

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES
CAMPUS PATOS DE MINAS

MATEUS BARROS LORÊDO

**DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS
DE RÁDIO FREQUÊNCIA COM RÁDIO DEFINIDO POR
SOFTWARE DE BAIXO CUSTO**

Patos de Minas - MG

2024

MATEUS BARROS LORÊDO

**DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS
DE RÁDIO FREQUÊNCIA COM RÁDIO DEFINIDO POR
SOFTWARE DE BAIXO CUSTO**

Projeto Final de Pesquisa apresentado à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de PFC 2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. André Antônio dos Anjos

Patos de Minas - MG

2024

MATEUS BARROS LORÊDO

**DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS
DE RÁDIO FREQUÊNCIA COM RÁDIO DEFINIDO POR
SOFTWARE DE BAIXO CUSTO**

Projeto Final de Pesquisa apresentado à banca examinadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de PFC 2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador(a): Prof. Dr. André Antônio dos Anjos

Patos de Minas, 3 de dezembro de 2024.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Antônio dos Anjos– FEELT/UFU (Orientador)

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos– FEELT/UFU (Membro 1)

Prof. Dr. Davi Sabbag Roveri– FEELT/UFU (Membro 2)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, meu agradecimento se direciona ao D'us de Israel, que era que é e que há de vir e a seu filho, Yeshua, por serem meu amparo e base desde sempre. Mesmo quando eu não tinha direção, o Eterno me guiou por todos os caminhos. Afinal, uns confiam em carros e outros em cavalos, mas eu farei menção do nome do Senhor (1).

Aos meus pais, Marlene e Orlando Penna, não só minha gratidão, mas minha admiração. Agradeço por todo o auxílio em todas as áreas, por serem sempre meu alicerce. Sem o esforço deles, nada do que foi conquistado seria possível.

À Daniele Loredó e Diléa Loredó por serem portas em minha vida. Pelo cuidado, orientação e confiança.

Aos professores, amigos e colegas que tive o prazer de firmar laços ao longo desses anos, eu agradeço.

RESUMO

Tendo em vista a crescente demanda por dispositivos para telecomunicações, intensifica-se a necessidade de um ambiente de radiofrequência livre de interferências indesejadas. Neste Projeto Final de Curso é proposto a elaboração de um sistema capaz de identificar e localizar interferências de radiofrequência (RF) utilizando um rádio definido por *software* (SDR) de baixo custo. O objetivo é desenvolver uma solução viável, acessível e eficiente, capaz de identificar fontes de interferências de maneira precisa, auxiliando na preservação da qualidade e integridade dos serviços de comunicação. São explorados conceitos teóricos de análise espectral e detecção de energia, bem como suas implementações em SDRs de baixo custo, abordando também suas limitações e potenciais aplicações em ambientes reais. Os resultados obtidos demonstram a eficácia da técnica em ambientes controlados e práticos. Por fim, o projeto proposto oferece uma alternativa economicamente viável para o monitoramento de interferências em redes sem fio, com possíveis aplicações em contextos comerciais e industriais.

Palavras-chave: Interferência de RF; SDR; Detecção de energia; Sensoriamento Espectral; Comunicação sem fio.

ABSTRACT

Considering the growing demand for telecommunications devices, the need for an interference-free radiofrequency environment becomes increasingly essential. This Final Project proposes the development of a system capable of identifying and locating radiofrequency (RF) interference using a low-cost software-defined radio (SDR). The aim is to develop a viable, accessible, and efficient solution that can accurately detect sources of interference, supporting the preservation of communication service quality and integrity. The project explores theoretical concepts of spectral analysis and energy detection, along with their implementation in low-cost SDRs, while also addressing their limitations and potential applications in real-world environments. The results demonstrate the technique's effectiveness in both controlled and practical settings. The study concludes that the proposed project offers a cost-effective alternative for interference monitoring in wireless networks, with potential applications in commercial and industrial contexts.

