

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

IGOR GODINHO DEBASTIANI

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM ANALISADOR DE
ESPECTRO DE BAIXO CUSTO PARA MEDAÇÃO DE
CAMPO ELETROMAGNÉTICO**

Florianópolis, 2021

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

IGOR GODINHO DEBASTIANI

**ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM ANALISADOR DE
ESPECTRO DE BAIXO CUSTO PARA MEDAÇÃO DE
CAMPO ELETROMAGNÉTICO**

Trabalho de conclusão de curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
engenheiro eletrônico

Orientador:
Prof. Dr. Luis Carlos Martinhago Schlichting

Florianópolis, 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Debastiani, Igor
Estudo da viabilidade de um analisador de espectro de baixo custo para medição de campo eletromagnético / Igor Debastiani; orientação de Luis Carlos Martinhago Schlichting. - Florianópolis, SC, 2021.
59 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Eletrônica. Departamento Acadêmico de Eletrônica.
Inclui Referências.

**1. SDR. 2. Analisador de espectro. 3. Campo eletromagnético.
4. Campo elétrico. 5. Campo magnético. I.
Martinhago Schlichting, Luis Carlos. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Estudo da viabilidade de um analisador de espectro de baixo custo para medição de campo eletromagnético.**

ESTUDO DA VIABILIDADE DE UM ANALISADOR DE ESPECTRO DE BAIXO CUSTO PARA MEDAÇÃO DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO

IGOR GODINHO DEBASTIANI

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletrônico em setembro de 2021 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Eletrônica do Instituto Federal de Educação Ciência, e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 21 de setembro, 2021.

Banca Examinadora:

Luis Carlos Martinhago Schlichting, Dr.

Robinson Pizzio, Dr.

Fernando Santana Pacheco, Dr.

Dedico este trabalho aos meus pais que sempre acreditaram na educação e também a todas as pessoas que passaram pela minha vida durante os anos que compreenderam essa graduação.

RESUMO

Alternativas de baixo custo para para analisadores de espectro são de bastante interesse do ponto de vista de quem faz o uso desse tipo de equipamento, pois trata-se de um ferramental que tem alto valor agregado. O estudo de viabilidade realizado buscou encontrar analisadores de espectro de baixo custo para realizar medições de campo eletromagnético. A pesquisa foi caracterizada como exploratória e a abordagem com relação ao problema é qualitativa. A alternativa que mais se mostrou interessante na pesquisa realizada foram os rádios definido por software (software defined radio - SDR). Nesse sentido foi feita a aquisição de dois SDRs, o SDRPlay RSP1 e o RTL-SDR, para verificar se os equipamentos em questão poderiam fazer a aquisição de ondas eletromagnéticas dentro de uma faixa de frequência. Para realizar os ensaios foi necessário uma configuração de bancada tal que possibilitasse a todas as aquisições as mesmas condições. Para evidenciar a importância dessa configuração foi feito um ensaio para comparar resultados entre aquisições com cabos diferentes. Um processo de nivelamento de parâmetros dos SDRs para além da configuração de bancada também se fez presente. Para tal foram comparadas as medições realizadas com o analisador de espectro e os SDRs para reproduzir nos SDRs os parâmetros de aquisição utilizados no analisador de espectro. Ao final dos ensaios com analisador de espectro e SDRs, chegou-se a conclusão que apenas um dos SDRs, o SDRPlay RSP1, teria condições de substituir o analisador de espectro.

Palavras-chave: Analisador de espectro. SDR. Campo eletromagnético. Placa de circuito impresso.

ABSTRACT

Low-cost alternatives for spectrum analyzers are of great interest from the point of view of those who use this type of equipment, as it is a tool that has high added value. The feasibility study carried out sought to find low-cost spectrum analyzers to perform electromagnetic field measurements. The research was characterized as exploratory and the approach to the problem is qualitative. The alternative that was most interesting in the research carried out was software defined radios (SDR). In this sense, two SDRs were acquired, the SDRPlay RSP1 and the RTL-SDR, to verify whether the equipment in question could acquire electromagnetic waves within a frequency range. To carry out the tests, a setup configuration was necessary in order to allow all acquisitions the same conditions. To show the importance of this configuration, a test was carried out to compare results between acquisitions with different cables. A process of leveling the SDRs parameters beyond the setup configuration was also present. For this purpose, the measurements performed with the spectrum analyzer and the SDRs were compared to reproduce the acquisition parameters used in the spectrum analyzer in the SDRs. At the end of the tests with spectrum analyzer and SDRs, it was concluded that only one of the SDRs, the SDRPlay RSP1, would be able to replace the spectrum analyzer.

Keywords: Spectrum analyzer. SDR. Eletromagnetic field. Printed circuit board

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vetores campo elétrico de duas cargas isoladas.	15
Figura 2 – Vetores campo elétrico de duas cargas interagindo entre si.	16
Figura 3 – Experimento de campo magnético	17
Figura 4 – Passo a passo de como funciona a regra da mão direita.	18
Figura 5 – Espectro de ondas eletromagnéticas	19
Figura 6 – Diagrama de blocos de um rádio básico controlado por software . .	23
Figura 7 – Diagrama de blocos de um SDR ideal receptor (a) e um SDR ideal transmissor (b)	24
Figura 8 – Diagrama de blocos de um SDR	24
Figura 9 – Analisador de espectro Rohde & Schwarz HMS-X	27
Figura 10 – Medida de referência feita com o analisador de espectro	29
Figura 11 – SDR RTL-SDR	29
Figura 12 – Diagrama de blocos do SDR RTL-SDR	31
Figura 13 – PSD obtida no primeiro teste prático do RTL-SDR	32
Figura 14 – PSD obtida no segundo teste prático do RTL-SDR	33
Figura 15 – SDR RSP1	33
Figura 16 – Diagrama de blocos do SDR SDR Play	34
Figura 17 – PSD obtida no primeiro teste prático do SDR RSP1	35
Figura 18 – PSD obtida no segundo teste prático do SDR RSP1	36
Figura 19 – Visão superior da placa utilizada para as medidas	38
Figura 20 – Visão inferior da placa utilizada para as medidas	38
Figura 21 – Gerador de função conectado à placa de circuito impresso	39
Figura 22 – Ponteira utilizada para medição de campo magnético	40
Figura 23 – PSD obtida na primeira medição de campo magnético com o RTL-SDR	42
Figura 24 – PSD obtida quando alterada a frequência de aquisição no RTL-SDR	42
Figura 25 – PSD obtida com o RSP1	43
Figura 26 – Configuração de bancada utilizada para os ensaios	44
Figura 27 – Medições de campo magnético com a ponteira devidamente posicionada	44
Figura 28 – Comparativo de resultados com os dados tabulados	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Camadas OSI	22
Tabela 2 – Características do analisador de espectro	28
Tabela 3 – Características do SDR RTL-SDR	30
Tabela 4 – Características do SDR RSP1	34
Tabela 5 – Medições realizadas com diferentes cabos	40
Tabela 6 – Compilado das medições realizadas	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog digital converter</i> - Conversor analógico digital
CE	<i>Conformité européenne</i> - Conformidade européia
DTFT	<i>Discrete Time Fourier Transform</i> - Transformada de Fourier de Tempo Discreto
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i> - Interconexão de Sistemas Abertos
PIP	<i>Package Installer for Python</i> - Instalador de pacotes do Python
PSD	<i>Power spectral density</i> - Densidade de potência espectral
PSFL	<i>Python Software Foundation</i> - Fundação de software Python
SDR	<i>Software defined radio</i> - Rádios definidos por software
USB	<i>Universal Serial Bus</i> - Barramento serial universal

LISTA DE SÍMBOLOS

N/C	N/C - Unidade de campo elétrico
dBm	dBm - Unidade de ganho
Hz	hertz - Unidade de frequência
T	tesla - Unidade de campo magnético
V	volt - Unidade de potencial elétrico

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	12
1.2	Descrição do problema	13
1.3	Objetivo geral	13
1.4	Objetivos específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Campo elétrico	14
2.2	Campo magnético	16
2.3	Ondas eletromagnéticas	18
2.4	Medições de campo elétrico e magnético	19
2.5	Faixa de frequência	20
2.6	Largura de banda	20
2.7	Transformada de Fourier	20
2.8	Transformada de Fourier de Tempo Discreto - DTFT	21
2.9	Densidade de potência espectral - PSD	21
2.10	Rádio definido por software - SDR	21
2.11	Linguagem de programação Python	24
3	METODOLOGIA	26
4	DESENVOLVIMENTO	27
4.1	Estudo do analisador de espectro Rohde & Schwarz HMS-X	27
4.1.1	Características	27
4.1.2	Operação	28
4.2	Estudo do SDR RTL-SDR	29
4.2.1	Características	30
4.2.2	Funcionamento	30
4.2.3	Operação	31
4.3	Estudo do SDR SDRPlay RSP1	33
4.3.1	Características	34
4.3.2	Funcionamento	34
4.3.3	Operação	35
4.4	Codificação	36
4.5	Equipamentos de suporte e configuração da bancada	37
4.5.1	Placa e gerador de funções	37
4.5.2	Ponteira de medição	39

4.5.3	Cabeamento	40
4.6	Aquisição de medidas de campo magnético	41
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO	46
5.1	Rádio definido por software - SDR	46
5.2	Configuração de bancada	47
5.3	Aquisição de medidas	47
5.4	Resultado das medidas	48
5.5	Codificação	48
5.6	Trabalhos correlatos	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
	REFERÊNCIAS	51
	APÊNDICES	53
	APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO NO SDR RTL-SDR	54
	APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO NO SDR RSP1	57

1 INTRODUÇÃO

O componente curricular de Compatibilidade Eletromagnética, obrigatório para conclusão do curso de Engenharia Eletrônica, busca estudar fenômenos elétricos que ocorrem em placas de circuito impresso e em equipamentos de maneira geral para mensurar os possíveis efeitos em outros circuitos e neles próprios do ponto de vista das ondas eletromagnéticas. Nesse sentido, para poder contemplar a parte prática da matéria, são necessários equipamentos bastante específicos e com preço de aquisição muito alto. Parte desses equipamentos é facilmente substituível, outra parte, não.

O estudo da influência dessas ondas é muito importante também para empresas, que durante a etapa de desenvolvimento de um produto precisam constantemente avaliar se as interferências geradas ou susceptíveis estão dentro do crivo de alguma norma a qual se objetiva certificar. Esse processo é fundamental para determinar se o produto em questão poderá ser comercializado, ou não, em determinados mercados. Um exemplo notório dessa questão é o certificado de conformidade européia (*conformité européenne - CE*), que estabelece padrões de compatibilidade eletromagnética a serem respeitados para que a comercialização dentro de países pertencentes ao bloco da União Européia possa acontecer livremente.

O analisador de espectro, parte fundamental da análise de compatibilidade eletromagnética, é um dos equipamentos de aquisição mais difícil para empresas e instituições devido ao alto custo. A principal medição que esse equipamento possibilita dentro do contexto de compatibilidade eletromagnética é a medição da densidade de potência espectral (*power spectral density - PSD*) de um sinal. Uma alternativa de baixo custo para fazer essa medição são os rádios definidos por software (*software defined radio - SDR*). Conceitualmente, um SDR se assemelha bastante a um aparelho de rádio doméstico, porém se difere deste por possibilitar uma maior parametrização na aquisição das ondas de rádio e, principalmente, o tratamento desse dado que pode ser feito no computador a partir de um programa.

1.1 Justificativa

Em um processo de desenvolvimento de produto, uma redução de custo é sempre muito bem vinda, pois resulta em um valor final menor. Um analisador de espectro é o equipamento que vai guiar o desenvolvimento quando se objetiva alguma norma em particular, sendo indispensável nas fases finais de um projeto, período em que as empresas chegam a alugar o equipamento em questão. Assim, substituí-lo por uma alternativa mais barata e de viável aquisição não só melhora o processo de desenvolvimento como elimina os gastos recorrentes com esse aluguel.

No caso de instituições de ensino o ganho com uma alternativa de viável

aquisição também é notório, pois viabiliza a experimentação não só na componente curricular de compatibilidade eletromagnética mas também em outros que estudam ondas eletromagnéticas.

1.2 Descrição do problema

Os analisadores de espectro são equipamentos de maior tamanho físico e de preço elevado justamente por desempenharem um conjunto sólido de funções envolvendo a aquisição de sinais. SDRs, por outro lado, focam apenas na aquisição, ficando a cargo de um computador analisar os dados capturados e traduzir isso em alguma funcionalidade.

Será que um SDR, que custa a fração do preço de um analisador de espectro, seria capaz de substituí-lo?

1.3 Objetivo geral

Verificar se os SDRs possuem nível satisfatório no que diz respeito a aquisição de sinais quando comparados aos analisadores de espectro tradicionais. Será considerado como satisfatório a semelhança de formas de onda, ganhos e tempos de aquisição de maneira que os SDRs realizem medições o mais parecidas quanto possível com o analisador de espectro.

1.4 Objetivos específicos

- a) Realizar revisão bibliográfica
- b) Fazer o teste em 2 ou mais SDRs de maneira a poder fazer um comparativo entre os modelos;
- c) Desenvolver um arcabouço de programação para realizar diferentes ensaios com diferentes SDRs;
- d) Comparar os resultados dos SDRs com um analisador de espectro de referência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Campo elétrico

Na análise de cargas elétricas, as cargas podem ser positivas ou negativas, a depender da partícula envolvida. A carga do elétron foi conceituada como sendo negativa e a do pósitron positiva, muito embora ambas as partículas tenham exatamente a mesma massa. (PURCELL; MORIN, 2013, p. 4).

