esses dados são diretamente armazenado em memória pelo Plot Spectrum, pois o Arduino não tem memória suficiente para enviar toda a faixa coletada. Após isso é adicionada a próxima frequência a ser analisada, indo até a frequência final e zerando-a após o envio, assim começando todo o ciclo de coleta.

O nível da potência que é coletada possui um limite de 0 a 15 dB devido à *Shield* TEA5767 e a implementação das biblioteca “Wire” e “TEA5767” escritas na linguagem C.

Após toda a coleta da faixa de frequência de inicial a final na aplicação, o Plot Spectrum “desenha” todas as informações em forma de gráficos, chegando ao resultado final apresentado acima na Figura 15.

Já o Analisador de Espectro tem um comportamento diferente na varredura, ele capta todos os dados de uma vez e “desenha” na tela dependendo da resolução adotada, nos teste foi setado uma resolução automática.

6.1.2 SPAN

O SPAN mostra faz a amostra visual de uma largura de banda já coletada, define o que será mostrado nas frequências de início e fim sem depender diretamente dos dados coletados na largura de banda. Em outras palavras, compreende toda área do gráfico tanto no Analisador de Espectro quanto no Simulador.

A maior diferença entre os dois é que no simulador é feito de forma automática, podendo ser modificado somente via código até a implementação dessa funcionalidade, e no Analisador pode ser setada manualmente e de forma automática.

A forma automática dos dois equipamentos dependem diretamente da frequência central e da largura de banda, sendo assim, não interfere na forma de visualizar dos dados na tela.

6.1.3 Frequência Central

A frequência central é exatamente o meio da faixa que está sendo coletado os dados. A Figura abaixo mostra todos os pontos que esta frequência pode ser identificada no Plot Spectrum:

No Analisador de Espectro também temos esses indicadores em tela como mostra a Figura 24:

6.1.4 Nível de Referência

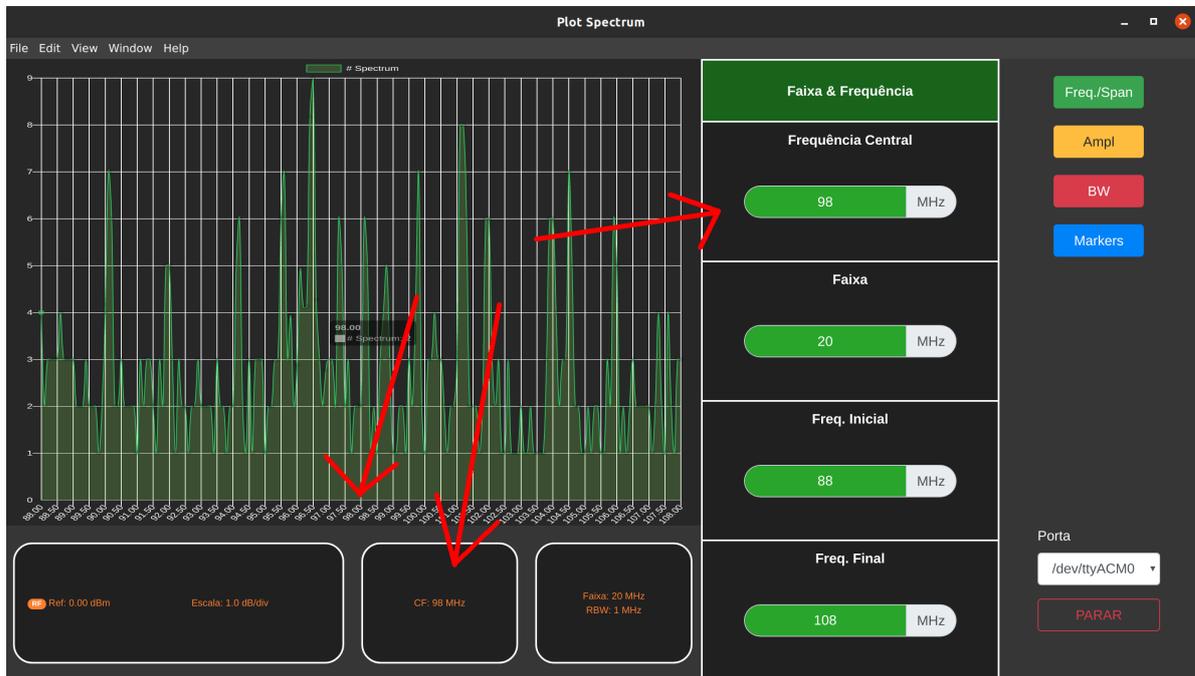
O nível de referência é 0 dBm para o simulador Plot Spectrum devido a limitação da placa TEA5767 e a forma que o *driver* foi escrito.