Keywords: RF Interference; SDR; Energy Detection; Spectrum Sensing; Wireless Communication.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sinal BPSK no domínio do tempo.....	20
Figura 2 - Espaço de sinais (Constelação) da modulação BPSK.	21
Figura 3 - DEP teórica (BPSK).	21
Figura 4 - Curva de probabilidade de erro com e sem interferência.	23
Figura 5 - Ilustração do processo de interferência em sistemas de telecomunicações.	24
Figura 6 - Representação de um Ruído branco (esquerda) e de um bloqueador por ruído (direita).	26
Figura 7 - BBN: espectro do bloqueio.....	26
Figura 8 - Espectro PBN em canais contínuos (a) e canais alternados (b).....	27
Figura 9 - Espectro do NBN.....	27
Figura 10 - Sinal de bloqueio tipo tom e um bloqueador do tipo tom.....	28
Figura 11 - Espectro do bloqueio por tom simples.....	28
Figura 12 - Espectro do bloqueio por múltiplos tons.	29
Figura 13 - Modo usual de detecção de interferências.	31
Figura 14 - Esquemático do modo usual de detecção de interferências.....	32
Figura 15 - Técnica de Detecção de energia: Diagrama de Bloco no domínio do tempo.	33
Figura 16 - Sinal BPSK no domínio do tempo e no domínio da frequência.	37
Figura 17 - Arquitetura simplificada de um SDR.....	38
Figura 18 - SDRs utilizados no projeto: HackRF One e RTL-SDR.....	41
Figura 19 - Gerador de interferência de RF emitindo um sinal capturado pelo analisador de espectro.....	44
Figura 20 - Fluxograma do sinal interferente criado no GNU Radio®.....	45
Figura 21 - Interface com o usuário do Gerador de Interferência.	47
Figura 22 - Sinal Interferente observado por um Analisador de Espectro.	47
Figura 23 - Sistema receptor. Detecta e localiza interferências.	48
Figura 24 - Interface gráfica do Localizador de Interferência de RF no GUIDE.....	49
Figura 25 - Localizador de interferência em operação.	51
Figura 26 - Gráfico de Energia do Sinal.....	53
Figura 27 - Cálculo da Energia do Sinal.....	53
Figura 28 - Gráfico de DSP.	54
Figura 29 - Análise Espectral em forma de cascata.....	56

Figura 30 - Esquema de Montagem Cabeado - Transmissão e Recepção de Sinal.....	59
Figura 31 - Analisador de Espectro em -93 dBm de potência.....	61
Figura 32 - Sinal captado na potência de -93 dBm.....	62
Figura 33 - Esquema de Montagem - Transmissão e Recepção de Sinal.....	63
Figura 34 - Cenário de medição sem fio para análise de sensibilidade.....	63
Figura 35 - Cenário de medições para os testes finais de detecção de localização de interferências de RF.....	65
Figura 36 - Alinhamento entre a antena transmissora e a receptora.....	66
Figura 37 - Esquemático para obtenção do ângulo de azimuth da Antena HT8 através de um transferidor 360° impresso.....	66
Figura 38 - Sinal interferente capturado próximo ao alinhamento.....	68
Figura 39 - Sinal interferente capturado fora do alinhamento.....	69
Figura 40 - Sinal interferente capturado próximo ao alinhamento.....	69
Figura 41 - Ondas propagadas pelo sistema de transmissão e refletidas pela parede do ambiente do teste.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características gerais de diferentes SDRs.....	40
Tabela 2 - Níveis de potência do analisador e energia do sistema desenvolvido.....	60
Tabela 3 - Valores de ângulo, potência do analisador e energia do sistema proposto.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	Projeto de Parceria de 3ª Geração
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	<i>Additive white Gaussian noise</i>
BBN	<i>BroadBand Noise Jamming</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CW	<i>Continuous Wave</i>
DEP	Densidade Espectral de Potência
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
EMI	Interferência Eletromagnética
ETH	<i>Extremely High Throughout</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
M-FSK	<i>M - Frequency Shift Keying</i>
M-PSK	<i>M - Phase Shift Keying</i>
M-QAM	<i>M - Quadrature Amplitude Modulation</i>
NBN	<i>Narrow-Band Noise Jamming</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PBR	<i>Partial-Band Noise Jamming</i>