Cargas elétricas interagem entre si a partir da lei de Coulomb, que descreve na Equação 2.1 a interação entre duas cargas a partir das respectivas magnitudes e vetores direção. O resultado da equação é a força resultante da interação dessas cargas. (PURCELL; MORIN, 2013, p. 7).

$$\vec{F}_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2 \hat{r}_{21}}{r_{21}^2} \quad (2.1)$$

O campo elétrico, por sua vez, descreve a interação de um conjunto de cargas em uma carga trazida para próximo destas. Assim sendo, por conta dessa natureza, a força resultante em cima dessa carga é descrita por um somatório. Porém a Equação 2.2 ainda não é o campo elétrico propriamente dito. (PURCELL; MORIN, 2013, p. 16).

$$\vec{F} = \sum_{j=1}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_j \hat{r}_{0j}}{r_{0j}^2} \quad (2.2)$$

Para obter o campo elétrico propriamente dito é necessário dividir a igualdade da Equação 2.2 por q_0 , passando assim a representar, ao invés da força resultante em q_0 , o vetor função do campo elétrico em x, y e z surgido do conjunto de cargas em q_0 . A representação utilizando o campo elétrico para obter a força em q_0 é descrita pela Equação 2.3 (PURCELL; MORIN, 2013, p. 17).

$$\vec{F} = \vec{E} q_0 \quad (2.3)$$

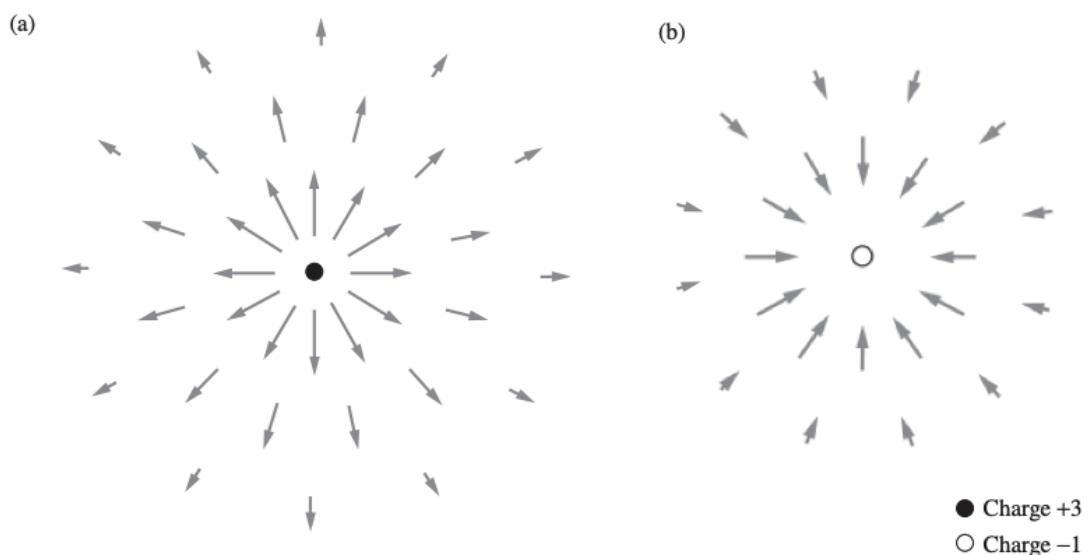
É preciso ter cuidado com a definição apresentada pois a introdução da carga q_0 com as demais pode fazer com que a própria carga q_0 se mova. Por conta disso é comum verificar que a carga q_0 é conceituada como sendo uma carga infinitesimal, porém na prática isso não poderia ocorrer, já que a menor carga já observada é a carga do elétron (PURCELL; MORIN, 2013, p. 17).

O significado físico do vetor campo elétrico em um ponto do espaço é a possibilidade de determinar a força que agirá em qualquer carga nesse ponto. Por conta

disso, para saber o que aconteceria com uma carga qualquer em um determinado ponto, só seria necessário saber o campo elétrico em uma vizinhança próxima desse ponto, ou no ponto propriamente dito. Essa não seria uma tarefa fácil se não fosse a conceituação do campo elétrico (PURCELL; MORIN, 2013, p. 18).

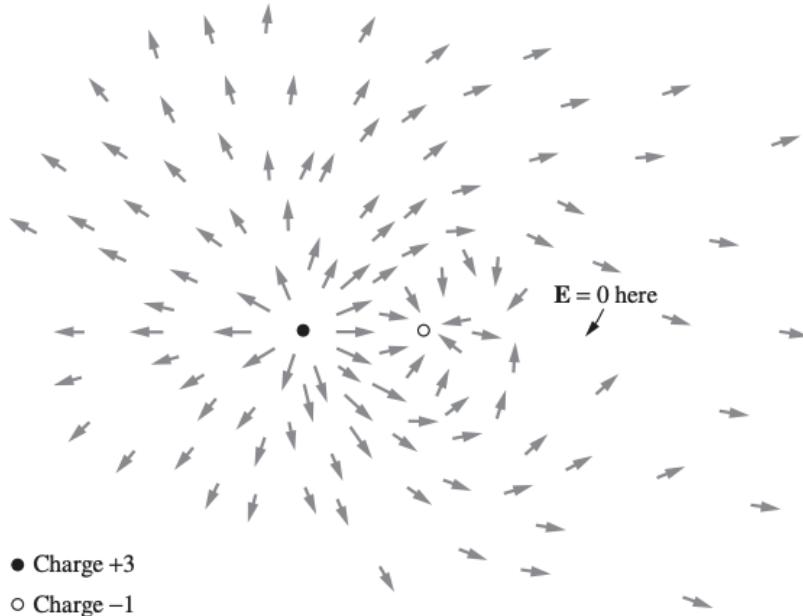
Para visualizar o campo elétrico é necessário associar um vetor, ou seja, uma magnitude e direção para cada ponto no espaço. A Figura 1 mostra como seriam os vetores campo elétrico em duas situações, uma carga com magnitude +3 e uma carga com magnitude -1. A interação entre essas cargas pode ser observada na Figura 2. É possível verificar que pelo fato das duas cargas estarem interagindo, um ponto no espaço, indicado na figura, tem campo elétrico igual a zero (PURCELL; MORIN, 2013, p. 18).

Figura 1 – Vetores campo elétrico de duas cargas isoladas.



Fonte: Adaptado de Purcell e Morin (2013).

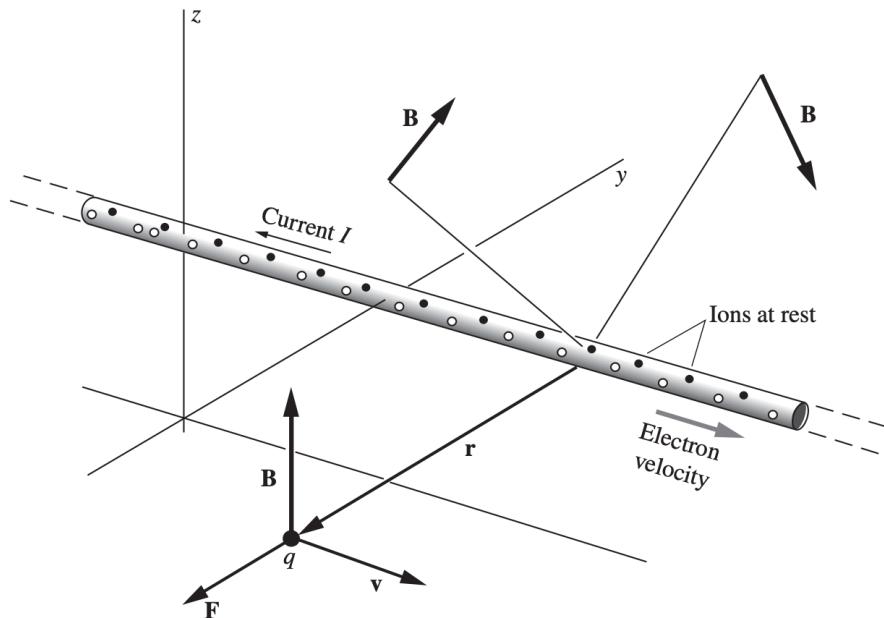
Figura 2 – Vetores campo elétrico de duas cargas interagindo entre si.



Fonte: Adaptado de Purcell e Morin (2013).

2.2 Campo magnético

Para descrever o campo magnético vamos pensar numa situação em que uma carga se movendo paralelamente a uma corrente de outras cargas experiencia uma força perpendicular ao seu vetor velocidade. Porém essa força, consistente com a lei de coulomb, não é única. Acontece que existe outra força além dessa que é proporcional a carga q e sua velocidade, compondo também com a resultante. A situação é descrita pela figura Figura 3 (PURCELL; MORIN, 2013, p. 278)

Figura 3 – Experimento de campo magnético

Fonte: Adaptado de Purcell e Morin (2013).

Em um determinado instante t a partícula de carga q passa por um ponto x , y e z com uma velocidade v . Para compor o cálculo da força resultante com a parcela de campo elétrico e a parcela dependente da velocidade, faz-se necessário que o ponto x , y e z em que a partícula passa com velocidade v seja o mesmo do campo elétrico. Assim sendo, a resultante, chamada de força de Lorentz, é descrita pela Equação 2.4. Claro que nesse caso a força F inclui apenas a força decorrente da carga e não, por exemplo, o peso da partícula que carrega a carga. (PURCELL; MORIN, 2013, p. 278)

$$\vec{F} = q \vec{E} + q \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.4)$$

O campo magnético \vec{B} , que depende de uma corrente elétrica, é descrito pela Equação 2.5. A equação leva em consideração a configuração de sentido de corrente e localização de carga mostrada na Figura 3 e, por isso, o campo magnético foi conceituado como sendo um vetor do eixo z .

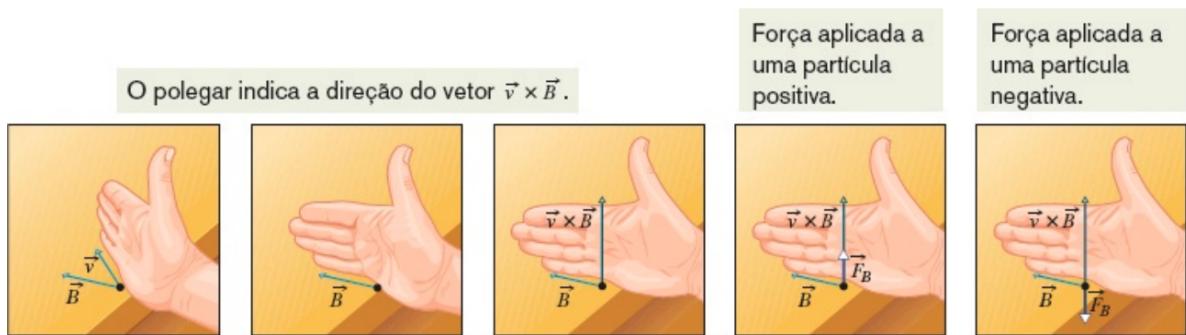
$$\vec{B} = \hat{z} \frac{I}{2\pi\epsilon_0 r c^2} \quad (2.5)$$

Dessa forma, é possível aplicarmos a Equação 2.5 na Equação 2.4 sem a parcela que envolve \vec{E} , resultando assim na Equação 2.6. Essa é a força resultante na partícula q sem a contribuição de campo elétrico.

$$\vec{F} = -\hat{y} \frac{Iqv}{2\pi\epsilon_0 rc^2} \quad (2.6)$$

O campo magnético e a força magnética, conforme vimos, são vetoriais e, por conta disso, possuem direção. A regra da mão direita, como é chamada, é a forma mais simples de determinar a direção da força magnética a partir do campo e da velocidade. A Figura 4 mostra como isso pode ser feito (HALLIDAY; RESNICK, 2016a, p. 443).

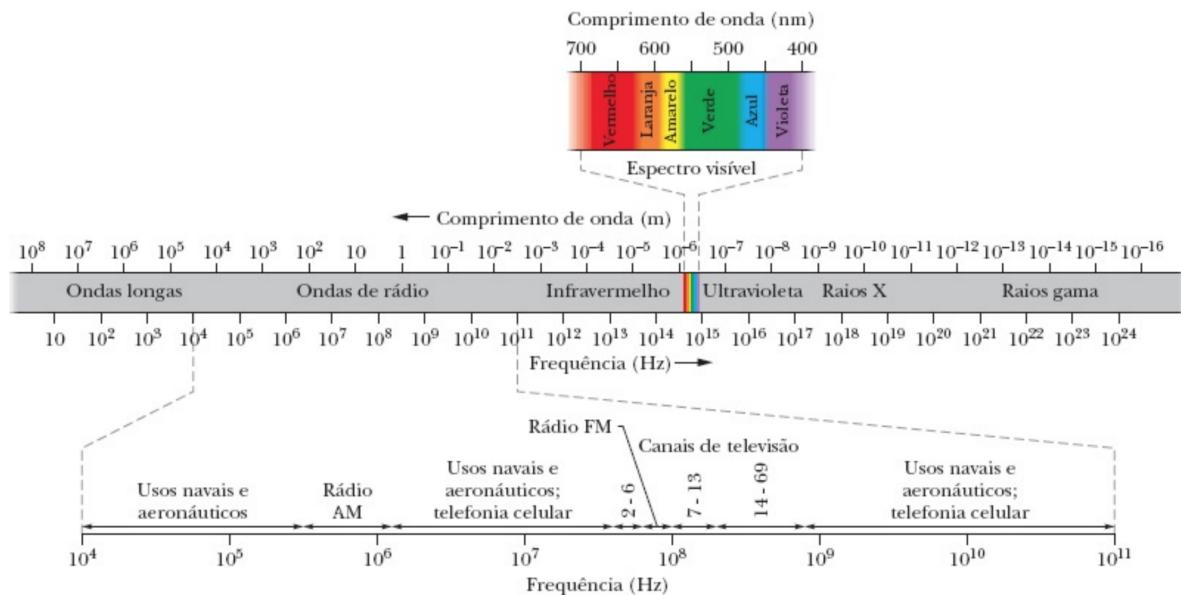
Figura 4 – Passo a passo de como funciona a regra da mão direita.



Fonte: Adaptado de Halliday e Resnick (2016a).

2.3 Ondas eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas são formadas a partir da variação combinada de campos elétricos e magnéticos. Em um fio em que circula uma corrente elétrica variante haverá um campo magnético variante em decorrência da corrente elétrica. Esse campo magnético, por ser variante, irá induzir o surgimento de um campo elétrico com essa mesma característica de variância. E vice-versa. Essas ondas podem ser vistas a olho nu caso o comprimento de onda esteja compreendido na porção do espectro, presente na Figura 5, que o olho humano é capaz de enxergar (HALLIDAY; RESNICK, 2016b, p. 29).

Figura 5 – Espectro de ondas eletromagnéticas

Fonte: Adaptado de Halliday e Resnick (2016b).

As ondas eletromagnéticas presentes no espectro visível podem ser produzidas por lâmpadas, reações químicas, etc. O espectro invisível se faz presente a partir das rádios de frequência modulada que ouvimos no carro, fornos microondas, comunicação sem fio de maneira geral, etc (HALLIDAY; RESNICK, 2016b, p. 31).