O limite do analisador do espectro depende muito da antena utilizada e potência transmitida, mas como da saída do gerador até a captura do sinal pela antena sempre tem perda é normal trabalhar com valores negativos, sendo valores legíveis de 5 MHz to 2 GHz de até -138 dBm/Hz, segundo o manual do fabricante.

6.1.5 Escala

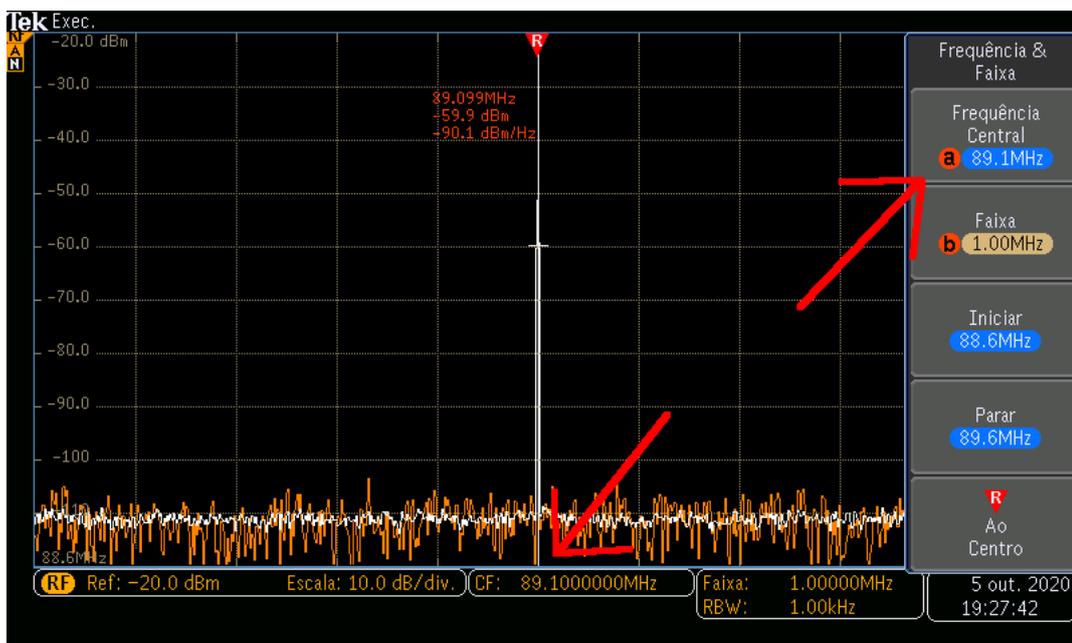
A escala dos gráficos do simulador é dinâmica, mostra de acordo com a setagem do SPAN se adaptando a tela. Em contra partida, do analisador de espectro é estática e pode ser setada de acordo com o que o usuário definir.

Figura 23 – Captura de Tela do Gráfico do Plot Spectrum representado todos os pontos de identificação da Frequência Central.



Fonte: (PALHETA, 2020q)

Figura 24 – Identificação da Frequência Central no Analisador de Espectro.



Fonte: (PALHETA, 2020r)

6.1.6 RBW

O RBW utilizado pelo simulador é de 15 KHz, limitação da placa TEA5767, mas para varredura não demorar tanto é colocado 100 KHz por padrão, podendo ser alterado via código. No analisador de espectro pode ser setado até 1 KHz de acordo com o manual.

Nesta análise, o analisador recebeu uma resolução automática, pois resoluções manuais afetam seu desempenho.