PFC1	Projeto Final de Curso 1
PFC2	Projeto Final de Curso 2
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	Rádio Frequência
RNP	Rede Nacional de Ensino e Pesquisa
SDR	<i>Software-Defined Radio</i>
SNR	Relação Sinal-Ruído
TVRO	<i>Television Receive-Only</i>
UHF	<i>Ultra-high Frequency</i>
UIT	União Internacional de Telecomunicações
VCO	<i>Voltage-Controlled Oscillator</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
CONCEITOS INTRODUTÓRIOS	13
1.1 INTRODUÇÃO.....	13
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO.....	16
1.3 TEMA DO PROJETO.....	17
1.4 OBJETIVOS.....	17
1.4.1 OBJETIVOS GERAIS	17
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.5 JUSTIFICATIVAS	18
CAPÍTULO 2	19
REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL	19
2.1.1 MODULAÇÃO BPSK	19
2.2 INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES	23
2.2.1 INTERFERÊNCIA ELÉTRICA	24
2.2.2 INTERMODULAÇÃO	25
2.2.3 INTERFERÊNCIA DE RADIOFREQUÊNCIA	25
2.3 MODO CONVENCIONAL DE DETECÇÃO DE INTERFERÊNCIAS.....	30
2.4 SENSORIAMENTO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO	32
2.4.1 SENSORIAMENTO ESPECTRAL USANDO DETECÇÃO DE ENERGIA	33
2.5 ESPECTRO DE UM SINAL DIGITALIZADO.....	35
2.6 RÁDIO DEFINIDO POR <i>SOFTWARE</i>	37
2.6.1 ARQUITETURA BÁSICA DE UM SDR	38
2.6.2 COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES PLATAFORMAS DE SDRS	39
2.6.3 SDRS SELECIONADOS PARA O PROJETO	40

CAPÍTULO 3	42
MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1 MATERIAIS	42
3.2 MÉTODOS.....	43
CAPÍTULO 4	44
IMPLEMENTAÇÕES PRÁTICAS	44
4.1 GERADOR DE SINAL INTERFERENTE	44
4.2 SISTEMA DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE INTERFÊNCIA.....	48
4.2.1 INTERFACE GRÁFICA E CONFIGURAÇÕES DO SDR.....	49
4.2.2 IMPLEMENTAÇÃO DA DETECÇÃO DE ENERGIA.....	52
4.2.3 IMPLEMENTAÇÃO DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA	53
4.2.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ESPECTÔMETRO	54
4.2.5 IMPLEMENTAÇÃO DO AVISO SONORO	56
4.2.6 RESULTADOS ESPERADOS DO SISTEMA EM OPERAÇÃO.....	57
CAPÍTULO 5	59
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1 TESTES EM CENÁRIO CONTROLADO.....	59
5.1.1 VERIFICAÇÃO DE CAPACIDADE DE DETECÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE SINAL	60
5.1.2 VERIFICAÇÃO DE SENSIBILIDADE MÍNIMA	61
5.2 TESTE EM CENÁRIOS SEM FIO	62
5.2.1 VERIFICAÇÃO DE SENSIBILIDADE MÍNIMA EM CENÁRIO SEM FIO 63	
5.2.2 TESTE FINAIS DE DETECÇÃO E DE LOCALIZAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM CENÁRIO SEM FIO	64
CAPÍTULO 6	72
CONCLUSÃO E PROPOSTAS PAR ATRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS	74

CAPÍTULO 1

CONCEITOS INTRODUTÓRIOS

1.1 INTRODUÇÃO

As telecomunicações têm sido uma força motriz na evolução da sociedade. Sendo ainda uma narrativa contínua, a história das telecomunicações tem se mostrado fascinante e cheia de descobertas tecnológicas que estão mudando completamente a forma de interação em escala global.

Sendo crucial na conectividade e no progresso social, o avanço da tecnologias e a proliferação de dispositivos inteligentes levaram a um aumento exponencial na troca de informações (2). Contudo, com novas tecnologias, surgem também novos desafios.

Com o aumento do uso do espectro eletromagnético, há a necessidade de regulamentação e controle das faixas de frequência. A Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é o órgão regulador responsável por controlar o setor de telecomunicações em território nacional, fiscalizando, normatizando e intermediando conflitos (3).

O ambiente de radiofrequência (RF), por exemplo, está cada vez mais complexo devido ao seu crescente uso por dispositivos sem fio, como *smartphones*, *laptops*, tablets, TVs, rádios, satélites e tecnologias como 5G, que entregam mais velocidade de conexão, e Internet das Coisas (Iot), que conectam uma série de dispositivos à internet (4).

Se tratando de novas tecnologias, o Wi-fi 7, também conhecido como IEEE 802.11be *Extremely High Throughput* (EHT), tem se mostrado promissor no mercado atual. Atuando em três bandas diferentes (2.4 GHz, 5 GHz e 6 GHz), consegue aproveitar ainda mais o espectro eletromagnético de RF. Além disso, apresenta uma largura de banda ultra larga de 320 MHz, utiliza modulação 4096-QAM, adota as tecnologias Multi-RU (*Resource Unit* - Unidade de Recurso) e Multi-Link, resultando em velocidades 4.8 vezes superiores ao Wi-Fi 6 e 13 vezes mais rápidas do que o Wi-Fi 5 (5).