O aspecto mais importante das ondas eletromagnéticas é que para cada resultado ou atividade existe uma largura de banda específica. A cor azul, por exemplo, compreende uma pequena porção do espectro em torno de $6 \cdot 10^{14}$ Hz. Para as outras cores a lógica é a mesma. No espectro invisível essa organização não é diferente, para cada atividade também haverá uma frequência, sendo, por exemplo, para as rádios de frequência modulada, a faixa de frequência de 88 MHz a 108 MHz, havendo, para cada emissora, 200 kHz de faixa de frequência utilizável (HALLIDAY; RESNICK, 2016b, p. 31).

2.4 Medição de campo elétrico e magnético

Para realizar **medidas de campo elétrico** são utilizadas **antenas** projetadas para essa função e tais antenas possuem a forma de um **dipolo** cujas pontas, bastante próximas, funcionam como um capacitor em que o campo elétrico entre as extremidades é convertido em um sinal elétrico (INTERFERENCE TECHNOLOGY, 2021).

A medida de campo magnético, em contrapartida, é relativamente mais simples. Pode ser feita a partir do uso de uma bússola próxima a um fio com corrente elétrica circulando. Nesse caso é feito a comparação da resultante do campo magnético do fio com o campo magnético da terra (HALLIDAY; RESNICK, 2016a, p. 446).

Existem também **antenas que são projetadas para transformar campos magnéticos em sinais elétricos**. A forma utilizada para tal finalidade é a de uma pequena **bobina** que terá diferentes tamanhos de acordo com a frequência da corrente que gera o campo em questão (INTERFERENCE TECHNOLOGY, 2021).

A medida de ondas eletromagnéticas é feita, de maneira direta, a partir de antenas. A diferença nesse caso é que a forma das antenas para essa finalidade só irá mudar de acordo com a frequência da onda que se deseja captar, mas não é como nos casos anteriores que a antena precisa ter um formato específico (ELECTRONIC DESIGN, 2021).

Em termos de ferramental de análise, a melhor alternativa para avaliar os sinais elétricos dessas antenas é um analisador de espectro. A razão disso é que esse equipamento é capaz de capturar o sinal elétrico e exibir uma PSD (TEKTRONIX, 2021).

2.5 Faixa de frequência

Uma faixa de frequência é uma porção contínua ou um espectro de frequências que se estende de uma frequência a outra. A faixa de frequência de um determinado equipamento especifica as frequências em que ele trabalha. Por exemplo, filtros rejeitam ou passam frequências em uma determinada faixa de frequência (INSTITUTE FOR TELECOMMUNICATION SCIENCES, 2021).

2.6 Largura de banda

Largura de banda corresponde a faixa de frequência necessária para passar um sinal específico que foi modulado sem que haja perda de dados. Transmissores e receptores de ondas eletromagnéticas possuem larguras de banda; quanto maior determinada largura de banda, mais informações o equipamento conseguirá receber/transmitir. (NORTHWESTERN UNIVERSITY, 2021).

2.7 Transformada de Fourier

A transformada de Fourier é definida pela expressão (BRIGHAN, 1988, p. 9):

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.7)$$

Se a integral existe para cada valor do parâmetro f , então a Equação 2.7 define $H(f)$, a transformada de Fourier de $h(t)$. Normalmente, $h(t)$ é denominado uma função da variável tempo e $H(f)$ é denominado uma função da frequência variável (BRIGHAN, 1988, p. 9).

2.8 Transformada de Fourier de Tempo Discreto - DTFT

Para realizar uma Transformada de Fourier de Tempo Discreto (*Discrete Time Fourier Transform* - DTFT) é necessário, primeiramente, amostrar a função $h(t)$. O processo de amostragem é feito a partir da multiplicação de $h(t)$ pela função de amostragem. O intervalo de amostragem é T . Nesse ponto, a transformada obtida difere da de tempo contínuo por conta do efeito de sombreamento introduzido pela amostragem. Dessa forma, para evitar um sombreamento que afete as principais características da função original, é feito uma amostragem com frequência duas vezes maior que a da componente de maior frequência de $h(t)$ (BRIGHAN, 1988, p. 90).

A transformada de fourier de tempo contínuo não é aplicável para computação de máquina por conta das infinitas amostras de $h(t)$. É necessário truncar o $h(t)$ amostrado para um número N finito de amostras (BRIGHAN, 1988, p. 90).

2.9 Densidade de potência espectral - PSD

A maioria dos sinais encontrados em aplicações são tais que sua variação no futuro não pode ser sabida exatamente. É possível realizar apenas afirmações com base na probabilidade de tal variação. O dispositivo matemático para descrever tal sinal é o de uma sequência aleatória que consiste em um conjunto de realizações possíveis, cada uma das quais tem alguma probabilidade de ocorrência associada. É claro que, de todo o conjunto de realizações, o experimentador pode geralmente observar apenas uma realização do sinal, e então pode-se pensar que as definições determinísticas poderiam ser transportadas inalteradas para o presente caso. No entanto, isso não é possível porque as realizações de um sinal aleatório, visto como sequências de tempo discreto, não têm energia finita e, portanto, não possuem DTFT. Um sinal aleatório geralmente tem potência média finita e, portanto, pode ser caracterizado por uma densidade espectral de potência média. Por razões de simplicidade, a seguir usaremos o nome PSD para esse caso (STOICA; MOSES, 2005, p. 6).

Umas das definições de PSD é como sendo a DTFT da sequência de covariância, conforme mostrado na Equação 2.8 (STOICA; MOSES, 2005, p. 6).

$$\phi(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r(k)e^{-i\omega k} \quad (2.8)$$

2.10 Rádio definido por software - SDR

Rádios são, historicamente, projetados para serem equipamentos que processam uma forma de onda específica. Rádios de única função ou de aplicação

específica são mais fáceis de otimizar para performance, tamanho e consumo de energia. Ao ser feita uma análise inicial, a maioria dos rádios parece ser de função única. Acontece que, por exemplo, se formos olhar detalhadamente, um celular de primeira geração que envia e recebe sinais de voz ou um equipamento que conecta a internet por meio de internet sem fio, são equipamentos bastante flexíveis. Dos equipamentos mais comuns, um dos poucos que é, de fato, totalmente específico, é o rádio que atua no controle de acionamento do portão de uma garagem (GRAYVER, 2013, p. 5).

Um SDR é definido por ser um rádio em que algumas ou todas as funções das camadas físicas são definidas por software. O termo camada física se refere as 7 camadas definidas pelo modelo da Interconexão de Sistemas Abertos (*Open Systems Interconnection - OSI*). O modelo em questão aborda as etapas, que podem ser vistas na tabela Tabela 1, de um sistema de comunicação. As camadas são assim postas para agrupar funções necessárias para providenciar os serviços para as camadas mais baixas (GRAYVER, 2013, p. 5).

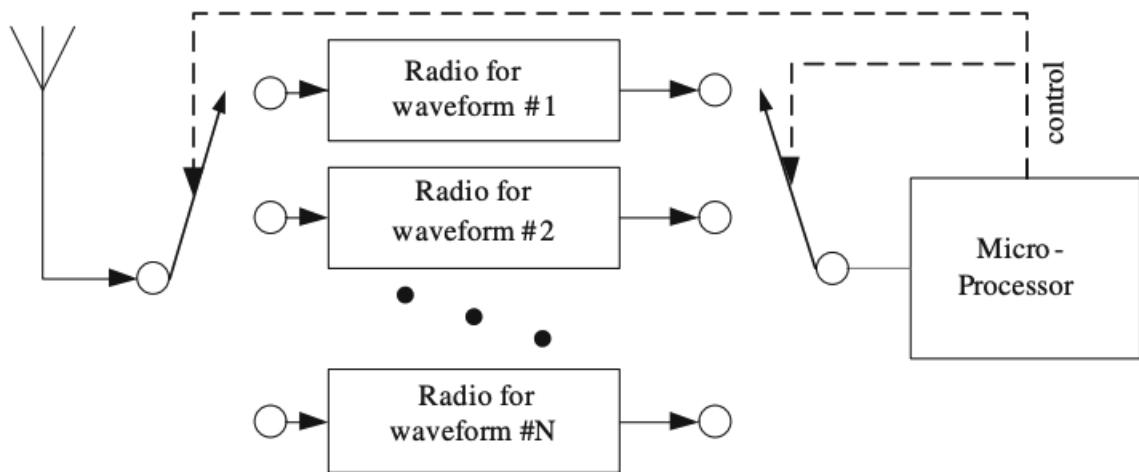
Tabela 1 – Camadas OSI

#	Nome	Função
7	Aplicação	Processamento de rede para a aplicação
6	Apresentação	Tradução e encriptação
5	Sessão	Comunicação entre hosts
4	Transporte	Comunicação ponta-a-ponta
3	Rede	Determinação do caminho e endereçamento lógico
2	Enlace	Endereçamento físico
1	Física	Transmissão de dados, sinais e binários

Fonte: Adaptado de Grayver (2013).

De acordo com a definição de SDR de uma forma mais estrita, a maioria dos rádios não pode ser considerado um SDR, mas sim rádios controlados por software. Utilizando o exemplo anterior de um celular de primeira geração, a implementação do rádio presente nesse aparelho é, justamente, um rádio controlado por software. A Figura 6 mostra como funciona esse tipo de rádio (GRAYVER, 2013, p. 6).

Figura 6 – Diagrama de blocos de um rádio básico controlado por software

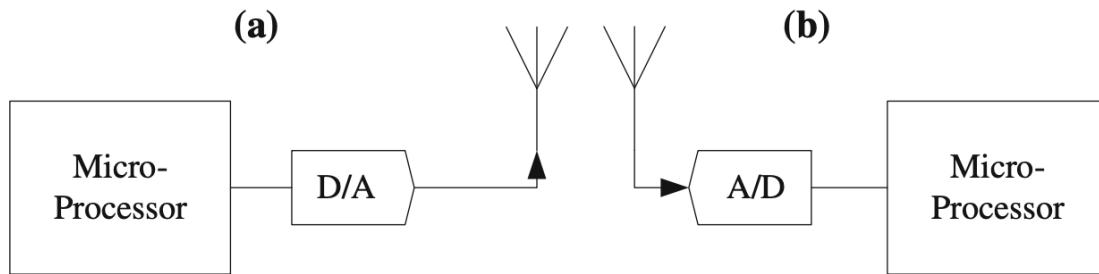


Fonte: Adaptado de Grayver (2013).

Ou seja, a definição de um SDR verdadeiro é um pouco mais sutil do que parece. Por exemplo, enquanto um rádio controlado por software consegue desempenhar apenas as atividades que foi projetado, um SDR conseguiria desempenhar atividades de uma forma muito mais abrangente. Entretanto essa definição acaba tendo alguns problemas de implementação, como por exemplo a faixa de frequência, que em teoria deveria ser definida de maneira irrestrita por software, porém a prática inviabiliza isso pois o projeto de antenas, principalmente para faixas maiores de frequência, é difícil e muito custoso (GRAYVER, 2013, p. 7).

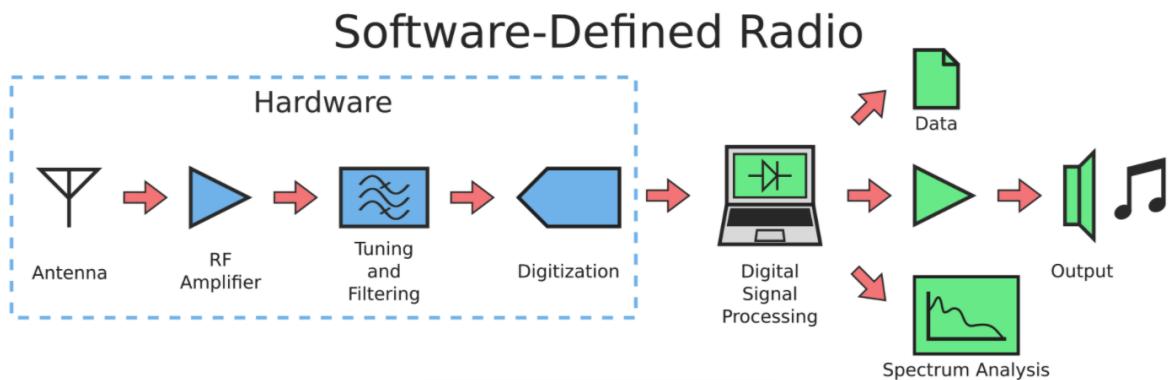
Assim sendo, o SDR da prática acaba não sendo 100% definido por software, mas sim definido a partir de um ponto que em diante o projeto do equipamento permita. O SDR ideal pode ser verificado na Figura 7. Uma possível implementação prática de SDR pode ser verificada na Figura 8. Nesse exemplo existem mais blocos pois esse SDR objetiva ter conexão com um algum sistema de processamento de sinais digitais, além de considerar já o ambiente real para fazer a captação de sinais de rádio (GRAYVER, 2013, p. 7).

Figura 7 – Diagrama de blocos de um SDR ideal receptor (a) e um SDR ideal transmissor (b)



Fonte: Adaptado de Grayver (2013).

Figura 8 – Diagrama de blocos de um SDR



Fonte: Adaptado de OnElectronTech (2021).

2.11 Linguagem de programação Python

A linguagem de programação Python, surgida em meados da década de 90, é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada e orientada a objetos. Suporta também outros paradigmas como o procedural e funcional. É uma linguagem aberta e licenciada pelo padrão Fundação de software Python (*Python Software Foundation - PSFL*), ou seja, livre para uso comercial (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2021a).

Em vista dessas características possui uma comunidade bastante ativa e uma ampla disponibilidade de pacotes para sanar praticamente todas as necessidades mais comuns e outras mais, fazendo dessa linguagem uma referência para estudos em processamento digital de sinais, cálculo numérico, estatística, etc. Para sistemas em que o hardware não é tão limitante, o Python é uma alternativa muito boa pelo fato de trazer as características já citadas para o desenvolvimento (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2021a).

O gerenciador de pacotes do Python, chamado de Instalador de pacotes do Python (*Package Installer for Python - PIP*), torna possível que qualquer ambiente de desenvolvimento tenha acesso a todos os pacotes disponibilizados na rede a partir do uso do comando de instalação junto com o nome do pacote. Gerenciadores de pacote como esse são essenciais em linguagens de programação modernas pois tornam mais fácil o gerenciamento de dependências de bibliotecas de código (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2021b).