6.1.7 Marcadores

A funcionalidade dos marcadores no simulador é através do *mouse*, onde basta passá-lo por cima do ponto que deseja ser analisado. No analisador de espectro é feito de maneira diferente, onde pode-se marcar o ponto “a” e “b” para visualizar melhor a frequência e a potência em dBm.

6.2 Comparação com os Trabalhos Relacionados

Em comparação a primeira fonte citada, este trabalho acadêmico tem intuito de apresentar um simulador de um analisador de espectro como alternativa viável para aprendizagem e não tem como objetivo usar uma ferramenta já existente para o desenvolvimento de interfaces, pelo contrário, é desenvolvimento com linguagem WEB, teoricamente fácil de trabalhar, onde o código fonte é aberto, ou seja, qualquer um pode ajudar a distribuir, copiar e modificar.

Outro ponto comparativo é que apesar de trabalhar de forma indireta com a Transformada de Fourier, este trabalho não tem interesse na precisão dos dados comparados, mas sim na facilitação do manuseio de um equipamento de difícil acesso.

Comparando a segunda fonte, este trabalho tem frequências específicas de rádio FM, onde não inclina para modulações de sinais. Frequências estas escolhidas pela sua grande difusão aérea, a qual pode ser capturada em qualquer momento, permitindo trabalhar com dados reais com facilidade. Além disso, não direciona apenas em modulação, sinal modulante e portadora, mas em faixas de frequências capturadas por um módulo Arduino.

A diferença deste trabalho para a terceira fonte é que apesar de utilizarem o MATLAB, o trabalho de 2019 não tem interface interativa e não disponibilizam o código para ser acessível a outros, dificultando a implementação.

Neste trabalho não é utilizado conversores A/D de forma direta como no trabalho do COBENGE de 2019, pois a ideia é facilitar o funcionamento do equipamento e não saber como construí-lo, mas como proposta trás a conversão já adaptada por meio do Arduino e a placa de rádio FM (*shield*).

7 Conclusões

Em resumo, apesar todos os [Trabalhos Relacionados](#) trabalharem com frequências, possuem propostas semelhantes para facilitar disciplinas difíceis, mas como principal diferencial é que este trabalho elaborou um ferramenta do zero que está disponível em uma plataforma de versionamento de online, onde qualquer pessoa com acesso a internet pode ter acesso ao código fonte.

A vantagem de ter acesso ao código fonte é pode ser estudando, modificado ou distribuído como bem entender respeitando a licença de código aberto utilizada. Nos três trabalhos apresentados não tem nenhum código amostrado ou armazenado para utilização posteriores dificultando a continuidade dos mesmos.

Um outro diferencial também é utilizar hardwares prontos e de fácil acesso e baixo custo (Arduino e *shield* TEA5767). Além disso, simula um analisador de espectro com dados reais, onde pode ser explorado todos os conceitos das disciplinas que utilizam este equipamento, em especial a disciplina de Micro-ondas do curso de Telecomunicações.

Com base nos experimentos realizados, pode-se concluir que, em relação a faixa total de 87,5 à 108 MHz, os dois equipamentos apresentam gráficos bastante semelhantes e na frequência correta.

Ainda na faixa total, a potência tem diferenças onde o analisador trabalha em potência de 0 (zero) a -138 dBm e o simulador trabalha de 0 a +15 dBm (potência invertida) dificultando a comparação entre os dois.

A visualização das frequências em faixas pequena acabam afetando a plotagem do gráfico tornando-a mais difícil para comparação com o analisador de espectro. Um dos efeitos que ocasionam isso é uma resolução muito alta e a suavização das linhas do gráfico através da biblioteca Chart.js, mas ambos efeitos podem ser ajustado via programação.

Em relação a abstração das potências relativas apresentadas no Quadro 3, podemos concluir que o analisador chega a valores bem próximos em relação ao de saída do gerador de sinais, enquanto o simulador fica com valores distantes não permitindo compará-los com o analisador.

Nas comparações funcionalidades do equipamento, vemos que se comporta de maneira bem similar ao analisador de espectro sendo que no FFT, o simulador tem um *delay* maior devido ao seu sistema de varredura, enquanto o Analisador captura todas as frequências ao mesmo tempo.