Na vida cotidiana essa linguagem é comumente encontrada em servidores para processar requisições em sistemas web. Também se faz bastante presente em sistemas de análise de dados, automação de processos computacionais e visão computacional (UPGRAD, 2021).

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi caracterizada como exploratória. Conforme GONSALVES (2001), a pesquisa exploratória é aquela que se caracteriza pelo desenvolvimento e esclarecimento de ideias, com objetivo de fornecer uma visão panorâmica, uma primeira aproximação a um determinado fenômeno que é pouco explorado. Esse tipo de pesquisa também é denominada “pesquisa de base”, pois oferece dados elementares que dão suporte para a realização de estudos mais aprofundados sobre o tema.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, a pesquisa é considerada qualitativa. Segundo GONSALVES (2001), a pesquisa qualitativa possibilita tanto a compreensão como a interpretação do fenômeno, considerando o significado que os outros dão às suas práticas, dando ao pesquisador uma abordagem hermenêutica.

Diante da necessidade apresentada de encontrar uma solução mais barata para substituir um analisador de espectro, foram pesquisadas soluções que se adequassem à característica principal desse equipamento, a análise de espectro em uma faixa de frequência. Paralelo a isso foi feita uma revisão bibliográfica do tema.

Definido o equipamento, foi iniciado o processo de pesquisa para definir o modelo específico a ser adquirido. Paralelo ao processo de compra, foram feitas pesquisas também em sites de fornecedores internacionais para revelar alternativas mais interessantes em termos de uma relação custo benefício. Além disso foi nesse momento em que foi feito um estudo do analisador de espectro utilizado como referência.

Terminada os estudos e com os equipamentos encomendados em mãos, foram realizadas medidas para capturar sinais de rádio para verificar o correto funcionamento dos equipamentos encomendados e validar de maneira inicial se a alternativa era viável tecnicamente. A ideia nesse momento foi montar um gráfico de PSD.

Na sequência foram feitas alterações na parametrização dos equipamentos para que seu funcionamento se assemelhe ainda mais ao analisador de espectro.
Nessa etapa foi feita também uma comparação dos resultados entre os equipamentos e o analisador de espectro.

Por fim, foram feitas as medições práticas de campo magnético com o analisador de espectro e os equipamentos. Foi utilizado nesse momento uma antena específica para essa finalidade. Terminadas as medidas, os dados foram tabulados para posterior análise.

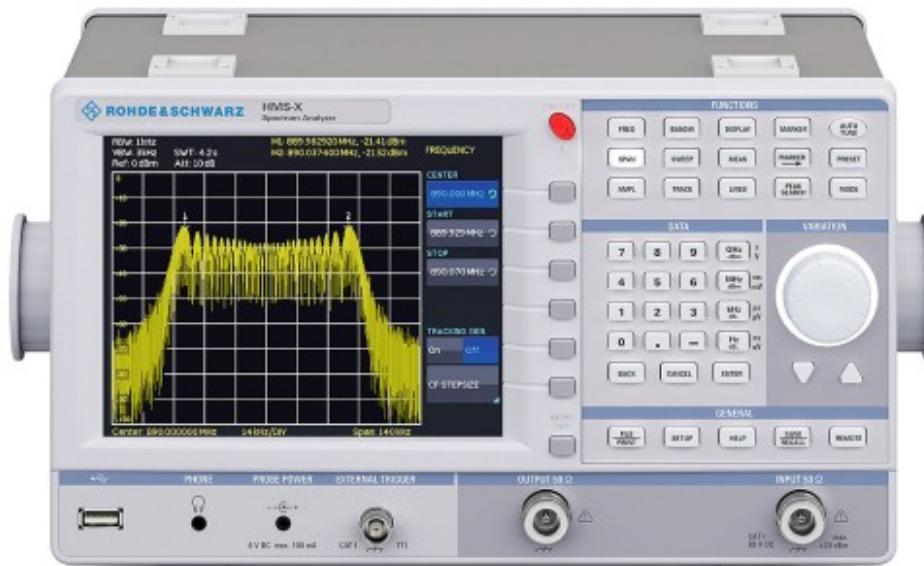
4 DESENVOLVIMENTO

Conforme apresentado na metodologia, o desenvolvimento prático foi dividido em um estudo inicial do analisador de espectro utilizado como referência, seguido de um estudo dos SDRs, um estudo para para calibrar as medições e, por fim, as medições práticas propriamente ditas.

4.1 Estudo do analisador de espectro Rohde & Schwarz HMS-X

Esse foi o equipamento utilizado como referência. Comparado a outros analisadores de espectro esse pode ser tido como um modelo mais simples, justamente por não disponibilizar funções mais avançadas para análise de outras modulações além da modulação de frequência. O equipamento pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Analisador de espectro Rohde & Schwarz HMS-X



Fonte: Adaptado de Rohde&Schwarz (2021).

4.1.1 Características

Para além da funcionalidade de geração do gráfico desejado e demodulação de rádios de frequência modulada, o equipamento oferece funções como a aquisição de sinal com frequência única, controle por barramento serial universal (*Universal Serial Bus - USB*) e exibição em monitor externo.

A funcionalidade de aquisição em frequência única é particularmente interessante pois permite que parametrizações sejam feitas em cima dessa medição, podendo alterar o tempo de medida e a maneira de formulação do valor final. Essa última funcionalidade é importante pois permite ao usuário escolher se deseja que, dentro da janela

de aquisição escolhida, o valor seja de pico, média, valor médio quadrático ou que seja formulado a partir de uma norma comum de certificação oferecida pelo equipamento.

A Tabela 2 mostra as principais características desse equipamento. A única ressalva é que não há informações oficiais sobre qual é o conversor analógico digital (*analog digital converter - ADC*) utilizado.

Tabela 2 – Características do analisador de espectro

Largura de banda	1MHz
Faixa de frequência	100kHz - 3GHz
ADC	Não informado

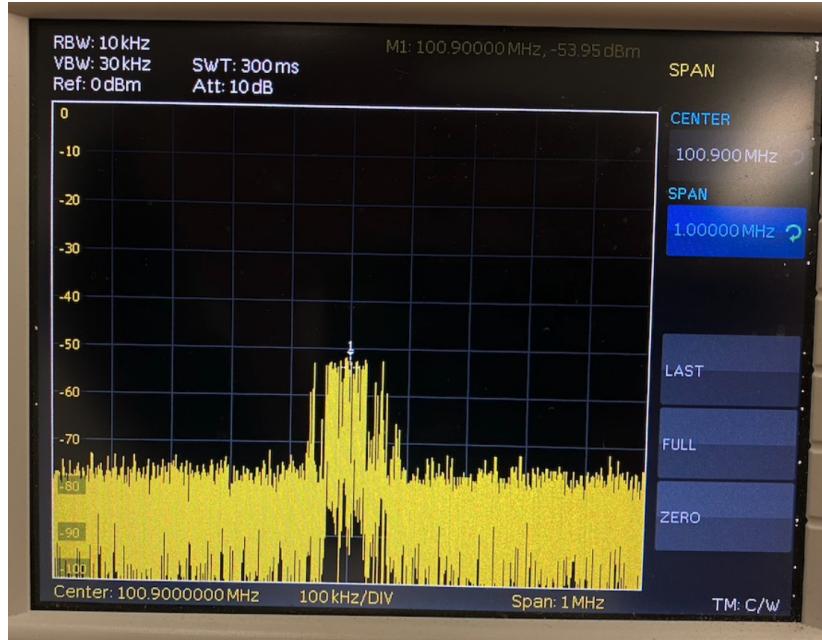
Fonte: Adaptado Rohde & Schwarz (2021).

4.1.2 Operação

A operação do equipamento após esse mapeamento inicial das características aconteceu sem maiores obstáculos. Para aquisição de valores foi utilizado o modo de frequência única e para formulação da medida foi utilizada a opção de média.

O uso do modo de frequência única deu-se por conta da maior precisão apresentada. O gráfico de PSD gerado pelo modo de aquisição em largura de banda foi muito importante e serviu para analisar a correta aquisição.

Para as medições preliminares com SDRs testados, foi feita uma medição de referência com o analisador de espectro na frequência correspondente a uma estação de rádio. O objetivo dessa medição é estabelecer um referencial para as medições que forem feitas com os SDRs. A medida obtida pode ser verificada na Figura 10. A medida foi feita na frequência de 100,9 MHz.

Figura 10 – Medida de referência feita com o analisador de espectro

Fonte: Acervo próprio.

4.2 Estudo do SDR RTL-SDR

Esse SDR, o de melhor custo benefício quando comparado aos demais, foi o que deu início aos trabalhos pelo fato de já estar no Brasil e ter um processo de compra mais facilitado. O equipamento pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – SDR RTL-SDR

Fonte: Adaptado de RTLSDRBlog (2021).

4.2.1 Características

Em comparação ao analisador de espectro, a característica de faixa de frequência desse equipamento representa uma piora, como é possível verificar na Tabela 3. Enquanto a faixa de frequência do SDR começa em 500kHz a do analisador inicia em 100kHz. O limite superior da faixa de frequência do SDR é de 1,7GHz, mas mesmo sendo menor que o limite superior do analisador de espectro isso não representa um problema pois para esse estudo de viabilidade o limite está adequado.

Tabela 3 – Características do SDR RTL-SDR

Largura de banda	3.2MHz
Faixa de frequência	500kHz - 1,7GHz
ADC	MAX5864 - 8 bits

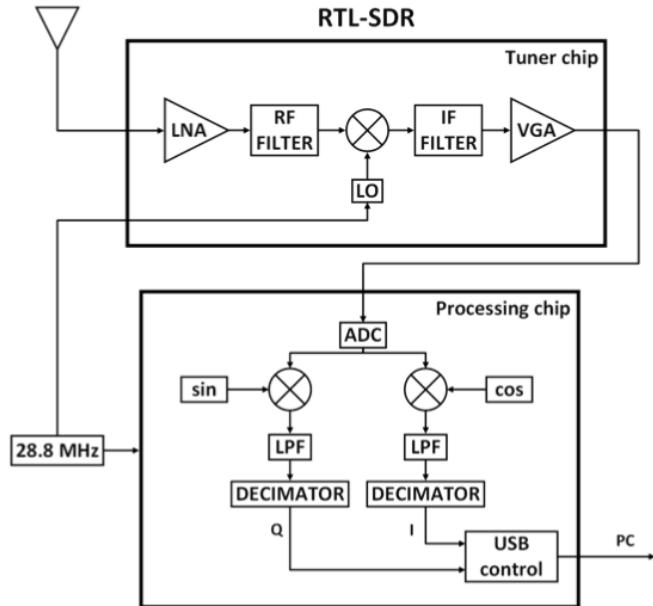
Fonte: Adaptado de RTL-SDR (2021).

O objetivo com esse SDR, mesmo sabendo das características citadas, foi de adiantar os trabalhos e compreender como se dá a operação desse tipo de equipamento. Como já se suspeitava, por conta de sua documentação e recursos encontrados na internet, teve uma curva de aprendizado mais rápida.

4.2.2 Funcionamento

Esse SDR, quando comparado ao modelo conceitual exibido na Figura 8, tem uma implementação bastante peculiar do bloco de sintonia e filtragem. Isso ocorre pois o circuito integrado utilizado nesse SDR não aceita a sintonia de frequências maiores que 25MHz. A maneira que o projeto desse equipamento encontrou de resolver esse problema foi de inserir um abaixador de frequência que, a depender das instruções recebidas pela porta USB, irá abaixar mais ou menos a frequência do sinal sintonizado. Na possibilidade do sinal ter frequência menor que 25MHz o abaixador deve ser desviado. A Figura 12 mostra o diagrama de blocos desse equipamento juntamente com o abaixador de frequência citado, que é indicado pelo bloco “LO“. Em termos de componentes, o circuito integrado do SDR é o RTL2832U e o do abaixador é o R820T2.

Figura 12 – Diagrama de blocos do SDR RTL-SDR

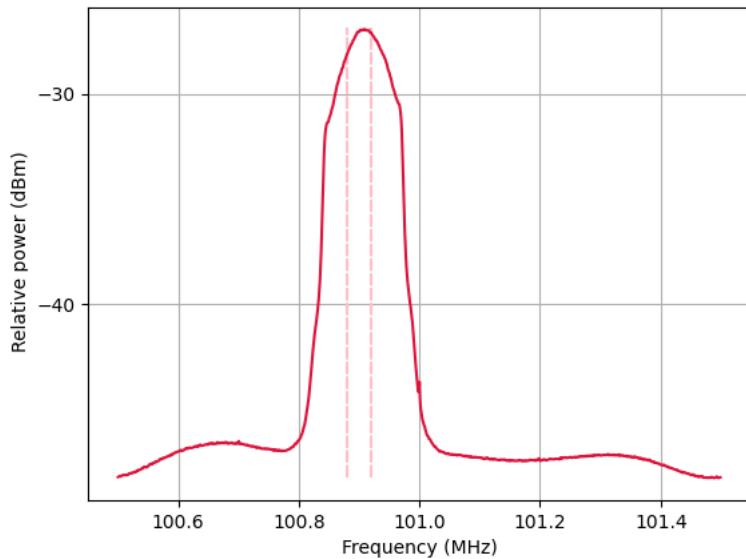


Fonte: Adaptado de BniLam et al. (2019, p. 2).

Outro ponto bastante importante é que o bloco “LO” deve ser ligado ou desligado por meio de um programa. No entanto, todas as tentativas de fazê-lo não surtiram efeito. Existe uma outra forma de interferir no funcionamento do abaixador que é a partir da escrita em nível lógico alto de uma variável de estado na memória do SDR. Assim sendo, não foi possível fazer medições de campo magnético com esse equipamento pois o laboratório não possuía gerador de função que gerasse um sinal com frequência maior que 25MHz.

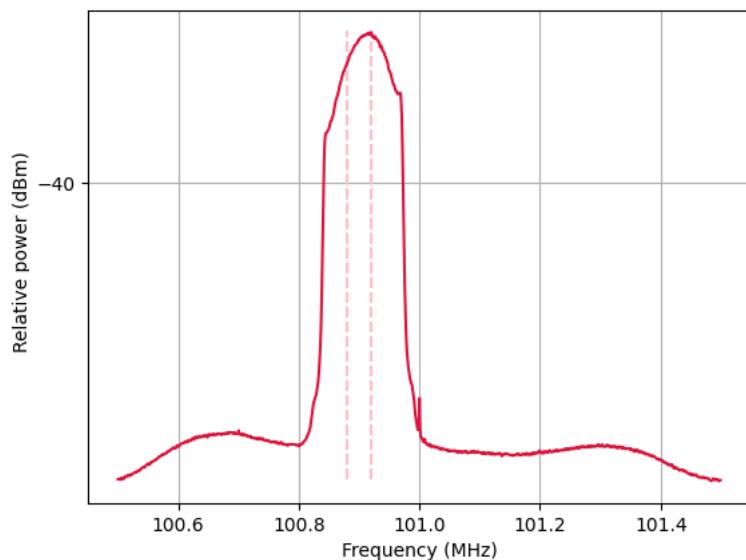
4.2.3 Operação

Conforme comentado na seção de características, esse equipamento teve uma operação bastante simples, justamente por poder contar com uma comunidade grande e ativa. Posto isso, foi utilizado um exemplo feito em Python disponibilizado pela documentação oficial do equipamento. O exemplo consistia na aquisição de um sinal de rádio FM com algumas características pré-estabelecidas. O resultado dessa primeira aquisição pode ser verificado na Figura 13. A PSD obtida é verdadeira pois se assemelha com a PSD obtida pelo analisador de espectro presente na Figura 10. Além disso, sabe-se que existe uma emissora de rádio nessa frequência, reforçando a veracidade da PSD.

Figura 13 – PSD obtida no primeiro teste prático do RTL-SDR

Fonte: Acervo próprio.

Após ser feita a primeira medição utilizando o analisador de espectro foram feitos ajustes no código para refletir as mesmas características de ganho, tamanho de janela e montagem de medição que foram observados no estudo do analisador de espectro. Fazendo uma nova aquisição do mesmo sinal com o SDR porém agora com essa nova parametrização resultou na PSD exibida na Figura 14. Nessa medição a característica de ganho foi reduzida, resultando em uma componente de frequência com menor magnitude. Para além disso também foi feita uma aquisição baseada no tempo de janelamento de 1 segundo feito no analisador de espectro, obtendo assim nessa medição mais amostras no processo de aquisição que no primeiro teste prático.

Figura 14 – PSD obtida no segundo teste prático do RTL-SDR

Fonte: Acervo próprio.

4.3 Estudo do SDR SDRPlay RSP1

Esse SDR, o de melhor performance, foi o SDR que foi adquirido pensando na efetiva substituição do analisador de espectro. Os trabalhos com esse equipamento começaram mais tarde por conta de ter sido adquirido via um fornecedor internacional. Esse equipamento pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – SDR RSP1

Fonte: Adaptado de FOXWEY (2021).

4.3.1 Características

Esse SDR foi escolhido pensando na possibilidade de poder substituir o analisador de espectro. A principal característica a ser observada é a faixa de frequência, que tem um limite inferior menor que a do analisador de espectro, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Características do SDR RSP1

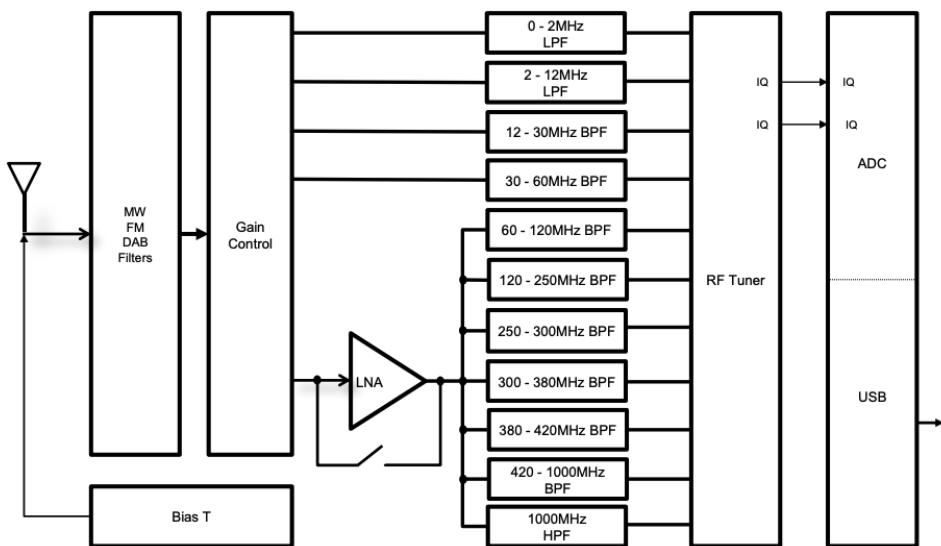
Largura de banda	6 MHz
Faixa de frequência	10kHz - 2GHz
ADC	Mirics MSi2500 - 14 bits

Fonte: Adaptado de SDRPlay (2021).

4.3.2 Funcionamento

Esse SDR, quando comparado ao modelo conceitual exibido na Figura 8, tem funcionamento bastante similar. Do ponto de vista de funcionamento esperado, um SDR tido como similar ao SDR conceitual é um SDR em que o usuário apenas deve preocupar-se em fazer a parametrização e a aquisição de dados, tendo nenhum tipo de interferência no fluxo por conta de alguma característica de projeto. A Figura 16 mostra o diagrama de blocos desse equipamento.

Figura 16 – Diagrama de blocos do SDR SDR Play



Fonte: Adaptado de SDRPlay (2021, p. 7).

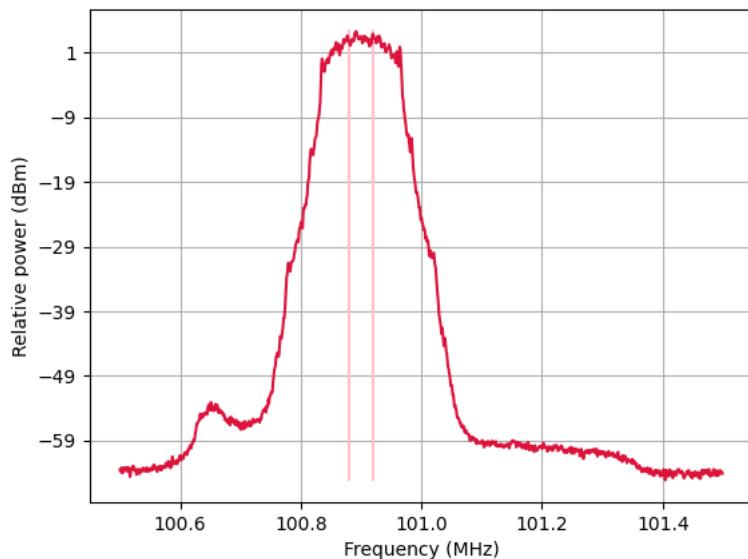
Um ponto interessante de analisar, que é particular desse SDR, é que ele faz uso de diferentes filtros para diferentes frequências. De resto, o funcionamento desse equipamento segue do modo que foi explicado na Seção 2.10.

4.3.3 Operação

Esse SDR não teve uma operação tão simples quanto o RTL-SDR. Acontece que por se tratar de um modelo mais específico a comunidade em torno desse equipamento é bem menor. A biblioteca utilizada é uma biblioteca que não foi desenvolvida de forma nativa para Python, sendo assim bem mais difícil de depurar funções em que a documentação não possuía uma definição tão clara do funcionamento. A biblioteca utilizada é uma biblioteca genérica que suporta vários SDRs que, assim como esse, não tem um interesse público tão elevado que justifique a criação de uma biblioteca específica do modelo e nativa em Python.

Passada essa dificuldade inicial de instalação das bibliotecas necessárias foi possível fazer um primeiro ensaio de teste para verificar o correto funcionamento do equipamento. Para tal se fez uso de um código exemplo presente na documentação desse SDR. A Figura 17 mostra a PSD obtida. O resultado pode ser considerado verdadeiro pois se assemelha com a PSD obtida pelo analisador de espectro presente na Figura 10. Além disso, sabe-se que existe uma emissora de rádio nessa frequência, reforçando a veracidade da PSD.

Figura 17 – PSD obtida no primeiro teste prático do SDR RSP1

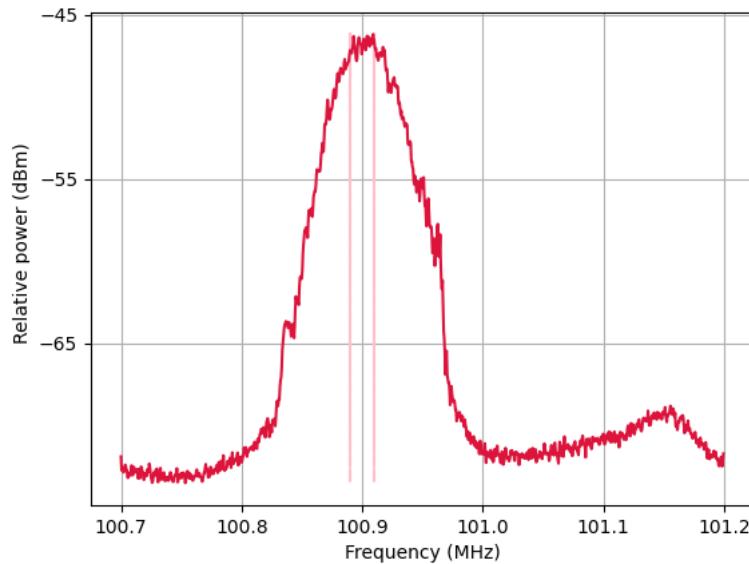


Fonte: Acervo próprio.

Com essa primeira medição realizada, foram feitos ajustes no código para refletir as mesmas características de ganho, tamanho de janela e montagem da medição que foram observados no estudo do analisador de espectro. Fazendo uma nova aquisição do mesmo sinal com o SDR, porém agora com essa nova parametrização, resultou na PSD exibida na Figura 18. Nessa medição a característica de ganho foi

reduzida, resultando em uma componente de frequência com menor magnitude. Para além disso também foi feita uma aquisição baseada no tempo de janelamento de 1 segundo feito no analisador de espectro, obtendo assim nessa medição mais amostras no processo de aquisição que no primeiro teste prático.

Figura 18 – PSD obtida no segundo teste prático do SDR RSP1



Fonte: Acervo próprio.

4.4 Codificação

O SDR pode ser utilizado a partir de um programa pronto ou de algum de desenvolvimento próprio. Nesse trabalho foi utilizado a segunda abordagem justamente por permitir um maior controle sobre os parâmetros. O código utilizado no RTL-SDR está presente no apêndice A e o do RSP1 está no apêndice B.

O código desenvolvido, mesmo tendo sido feito para 2 SDRs diferentes, foi feito de modo que ambos os códigos tivessem uma mesma ordem de execução, mesmas funções e mesmos parâmetros de retorno. Dessa forma separando por responsabilidades, o código está organizado na seguinte ordem:

- Definição de parâmetros
- Abertura de conexão com o dispositivo USB
- Medição
- Impressão do gráfico de PSD
- Extração de dados do gráfico

- Salvamento do gráfico e dos dados extraídos
- Encerramento da conexão com o dispositivo USB

O bloco “definição de parâmetros” irá definir qual será a parametrização utilizada para fazer a medição. É nesse ponto que é definida a frequência central da PSD, o tempo de aquisição e todas as outras parametrizações que forem necessárias.

Na sequência, o bloco “abertura de conexão USB” irá realizar a conexão com o SDR para determinar se o fluxo poderá seguir ou não.

No bloco de “medição” é feita a medição propriamente dita. Foi elaborado uma lógica nesse bloco que permite que, caso parametrizado, mais de uma medição seja feita por execução, permitindo assim uma maior observabilidade do objeto a ser medido.

Em seguida, a partir do bloco “impressão do gráfico de PSD”, é feito a impressão do gráfico que irá gerar os dados de medição.

No bloco “extração de dados do gráfico”, a PSD é manipulada de tal maneira que, a partir de uma frequência determinada no primeiro bloco, é extraída a magnitude correspondente.

Com o gráfico montado e os dados extraídos, essa informações são salvas no bloco “salvamento do gráfico e dos dados extraídos”.

Por fim, a partir do bloco “encerramento da conexão com o dispositivo USB”, a conexão é encerrada para que o dispositivo possa ser removido com segurança.

4.5 Equipamentos de suporte e configuração da bancada

A configuração de bancada, ou *setup* como é chamado em inglês, é o ato de criar uma padronização para todas as atividades a serem desempenhadas na bancada. Nesse caso **a configuração foi feita para garantir uma mesma condição de aquisição de medidas para os SDRs e o analisador de espectro, visando uma maior equivalência das medidas.**

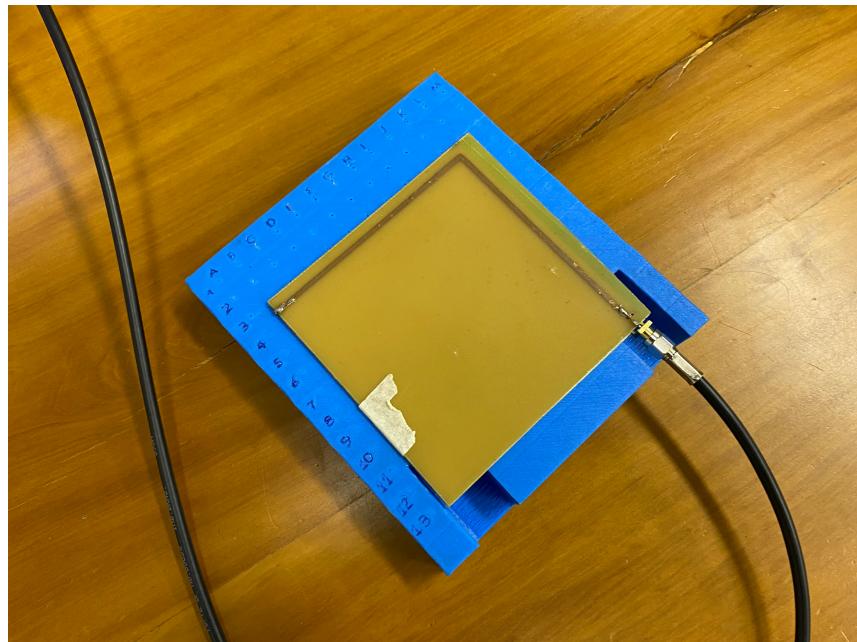
Os equipamentos que envolvem esse *setup* são todos os equipamentos e instrumentos utilizados no ensaio que servem para dar suporte a realização dos ensaios de medição.