No SPAN, Frequência Central, Nível de Referência, escala, RBW vimos que há bastante semelhança com alterações que não interferem no aprendizado de tais conceitos.

Os marcadores são dinâmicas diferentes, mas, ainda assim, funciona bem tanto no analisador quanto no simulador permitindo fazer a leitura de frequência e potência que é seu principal objetivo.

Com todos esses pontos abordados, podemos concluir que Simulador Plot Spectrum, embora tenha muitas limitações, é focado principalmente nas funcionalidades básicas de um Analisador de Espectro real, sendo uma alternativa viável para o que propõe-se, contendo um potencial para o incentivar o desenvolvimento de software e melhorias futuras para esta aplicação, e que pode, sim, ser usado para fins didáticos.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como o simulador faz uma varredura na hora de coletar as frequências e potências, tem um atraso na coleta, para diminuir o tempo pode-se fazer uma integração com a Resolução da Largura de Banda, setada diretamente no código do Arduino, através do Plot Spectrum.

O código do simulador no Arduino suporta somente a *shield* TEA5767, na faixa de FM de rádio de 76 MHz à 108 MHz, mas pode ser implementado para suportar outras *shields* em outras faixas de frequências que comuniquem-se sem fio como *bluetooth* e *Wifi*.

O simulador armazena apenas as potências e frequências da varredura atual, mas por ter sido feito em tecnologias WEBS, pode ser integrado a um Banco de Dados para manter o histórico de todos dados envolvidos, inclusive a hora que foi coletado.

Embora os marcadores funcionem bem com dinâmicas diferentes, o ideal é que o simulador tenha as funcionalidades exatamente como do analisador de espectro, podendo ser implementada uma funcionalidade bastante similar ou igual a do Analisador.

Por ultimo, pode ser criado uma interação com usuário criando opções de visualização de diferentes tipos de curvas no gráfico permitindo assim uma melhor abordagem do que analisa-se.

Referências

- ARDUINO. *Introdução ao Arduino*. 2019. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 12 de fev de 2019. Citado na página 31.
- ARDUINO. *Shields*. 2019. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoShields>>. Acesso em: 14 de fev de 2019. Citado na página 33.
- ARTS, A. *Test & Measurement Questions*. 2019. Disponível em: <<http://www.analogarts.com/learning-center/test-measurement-faq/17-faq-list/194-what-is-spectrum-analyzer-span>>. Acesso em: 21 de out de 2019. Citado na página 29.
- BRITO, S. H. B. *Como o Sinal Wi-Fi é Propagado na Natureza?* 2019. Disponível em: <<https://medium.com/ubntbr/como-o-sinal-wifi-é-propagado-na-natureza-d87daef39575>>. Acesso em: 21 de out de 2019. Citado na página 22.
- CIRCUITO, C. *Arduino Uno R3 + Cabo USB*. 2018. Disponível em: <<https://www.curtocircuito.com.br/arduino-uno-r3-com-cabo-usb.html>>. Acesso em: 23 de out de 2019. Citado na página 32.
- DELFINO, P. *SISTEMAS OPERACIONAIS – CONHEÇA OS MELHORES DO MERCADO E TENHA OUTRAS OPÇÕES*. 2019. Disponível em: <<https://e-tinet.com/linux/sistemas-operacionais-os-melhores/>>. Acesso em: 30 de out de 2019. Citado na página 37.
- ELECTRON. *Sobre o Electron*. 2014. Disponível em: <<https://electronjs.org/docs/tutorial/about>>. Acesso em: 23 de out de 2019. Citado na página 36.
- ELETRÔNICOS, A. S. *O que é a Tensão de Pico a Pico?* 2020. Disponível em: <<http://www.learningaboutelectronics.com/Artigos/Tensao-de-pico-a-pico.php>>. Acesso em: 30 de set de 2020. Citado na página 24.
- FERRER, V. *Analizador de espectro*. 2019. Disponível em: <<https://vicentferrer.com/analizador-de-espectro>>. Acesso em: 21 de out de 2019. Citado na página 28.
- FRANCHI, T. P. et al. Desenvolvimento de uma ferramenta computacional acadêmica para estudo da modulação am-dsb/sc. *COBENGE*, 2018. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/>>. Acesso em: 6 de set de 2018. Citado na página 38.
- GOR'KOV, Y. *Sinusoid*. 2014. Disponível em: <<https://encyclopediaofmath.org/wiki/Sinusoid>>. Acesso em: 30 de set de 2020. Citado na página 21.
- GUEDES, D. L.; GÓES, D. B. R.; SILVA, O. F. Desenvolvimento de interface gráfica em matlab para aprimorar o ensino na disciplina de processamento digital de sinais. *COBENGE*, 2016. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/>>. Acesso em: 30 de set de 2016. Citado na página 38.