4.5.1 Placa e gerador de funções

A placa utilizada para realizar as medições foi, justamente, um dos objetos de estudo do componente curricular de Compatibilidade Eletromagnética. O aspecto construtivo dela é bem simples pois conta apenas com uma trilha de cobre e um

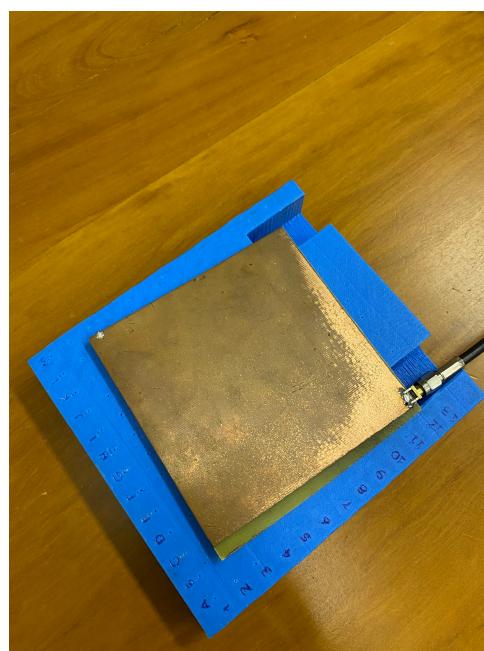
conector SMA para conexão de um gerador de funções, conforme evidenciado na Figura 19. No lado inferior, somente cobre, conforme mostra a Figura 20.

Figura 19 – Visão superior da placa utilizada para as medidas



Fonte: Acervo próprio.

Figura 20 – Visão inferior da placa utilizada para as medidas

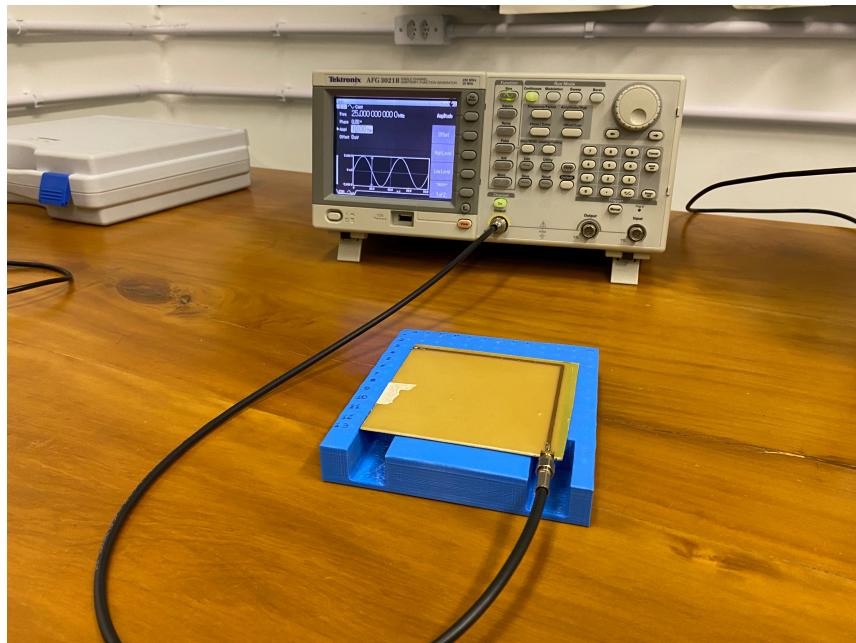


Fonte: Acervo próprio.

O gerador de funções utilizado possui, na função seno, frequência máxima de saída de 25MHz e tensão máxima de 18V pico a pico com o cabo utilizado. Nos experimentos, a frequência foi variada de acordo com o ensaio e a tensão sempre

mantida em 18V pico a pico. Para ligar a placa ao gerador de funções, foi utilizado um cabo coaxial RG58 com terminais SMA. Esse arranjo pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Gerador de função conectado à placa de circuito impresso



Fonte: Acervo próprio.

4.5.2 Ponteira de medição

A ponteira de medição utilizada é da marca Walfront e pode ser observada na Figura 22. É uma ponteira de medição de campo magnético. Para realizar uma medida com esse instrumento basta encostar a ponteira na placa de modo que o campo magnético passe por dentro da circunferência da ponteira, tendo ela que estar alinhada na direção da trilha. A maneira de conectar esse instrumento ao equipamento de medição é a partir do conector SMA disponibilizado.

Figura 22 – Ponteira utilizada para medição de campo magnético

Fonte: Acervo próprio.

4.5.3 Cabeamento

Entre a placa e o gerador de funções foi utilizado um cabo coaxial RG58 com terminais SMA. A escolha foi pela conveniência do comprimento do cabo. O cabo permaneceu o mesmo para todo o experimento de modo a evitar que houvesse qualquer alteração no campo magnético gerado pela trilha da placa de circuito impresso.

No cabo que liga a ponteira ao equipamento de medição também precisou haver uma preocupação nesse sentido. Se percebeu que uma simples troca de cabos surtiu um grande efeito na aquisição de um sinal de rádio por uma mesma antena. A Tabela 5 mostra a diferença de valores na magnitude quando é feita a medição utilizando diferentes conjuntos de cabos. O cabo alternativo é um cabo de maior comprimento quando comparado ao cabo padrão.

Tabela 5 – Medições realizadas com diferentes cabos

	Frequência	Magnitude
Cabeamento padrão	100,9 MHz	-66,78 dBm
Cabeamento alternativo	100,9 MHz	-46,56 dBm

Fonte: Acervo próprio.

A escolha do cabo utilizado para conectar a ponteira aos SDRs e analisador de espectro foi feita com base na possibilidade que o cabeamento, aqui chamado de padrão, oferecia. A vantagem dada era de poder conectar tanto os SDRs como o analisador de espectro, a ponteira. Acontece que o analisador de espetro possui um

padrão SMA e os SDRs um padrão mini SMA. Esse cabeamento vinha acompanhado de uma adaptador para ambos os padrões, coisa que o cabeamento alternativo não oferecia. Outra diferença é que o cabeamento padrão tem um comprimento menor.

4.6 Aquisição de medidas de campo magnético

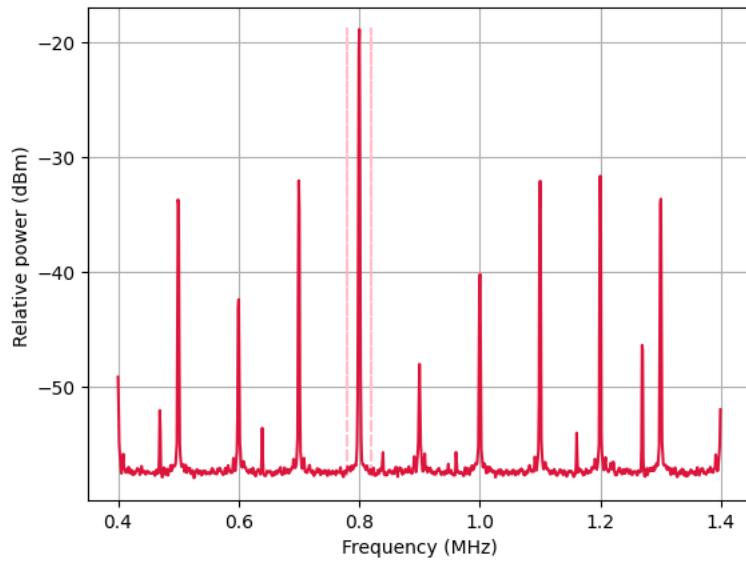
As medidas realizadas tiveram como objetivo capturar a mudança de comportamento da magnitude do campo magnético de acordo com a frequência do sinal injetado na placa de circuito impresso. Foi escolhido um conjunto de valores tal que pudesse representar essa mudança e evidenciar as características dos equipamentos utilizados. As medições realizadas pelos SDRs obedeceram o fluxo estabelecido em na Seção 4.4, que aborda o código em uma perspectiva de agrupamento de responsabilidades.

O analisador de espectro, devido a sua característica de faixa de frequência, não pôde registrar valores de medição com frequência menor que 100kHz. O SDR RSP1, por sua vez, não teve esse problema justamente por ter uma característica de aquisição que possibilita medições em frequências menores. Em contrapartida, o RTL-SDR apresentou problemas para realizar medições em frequências menores que 25MHz.

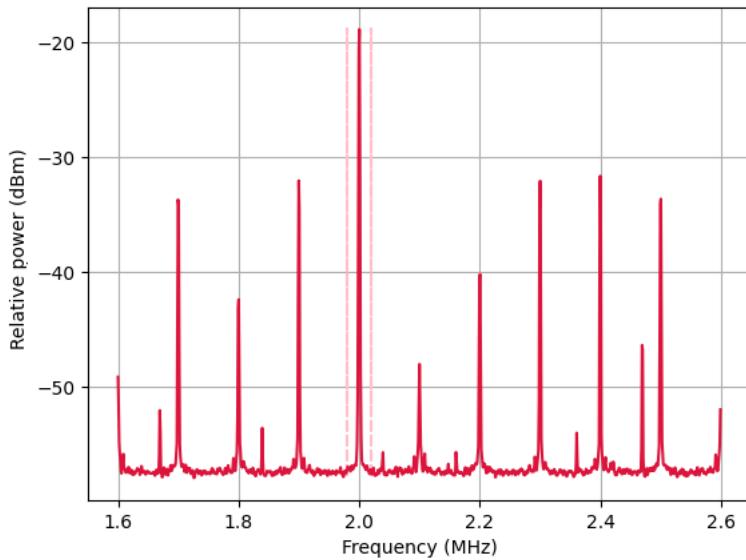
O problema encontrado no RTL-SDR foi constatado ao ser realizada a comparação entre duas medidas. A medida de campo magnético realizada em 800 kHz, conforme mostra a Figura 23, e a medida em 2 MHz, conforme mostra a Figura 24.

Era esperado que o RTL-SDR exibisse uma PSD como a da Figura 25, que mostra como ocorreu a medição no RSP1. A diferença entre as duas PSDs é que a PSD do RSP1 tem apenas uma grande componente de frequência, a que está sendo medida, ao passo que na PSD do RTL-SDR existem várias.

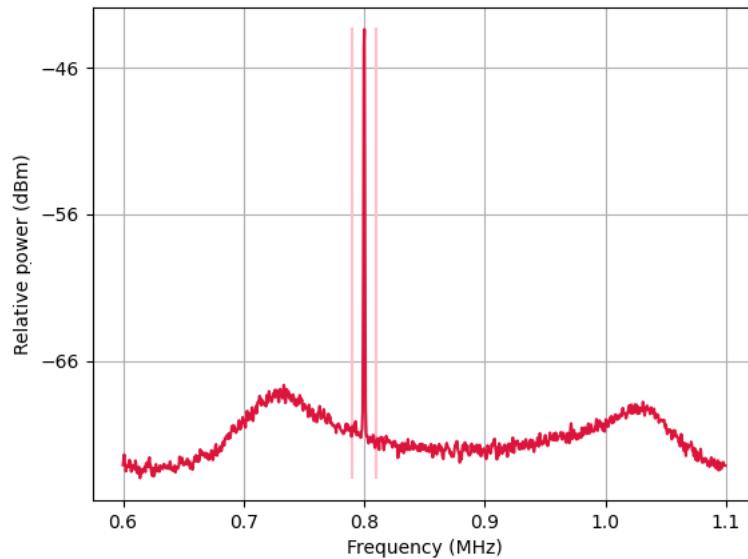
Para verificar se a característica de múltiplas componentes de frequência mostrada na Figura 25 representa a medição de um ruído, manteve-se o gerador de funções com frequência em 800 kHz e foi mudada a faixa de frequência de aquisição do RTL-SDR. Como o resultado foi muito parecido, foi constatado que a característica de aquisição de baixas frequências desse equipamento poderia ser o problema. Essas características, melhor explicadas na seção 4.2.1 e 4.2.2, inviabilizaram as medições de campo magnético até 25MHz com esse equipamento. Para além desse limite as medições também não puderam acontecer por conta da limitação de frequência máxima do gerador de funções utilizado.

Figura 23 – PSD obtida na primeira medição de campo magnético com o RTL-SDR

Fonte: Acervo próprio.

Figura 24 – PSD obtida quando alterada a frequência de aquisição no RTL-SDR

Fonte: Acervo próprio.

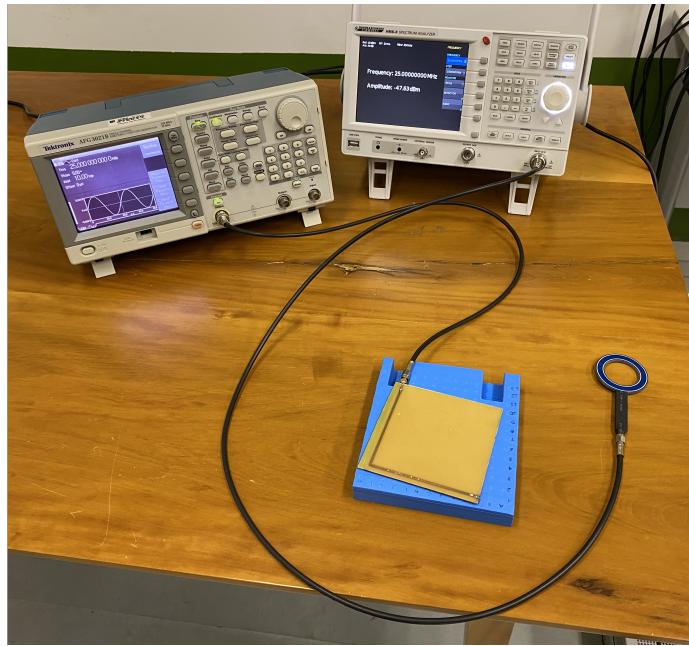
Figura 25 – PSD obtida com o RSP1

Fonte: Acervo próprio.

Dessa forma, utilizando a configuração de bancada da Figura 26, foram feitas as medições. A posição da ponteira com relação a trilha, discutida anteriormente na Seção 4.5, pode ser vista na Figura 27.

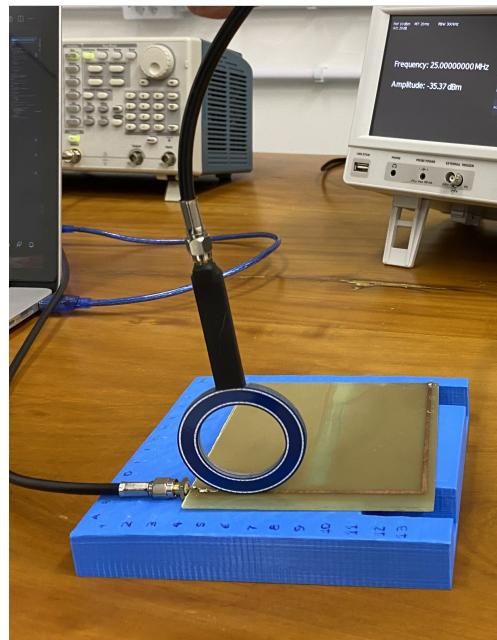
O primeiro ensaio realizado foi feito com o SDR RSP1 e na sequência com o analisador de espectro. A Tabela 6 mostra os dados obtidos. É possível fazer uma verificação mais qualitativa a partir do gráfico exibido na Figura 28 feito com os dados tabulados.

Figura 26 – Configuração de bancada utilizada para os ensaios



Fonte: Acervo próprio.

Figura 27 – Medição de campo magnético com a ponteira devidamente posicionada

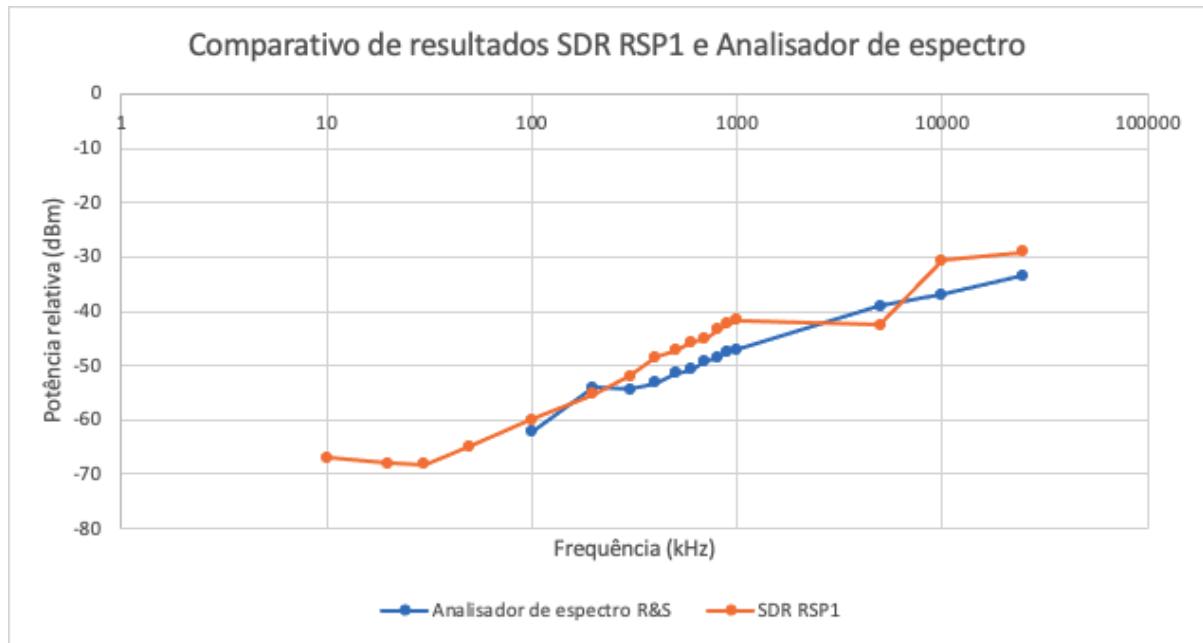


Fonte: Acervo próprio.

Tabela 6 – Compilado das medições realizadas

Frequência (kHz)	Analisador de Espectro (dBm)	SDR RSP1 (dBm)
10		-67
20		-68
30		-68.2
50		-64.8
100	-62.3	-60
200	-54	-55.2
300	-54.4	-52
400	-53.2	-48.5
500	-51.5	-47.3
600	-50.7	-45.7
700	-49.2	-45.1
800	-48.7	-43.4
900	-47.4	-42.3
1000	-47	-41.6
5000	-39.1	-42.6
10000	-37	-30.6
25000	-33.4	-29.1

Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Comparativo de resultados com os dados tabulados

Fonte: Acervo próprio.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO

Os principais pontos desse trabalho se resumem aos resultados com os SDRs e a configuração de bancada. Os SDRs por serem o foco principal do trabalho e a configuração de bancada por garantir iguais condições nas medidas.

5.1 Rádio definido por software - SDR

A pesquisa com relação aos SDRs teve resultados bastante positivos. Mesmo havendo dificuldades para fazer aquisições abaixo 25 MHz com o RTL-SDR, o estudo foi bem proveitoso. Inclusive, um ponto a ser analisado na aquisição de novos equipamentos é o de como funciona o SDR em questão em uma perspectiva de blocos. Essa análise poderia revelar questões como a que está presente na aquisição de medidas em frequências abaixo de 25 MHz do RTL-SDR.

Em termos das características dos equipamentos, a faixa de frequência do RTL-SDR não seria tanto um problema caso esse SDR não tivesse essa característica de medição em baixas frequências que fora citada. Acontece que mesmo com a faixa de frequência começando em 500 kHz ainda haveria bastante espectro para poder ser medido e, numa perspectiva mais didática, iria satisfazer a finalidade deste trabalho. Mas não há dúvidas, a faixa de frequência do RSP1 torna essa opção bem mais relevante que o RTL-SDR.

A largura de banda dos SDRs e do analisador de espectro não precisaria ser maior que 1 MHz pois com essa largura já é possível obter a magnitude na frequência desejada e também fazer uma análise no entorno do ponto de medição. Como todos satisfazem esse ponto, não há porque realizar essa comparação.

Outro ponto em que ambos os SDRs tem vantagem com relação ao analisador de espectro é o fato de que é possível definir um ganho na aquisição de sinais dos SDRs. Essa questão é bastante interessante quando é feito o uso de algum tipo de antena que necessite amplificação de sinal.

Em termos de ADC, e nesse ponto só os SDRs tem essa informação, o RSP1 é o equipamento com a melhor característica novamente. Comparado ao ADC de 8 bits do RTL-SDR, o ADC do RSP1 de 14 bits tem uma vantagem considerável. Essa vantagem se traduz na aquisição de curvas que, para o caso do RTL-SDR, são curvas com uma menor suavidade para um mesmo tempo de aquisição. No quesito preço ambos os SDRs tiveram o mesmo custo, a diferença é que RSP1, por ser adquirido a partir de um fornecedor internacional, demorou mais para chegar.

Dessa forma, fica claro que o RSP1 foi o SDR que apresentou melhor resultado, e pelos testes realizados mostrou ter a possibilidade de substituir o analisador de espectro nas medições de campo magnético.

5.2 Configuração de bancada

Logo nos primeiros testes foi verificado que algum tipo de nivelamento entre os equipamentos teria que ser feito para garantir as mesmas condições para a aquisição de medidas. Em princípio se pensou que apenas ajustes de programação nos SDRs seriam suficientes, mas isso foi refutado no momento em que foi testado um cabo diferente para conectar o analisador de espectro a ponteira de medição.

O teste de cabo diferente que foi feito no analisador de espectro mostrou que, para uma mesma aquisição, a diferença é de quase 20 dBm. Nesse momento o setup foi inteiramente revisado para garantir que todas as aquisições feitas daquele momento em diante teriam as mesmas condições, já que uma mudança tida como sutil, teria um efeito considerável.

Acontece que em se tratando de antenas, o uso de uma configuração de bancada é extremamente importante pois pequenas alterações como essa tem um grande efeito. Inclusive, em compatibilidade eletromagnética são feitos estudos dedicados somente a um cabo e o comportamento deste em diferentes condições.

Assim sendo, ficou evidente que o uso de uma configuração de bancada foi fundamental para uma aquisição confiável de medidas.

5.3 Aquisição de medidas

A aquisição de medidas, quando os testes envolvendo emissores de rádio estavam sendo feitos, era para ser realizada de maneira simultânea nos SDRs e no analisador de espectro. Após serem feitos os estudos de configuração de bancada isso se mostrou inviável. Fora que no caso da medição de campo magnético só haveria uma ponteira disponível.

Devido a natureza discutida nos estudos de configuração de bancada, foi decidido que todas as medidas necessárias que envolvessem um determinado equipamento seriam feitas todas de uma única vez. Isso evitaria que os terminais dos equipamentos fossem forçados desnecessariamente e, principalmente, evitaria qualquer interferência na medida que um cabo mais ou menos bem encaixado, ainda que minimamente, pudesse ocasionar.

Outro ponto também que foi bastante acompanhado foi o de medir da maneira mais próxima possível o mesmo ponto em todas as medições. O estudo feito no componente curricular Compatibilidade Eletromagnética, que envolve a análise do campo magnético gerado pela trilha da placa de circuito impresso, busca evidenciar que o campo varia de acordo com a posição que for feita a medida na placa.

Fica, dessa forma, claro que ter feito as aquisições todas em uma única vez e em um ponto fixo contribuiu para o nivelamento das condições de medida.

5.4 Resultado das medidas

Conforme mostrado na Tabela 6, existe sim uma diferença entre os valores de campo magnético entre os diferentes equipamentos para as mesmas medições. Essa diferença pode ser atribuída à característica de aquisição do SDR. O fato importante que a tabela mostra é que a tendência das medidas de ambos os equipamentos é a mesma, ou seja, em frequências menores uma magnitude menor e conforme aumenta-se a frequência a magnitude aumenta também.

Um estudo possível de ser feito, que poderia colocar ambos os equipamentos em um nível mais próximo, seria o de construir uma curva para a característica de aquisição do SDR a ser utilizado, dando assim uma maior previsibilidade para as medições.

5.5 Codificação

O uso de um SDR cuja comunidade não é tão ativa e grande foi visto com receio no início deste trabalho. Acontece que em casos como esse é difícil obter suporte e, normalmente, as bibliotecas tem algum tipo de implementação incompleta ou que leva em consideração apenas algum caso específico.

No caso do RSP1, o cenário de uma comunidade pequena foi percebido antes ainda da compra. O que motivou a aquisição desse equipamento foram as características e preço. Uma relação muito boa de custo benefício. Mesmo com uma biblioteca não nativa em Python e bastante complicada por possuir um número extenso de funções, esse foi o melhor investimento dos SDRs.

Para o RTL-SDR, que tinha o cenário de uma grande comunidade e biblioteca nativa em Python, o problema foi o próprio SDR. Mesmo possuindo uma biblioteca fácil de usar e uma comunidade bastante ativa, isso não foi suficiente. Esse SDR é um investimento muito bom para quem deseja fazer a aquisição de sinais de emissoras rádio ou mesmo algum outro sinal, acima de 25 MHz, que compreenda sua faixa de frequência.

Dessa forma, fica evidente que foi muito importante ponderar a cerca de questões envolvendo o suporte dos SDRs. Porém, no fim, caso a decisão de aquisição tivesse sido tomada tendo como base somente isso e apenas um SDR fosse adquirido, a decisão teria sido errada. É necessário ponderar características de aquisição, o projeto e o que se fala a respeito dele nos fóruns e o orçamento.

5.6 Trabalhos correlatos

Em posterior análise a trabalhos correlatos foi percebido que em grande maioria a abordagem foi utilizar soluções prontas de software. É uma abordagem com menor curva de aprendizado mas que limita um pouco o trabalho por dificultar o acesso direto as bibliotecas dos SDRs. Soluções como o GNU Radio são muito mais parametrizáveis, mas ainda assim estão sujeitas as implementações previstas pelo desenvolvedor do programa. Coisa que não acontece quando é desenvolvido um programa totalmente específico para a finalidade, como foi o caso deste trabalho.

Em Wong (2021), foi utilizado o programa Osmocon para serem feitas as análises. É um programa que realiza aquisições a partir de uma parametrização definida pelo usuário e exibe a PSD conforme o sinal vai sendo processado. O trabalho focou em realizar a aquisição de sinais de emissoras de rádio para exibir gráficos de PSD e frisou que o RTL-SDR empregado tinha como faixa de frequência 25 MHz as 1750 MHz.

Em Sierra e Arroyave (2020), foi utilizado o programa GNU Radio, um programa muito mais parametrizável que o Osmocon. Foram realizados testes para fazer a exibir PSDs também a partir de sinais de emissoras de rádio. Dada a maior parametrização desse programa foi montado um gráfico de potência relativa ao longo do tempo. Foi feito um teste também a partir dos sinais da banda GSM em 880 MHz.

Em Perotoni e Santos (2021), foi utilizado também o programa GNU Radio. Esse artigo ressaltou que o SDR é uma opção que está mais segura contra a obsolescência, justamente pelo fato do SDR ser uma solução definida por meio de programação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tema abordado, com auxílio da revisão bibliográfica, pôde ser devidamente fundamentado. Foram utilizados livros, artigos e sites dos temas desse trabalho. A fundamentação teórica dos conceitos físicos utilizou livros de física e engenharia para graduação. A fundamentação dos demais temas, envolvendo SDRs, antenas e tópicos sobre medição envolveu sites e referências pontuais de livros.

O desenvolvimento do presente estudo viabilizou a análise acerca da possibilidade de substituir um analisador de espectro por um equipamento de menor custo. A pesquisa realizada em torno dessa temática revelou que a alternativa mais interessante para essa substituição seria um SDR.

Os testes preliminares feitos com dois equipamentos puderam demonstrar que entre si existe equivalência de medida. O fato importante nessa comparação é que cada equipamento terá uma característica de aquisição e o que deve ser levado em conta é a forma de onda.

As bibliotecas de programação utilizadas no desenvolvimento de programas para os SDRs foram um ponto importante nesse trabalho e devem ser levadas em consideração durante a escolha desse tipo de equipamento. Assim sendo, o referencial de programação desenvolvido conseguiu prover condições para que os equipamentos realizassem as medições de campo magnético, ainda que, a depender do equipamento, as dificuldades tenham variado.

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento desse estudo mostraram que um dos SDRs testados, o RSP1, possui condições de substituir analisador de espectro. A característica de aquisição desse SDR foi perceptível, mas não influenciou negativamente, pois as medidas, quando comparadas ao analisador de espectro, variaram de maneira bastante parecida no decorrer dos ensaios.

Existem características de medição a serem consideradas, tais quais quando a comparação é feita entre SDRs, mas que não representam um problema.

E, para finalizar, como sugestão de trabalhos futuros podem ser feitas curvas de medição dos equipamentos testados de tal maneira que constituam um fator de compensação para as medidas realizadas posteriormente, tornando assim os valores mais próximos aos do analisador de espectro.