- HTML. *HTML*. 2019. Disponível em: <<https://html.spec.whatwg.org/multipage/introduction.html#background>>. Acesso em: 23 de out de 2019. Citado na página 36.
- INFORMAÇÃO, V. T. da. *Eletrodinâmica*. 2020. Disponível em: <<https://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrodinamica/corrente.php>>. Acesso em: 29 de set de 2020. Citado na página 24.
- JÚNIOR, J. S. D. S. *O que é frequência e período?* 2019. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-frequencia-e-periodo.htm>>. Acesso em: 16 de jul de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- JÚNIOR, J. S. D. S. *Primeira lei de Ohm*. 2020. Disponível em: <<https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/lei-ohm.htm>>. Acesso em: 29 de set de 2020. Citado na página 24.
- LAMIM, J. *Afinal, o que é Frontend e o que é Backend?* 2014. Disponível em: <<https://www.oficinadanet.com.br/post/13541-afinal-o-que-e-frontend-e-o-que-e-backend->>. Acesso em: 23 de out de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.
- MADEIRA, D. *Protocolo I2C – Comunicação entre Arduinos*. 2017. Disponível em: <<https://portal.vidadesilicio.com.br/i2c-comunicacao-entre-arduinos/>>. Acesso em: 23 de out de 2019. Citado na página 33.
- MARIA, U. F. de S. *Grandezas Elétricas*. 2020. Disponível em: <<https://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/eletricidadebasica.pdf>>. Acesso em: 29 de set de 2020. Citado na página 23.
- MELO, P. H. B. de et al. Projeto multidisciplinar de um analisador de espectro com bancos de filtros e subamostragem. *COBENGE*, 2019. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/>>. Acesso em: 17 de set de 2019. Citado na página 38.
- MONQUEIRO, J. C. B. *Redes wireless: Calculando a potência de transmissão e de recepção*. 2011. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/tutoriais/calculando-potencia-wireless/>>. Acesso em: 15 de jul de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- MOREIRA, A. J. C. *Técnicas de modulação*. 1999. Disponível em: <<http://www3.dsi.uminho.pt/adriano/Teaching/Comum/TecModul.html>>. Acesso em: 22 de ago de 2019. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- MORIMOTO, C. E. *PCB*. 2005. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/termos/pcb>>. Acesso em: 18 de fev de 2019. Citado na página 33.
- NAKASHIMA, K. *Valor Médio E Eficaz*. 2013. Disponível em: <<http://professor.ufabc.edu.br/~jose.azcue/Circuitos%20Eletricos%201/rms.pdf>>. Acesso em: 01 de out de 2020. Citado na página 25.
- PALHETA, H. B. *Meu Analisador de Espectro*. 2017. Disponível em: <https://meuanalisadordeespectro.blogspot.com/2017/07/parte-5-funcionamento-do-projeto_5.html>. Acesso em: 25 de out de 2019. Citado na página 34.
- PALHETA, H. B. *Osciloscópio*. 2020a. Acesso em: 30 de set de 2020. Citado na página 29.