REFERÊNCIAS

- BNILAM, N. et al. Low cost aoa unit for iot applications. *EuCap2019*, 13th European Conference on Antennas and Propagation, 2019. Citado na página 31.
- BRIGHAN, E. O. *The Fast Fourier Transform And Its Applications*. 1. ed. [S.I.]: Prentice Hall, 1988. ISBN 0133075052. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- ELECTRONIC DESIGN. *Antenna Fundamentals*. 2021. Disponível em: <<https://www.electronicdesign.com/technologies/passives/article/21769333/welcome-to-antennas-101>>. Acesso em: 12 set 2021. Citado na página 20.
- FOXWEY. *Imagen do producto*. [S.I.]: Aliexpress, 2021. <<https://www.aliexpress.com/item/4000106951181.html>>. Citado na página 33.
- GONSALVES, E. P. *Iniciação à Pesquisa Científica*. 1. ed. [S.I.]: Alínea, 2001. ISBN 8575160028. Citado na página 26.
- GRAYVER, E. *Implementing Software Defined Radio*. 1. ed. [S.I.]: Springer, 2013. ISBN 9781441993328. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.
- HALLIDAY; RESNICK. *Fundamentos de Física - Eletromagnetismo*. 10. ed. [S.I.]: LTC, 2016. ISBN 9788521630371. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- HALLIDAY; RESNICK. *Óptica e Física Moderna*. 10. ed. [S.I.]: LTC, 2016. ISBN 9788521630388. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- INSTITUTE FOR TELECOMMUNICATION SCIENCES. *Frequency Range*. 2021. Disponível em: <https://www.its.blrdoc.gov/fs-1037/dir-016/_2382.htm>. Acesso em: 14 set 2021. Citado na página 20.
- INTERFERENCE TECHNOLOGY. *Antenna Fundamentals*. 2021. Disponível em: <<https://interferencetechnology.com/antenna-fundamentals/>>. Acesso em: 08 set 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- NORTHWESTERN UNIVERSITY. *What is bandwidth?* 2021. Disponível em: <<https://www.qrg.northwestern.edu/projects/vss/docs/communications/2-what-is-bandwidth.html>>. Acesso em: 10 set 2021. Citado na página 20.
- ONELECTRONTECH. *RTL-SDR v3 Teardown and Analysis*. 2021. Disponível em: <<https://www.onelectrontech.com/rtl-sdr-v3-teardown-and-analysis/>>. Acesso em: 11 set 2021. Citado na página 24.
- PEROTONI, M. B.; SANTOS, K. M. G. dos. Sdr-based spectrum analyzer based in open-source gnu radio. *Scielo*, Scielo, 2021. Citado na página 49.
- PURCELL, E. M.; MORIN, D. J. *Electricity and Magnetism*. 3. ed. [S.I.]: Cambridge, 2013. ISBN 9781107014022. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 16 e 17.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python Documentation - License and History*. 2021. Disponível em: <<https://docs.python.org/3/license.html>>. Acesso em: 08 set 2021. Citado na página 24.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python Documentation - License and History*. 2021. Disponível em: <<https://packaging.python.org/tutorials/installing-packages/>>. Acesso em: 08 set 2021. Citado na página 25.

ROHDE & SCHWARZ. *R&S HMS-X Spectrum Analyzer User Manual*. 2021. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/br/manual/manual-do-usu-rio-do-analisador-de-espectro-r-s-hms-x-manuais-gb1_78701-157125.html>. Acesso em: 15 set 2021. Citado na página 28.

ROHDE&SCHWARZ. *Imagen do produto*. [S.I.]: Rohde & Schwarz, 2021. <https://www.rohde-schwarz.com/us/product/hms-productstartpage_63493-42689.html>. Citado na página 27.

RTL-SDR. *About RTL-SDR*. 2021. Disponível em: <<https://www rtl-sdr.com/about-rtl-sdr>>. Acesso em: 14 set 2021. Citado na página 30.

RTLSDRBLOG. *Imagen do produto*. [S.I.]: Aliexpress, 2021. <<https://www.aliexpress.com/item/32939551915.html>>. Citado na página 29.

SDRPLAY. *Detailed Technical Information*. 2021. Disponível em: <<https://www.sdrplay.com/rsp1a>>. Acesso em: 08 set 2021. Citado na página 34.

SIERRA, E. G.; ARROYAVE, G. A. R. Low cost sdr spectrum analyzer and analog radio receiver using gnu radio, raspberry pi2 and sdr-rtl dongle. *IEEE Xplore*, Universidad Católica de Colombia, 2020. Citado na página 49.

STOICA, P.; MOSES, R. *Spectral Analysis of Signals*. 1. ed. [S.I.]: Prentice Hall, 2005. ISBN 0131139568. Citado na página 21.

TEKTRONIX. *Spectrum Analyzer How to guide*. 2021. Disponível em: <<https://www.tek.com/document/primer/what-spectrum-analyzer-and-why-do-you-need-one>>. Acesso em: 12 set 2021. Citado na página 20.

UPGRAD. *Python Applications*. 2021. Disponível em: <<https://www.upgrad.com/blog/python-applications-in-real-world>>. Acesso em: 08 set 2021. Citado na página 25.

WONG, K. D. *Testing an RTL-SDR Spectrum Analyzer*. [S.I.]: Kerry D. Wong, 2021. <<http://www.kerrywong.com/2014/11/16/testing-an-rtl-sdr-spectrum-analyzer>>. Citado na página 49.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO NO SDR RTL-SDR

```

1 from pylab import *
2 from rtlsdr import *
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 from matplotlib.mlab import psd
6 import control
7 import time
8
9 sample_rate = 1e6
10 measure_freq = 92.1e6 # min value = 500e3 // max value = 1,7e9
11 center_freq = measure_freq + 100e3
12 freq_correction = 60
13 gain = 0
14 n_ensaios = 1
15 measurement_time = 1000e-3
16 max_nsamples = 1024
17
18 def fazer_aquisicao(sdr):
19     _samples = []
20     samples = []
21     end = 0
22     start = time.process_time()
23     print("Aquisição em andamento...")
24     while(end-start < measurement_time):
25         _samples = sdr.read_samples(max_nsamples)
26         samples.extend(_samples)
27         end = time.process_time()
28     print("\nTempo de aquisição: %.3fms" % ((end-start)*1e3))
29     return samples
30
31 def obter_magnitude(freq, samples, sample_rate, center_freq, measure_freq):
32     sample_rate = sample_rate/1e6
33     center_freq = center_freq/1e6
34     measure_freq = measure_freq/1e6
35     freq = freq/1e6
36     NFFT = 1024
37     axes = psd(samples, NFFT=NFFT, Fs=sample_rate)
38     y = 10*np.log10(axes[0])
39     x = axes[1] + center_freq
40     i = find_nearest(x, measure_freq)
41     return x[i],y[i]
42
43 def find_nearest(array, value):
44     #https://stackoverflow.com/questions/2566412/find-nearest-value-in-numpy-array

```

```
45     array = np.asarray(array)
46     idx = (np.abs(array - value)).argmin()
47     return idx
48
49 def fazer_grafico(freq, samples, sample_rate, center_freq):
50     NFFT = 1024
51     plt.figure()
52
53     axes = plt.psd(samples, NFFT=NFFT, Fs=sample_rate/1e6, Fc=center_freq/1e6,
54                     zorder=10, color='crimson')
55     x = np.ones(len(axes[0]))*freq/1e6
56     dx = (((sample_rate)/1e6)/2)/25
57     plt.plot(x+dx, 10*np.log10(axes[0]), color='pink', linestyle='dashed', zorder=5)
58     plt.plot(x-dx, 10*np.log10(axes[0]), color='pink', linestyle='dashed', zorder=5)
59
60     xlabel('Frequency (MHz)')
61     ylabel('Relative power (dBm)')
62
63     plt.savefig("psd.png")
64
65 sdr = RtlSdr()
66 sdr.sample_rate = sample_rate
67 sdr.center_freq = center_freq
68 sdr.freq_correction = freq_correction
69 # sdr.set_direct_sampling('q')
70 sdr.gain = gain
71
72 magnitudes = []
73 frequencies = []
74 samples = [0]
75
76 for i in range(n_ensaios):
77     samples[i] = fazer_aquisicao(
78         sdr=sdr
79     )
80     samples[i] = samples[i] - np.mean(samples[i])
81     freq, mag = obter_magnitude(
82         freq = center_freq,
83         samples = samples[i],
84         sample_rate = sample_rate,
85         center_freq = center_freq,
86         measure_freq = measure_freq
87     )
88     fazer_grafico(
89         freq = measure_freq,
```

```
89     samples = samples[i],
90     sample_rate = sample_rate,
91     center_freq = center_freq
92 )
93 magnitudes.append(mag)
94 frequencies.append(freq)
95 print("Na frequência", freq, "a magnitude é de", mag, "dBm")
96
97 sdr.close()
98
99 frequencies_str = ', '.join([str(elem) for elem in frequencies])
100 f = open("frequencies_rtl.txt", "w")
101 f.write(frequencies_str)
102 f.close()
103
104 magnitudes_str = ', '.join([str(elem) for elem in magnitudes])
105 f = open("magnitudes_rtl.txt", "w")
106 f.write(magnitudes_str)
107 f.close()
108
```

APÊNDICE B – CÓDIGO UTILIZADO NO SDR RSP1

```

1 from pylab import *
2 import time
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 from matplotlib.mlab import psd
6 import control
7 from time import sleep
8 import SoapySDR as sp
9
10 medir_freq = 92.1e6 #min value = 10e3 // max value = 1.7e9
11 n_ensaios = 1
12
13 gain = 0
14 debug = 0
15
16 def fazer_aquisicao(sdr, rxStream):
17     _samples = np.array([0]*max_nsamples, np.complex64)
18     samples = np.array([], np.complex64)
19     end = 0
20     start = time.process_time()
21     while(end-start < measurement_time):
22         sr = sdr.readStream(rxStream, [_samples], len(_samples))
23         if sr.ret > 0:
24             samples = np.concatenate([samples, _samples])
25         end = time.process_time()
26     #print("\nTempo de aquisição: %.3fms" % ((end-start)*1e3))
27     return samples
28
29 def obter_magnitude(freq, samples, sample_rate, center_freq):
30     sample_rate = sample_rate/1e6
31     center_freq = center_freq/1e6
32     freq = freq/1e6
33     NFFT = 1024
34     axes = psd(samples, NFFT=NFFT, Fs=sample_rate)
35     y = 10*np.log10(axes[0])
36     x = axes[1] + center_freq
37     i = find_nearest(x, freq)
38     return x[i],y[i]
39
40 def find_nearest(array, value):
41     #https://stackoverflow.com/questions/2566412/find-nearest-value-in-numpy-array
42     array = np.asarray(array)
43     idx = (np.abs(array - value)).argmin()
44     return idx

```

```
45
46 def fazer_grafico(freq, samples, sample_rate, center_freq):
47     NFFT = 1024
48     plt.figure()
49
50     axes = plt.psd(samples, NFFT=NFFT, Fs=sample_rate/1e6, Fc=center_freq/1e6,
51                     zorder=10, color='crimson')
52     x = np.ones(len(axes[0]))*freq/1e6
53     dx = (((sample_rate)/1e6)/2)/25
54     plt.plot(x+dx, 10*np.log10(axes[0]), color='pink', linestyle='dashed', zorder
55               =5)
56     plt.plot(x-dx, 10*np.log10(axes[0]), color='pink', linestyle='dashed', zorder
57               =5)
58
59     xlabel('Frequency (MHz)')
60     ylabel('Relative power (dBm)')
61
62     plt.savefig("psd.png")
63
64
65 sample_rate = 500e3
66 gain = 42 - gain
67 center_freq = medir_freq + sample_rate/10
68
69 args = dict(driver="sdrplay")
70 sdr = sp.Device(args)
71 rx_chan = 0
72 sdr.setSampleRate(sp.SOAPY_SDR_RX, rx_chan, sample_rate)
73 sdr.setFrequency(sp.SOAPY_SDR_RX, rx_chan, center_freq)
74 sdr.setGainMode(sp.SOAPY_SDR_RX, rx_chan, False) # turn off AGC (automatic gain
75 control)
76 sdr.setGain(sp.SOAPY_SDR_RX, rx_chan, gain)
77 # max_nsamples = 32256 # absolute max value
78 max_nsamples = 128
79 measurement_time = 1000e-3
80
81
82 rxStream = sdr.setupStream(sp.SOAPY_SDR_RX, sp.SOAPY_SDR_CF32)
83
84 if debug:
85     print("faxa de ganho")
86     print(sdr.getGainRange(sp.SOAPY_SDR_RX, rx_chan))
87     print("[DONE]setup")
88
89 magnitudes = []
90 frequencies = []
91 samples = [[0]]*n_ensaios
92
```

```
88 sdr.activateStream(rxStream) #start streaming
89 print("aquisição %d * %d ensaios" % (measurement_time, n_ensaios))
90 for i in range(n_ensaios):
91     samples[i] = fazer_aquisicao(
92         sdr=sdr,
93         rxStream=rxStream
94     )
95 print("aquisição terminou")
96 sdr.deactivateStream(rxStream) #stop streaming
97 sleep(1)
98 sdr.closeStream(rxStream)
99
100 medidas_ensaio = 1
101 print("\n%d ensaios, aquisição=%fs (%d PSDs/medida)" % (n_ensaios, measurement_time
102             , medidas_ensaio))
103 print("-----")
104 for i in range(n_ensaios):
105     #samples[i] = samples[i] - np.mean(samples[i])
106     freq, mag = obter_magnitude(
107         freq = medir_freq,
108         samples = samples[i],
109         sample_rate = sample_rate,
110         center_freq = center_freq
111     )
112     magnitudes.append(mag)
113     frequencies.append(freq)
114     print("Na frequência", freq, "a magnitude é de", mag, "dBm")
115
116 fazer_grafico(
117     freq = medir_freq,
118     samples = samples[0],
119     sample_rate = sample_rate,
120     center_freq = center_freq
121 )
122
123 frequencies_str = ', '.join([str(elem) for elem in frequencies])
124 f = open("frequencies_play.txt", "w")
125 f.write(frequencies_str)
126 f.close()
127
128 magnitudes_str = ', '.join([str(elem) for elem in magnitudes])
129 f = open("magnitudes_play.txt", "w")
130 f.write(magnitudes_str)
131 f.close()
```