- PALHETA, H. B. *Valores de saída do Gerador em dBm para as tensões pico a pico*. 2020b. Acesso em: 7 de out de 2020. Citado na página [41](#).
- PALHETA, H. B. *Arduíno ligada a Shield Tea5767*. 2020c. Acesso em: 1 de mai de 2020. Citado na página [42](#).
- PALHETA, H. B. *Motagem Completa do circuito do Simulador PLOT Spectrum*. 2020d. Acesso em: 1 de mai de 2020. Citado na página [43](#).
- PALHETA, H. B. *Clonagem do projeto Plot Spectrum pelo GitHub*. 2020e. Acesso em: 1 de mai de 2020. Citado na página [44](#).
- PALHETA, H. B. *Printscreen da tela inicial do Plot Spectrum*. 2020f. Acesso em: 5 de maio de 2020. Citado na página [44](#).
- PALHETA, H. B. *Printscreen da tela após o carregamento das frequências*. 2020g. Acesso em: 5 de maio de 2020. Citado na página [45](#).
- PALHETA, H. B. *Cabo de alimentação*. 2020h. Acesso em: 28 de set de 2020. Citado na página [46](#).
- PALHETA, H. B. *Antena 50 ohms*. 2020i. Acesso em: 30 de set de 2020. Citado na página [46](#).
- PALHETA, H. B. *Gerador de Sinais*. 2020j. Acesso em: 30 de set de 2020. Citado na página [47](#).
- PALHETA, H. B. *Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 87,5 a 108 MHz*. 2020k. Acesso em: 30 de set de 2020. Citado na página [48](#).
- PALHETA, H. B. *Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 200 mVpp do Gerador*. 2020l. Acesso em: 5 de out de 2020. Citado na página [48](#).
- PALHETA, H. B. *Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 300 mVpp do Gerador*. 2020m. Acesso em: 5 de out de 2020. Citado na página [49](#).
- PALHETA, H. B. *Captação de sinais do Analisador de Espectro Tektronix MDO3014 e Simulador Plot Spectrum na faixa de 89,1 MHz em 500 mVpp do Gerador*. 2020n. Acesso em: 5 de out de 2020. Citado na página [49](#).
- PALHETA, H. B. *Valores captados na frequência de 89,1 MHz para diferentes tensões pico a pico captados via antena*. 2020o. Acesso em: 7 de out de 2020. Citado na página [50](#).
- PALHETA, H. B. *Valores relativos de potência de uma tensão para outra*. 2020p. Acesso em: 7 de out de 2020. Citado na página [50](#).
- PALHETA, H. B. *Captura de Tela do Gráfico do Plot Spectrum representado todos os pontos de identificação da Frequência Central*. 2020q. Acesso em: 31 de maio de 2020. Citado na página [53](#).
- PALHETA, H. B. *Identificação da Frequência Central no Analisador de Espectro*. 2020r. Acesso em: 6 de out de 2020. Citado na página [53](#).

- PIZZOTTI, R. *Modulação*. 2013. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20130506145306/http://www.proteve.net/modulacao.html>>. Acesso em: 22 de ago de 2019. Citado na página 27.
- POMPEU, P. *JavaScript*. 2019. Disponível em: <<https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Aprender/JavaScript>>. Acesso em: 25 de maio de 2019. Citado na página 36.
- RAGGETT, D. *Cascading Style Sheets*. 2002. Disponível em: <<https://www.w3.org/Style/CSS/>>. Acesso em: 24 de maio de 2019. Citado na página 36.
- RIBEIRO, D. *Firmware: o que é e como atualizar?* 2014. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/dicas-e-tutoriais/noticia/2014/04/firmware-o-que-e-e-como-atualizar.html>>. Acesso em: 28 de out de 2019. Citado na página 35.
- SENKPIE, J. *JavaScript*. 2015. Disponível em: <<https://nodejs.org/en/about/>>. Acesso em: 25 de maio de 2019. Citado na página 37.
- TEKTRONIX. *Spectral Analysis And Time-Domain Measurements Join Forces To Solve Troubleshooting Problems*. 2014. Disponível em: <https://download.tek.com/document/40W_16563_4_HR.pdf>. Acesso em: 25 de out de 2019. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- TODA MATÉRIA. *Ondas Eletromagnéticas*. 2018. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/ondas-eletromagneticas/>>. Acesso em: 11 de maio de 2019. Citado na página 20.
- TORVALDS, L. *Git*. 2020. Disponível em: <<https://git-scm.com/>>. Acesso em: 28 de abril de 2020. Citado na página 37.
- TRINDADE, Édilus de C. C. P. R. S. *Microcontroladores*. 2013. Acesso em: 22 de out de 2019. Citado na página 31.