Não obstante aos avanços atuais, ainda há previsões de tecnologias iminentes, como é o caso da implementação do 6G (6). A UIT (União Internacional de Telecomunicações), liderada pela ONU (Organização das Nações Unidas), planeja definir a visão do 6G até 2025 (6). O

3GPP (Projeto de Parceria de 3ª Geração), um consórcio internacional de empresas do setor de telecomunicações, deve definir as métricas para seu funcionamento até 2027 (6).

Nesse contexto, cujas tecnologias estão cada vez mais presentes, problemas de transmissão de dados podem acarretar danos significativos à comunicação e à interconectividade das pessoas e de objetos inteligentes. Sendo assim, as interferências de RF devem ser levadas em consideração. Simplificadamente, as interferências são alterações nos sinais transmitidos devido a outro sinal externo dentro da mesma banda de transmissão. Um dos parâmetros fundamentais para monitorar a qualidade do sinal recebido é a relação sinal-ruído-interferência (SNRI). Esse parâmetro representa a relação entre a potência do sinal desejado, captado pelo receptor, e a soma da potência do ruído com a potência dos sinais interferentes. Uma ligeira redução em alguns decibéis da SNRI pode resultar em drásticas falhas nas redes de comunicação (7).

Sistemas de TV digital brasileiros operam em uma larga faixa de frequência. A VHF (*Very High Frequency*) opera de 54 MHz a 88MHz e 174 Mhz a 216 MHz. Já a UHF (*Ultra-high Frequency*) funciona de 470 a 689 MHz (8). Interferências, embora causadas por diversos fatores, podem ser decisivas na qualidade transmissão e na QoS (*Quality of Service* - Qualidade de Serviço) oferecida aos clientes (8), podendo, inclusive, gerar prejuízos às emissoras devido ao descumprimento de contratos com anunciantes.

Se tratando de 5G, quando essa tecnologia começou a ser propagada e utilizada no Brasil com sua faixa principal, a *standlone*, na frequência de 3,5 GHz, causou interferências no serviço de TV aberta por satélite, que usava a banda C (9). Para solucionar esse problema, foi preciso inicializar um processo de migração de faixa, visto que emissoras licenciadas estavam tendo problemas de transmissão (10).

A Tecnologia GPS (*Global Positioning System*) opera em diversas frequências no Brasil, sendo as principais L1(1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) e L5 (1176.45 MHz). Os sinais de GPS quando sofrem algum tipo de interferência, podem ser extremamente prejudicados, interferindo em suas aplicações.

Os tratores autônomos são exemplos de equipamentos que podem ser prejudicados por interferências. Esses, são inovações tecnológicas que utilizam do sinal GPS e outras tecnologias para realizar tarefas agrícolas como se locomover, ajustar a velocidade e evitar obstáculos. O sinal GPS fornece precisamente os dados de localização para que eles possam realizar suas

atividades no campo. Sendo assim, qualquer problema de interferência nesse sinal pode gerar ao trator erros de navegação, prejudicando toda sua operação (11).

Evitar interferências indesejadas em sinais de transmissão é assegurar integridade do sinal captado pelo receptor, o que aumenta a confiabilidade. É evitar custos indesejados de operação por falhas de equipamentos e é garantir conformidade com as normas. Apesar disso, é preciso diferenciar a intenção e a finalidade de um interferidor. Existem interferências que apesar de serem intencionais servem para segurança. Por exemplo, na posse do atual presidente Luis Inácio Lula da Silva, em 2023, a Polícia Federal utilizou de uma arma anti-drones maliciosos. Essa arma gera um sinal interferente na frequência de comunicação do dispositivo aéreo, inviabilizando a sua comunicação. Na ocasião, um drone foi interceptado, demonstrando a eficácia de interferidores na segurança do presidente e toda a sua equipe (12).

Em contrapartida, uma interferência intencional maliciosa além de ser contra a lei, pode gerar graves consequências na segurança de cargas e pessoas também. Um interferidor malicioso pode ser capaz de bloquear sinais GPS e outros sinais de comunicação em veículos de transportes de cargas valiosas, por exemplo. Sendo assim, tais veículos, ao serem interceptados por um interferidor, ficariam incomunicáveis e irrastráveis. Isso facilitaria a operação de criminosos no assalto as cargas (12).

Dessa maneira, um monitoramento de interferência eficaz é capaz de assegurar até mesmo a segurança de indivíduos. Por isso, desenvolver um bom sistema de monitoramento se mostra essencial atualmente.

Apesar disso, há poucos sistemas de monitoramento de interferência disponíveis, e os existentes geralmente utilizam equipamentos caros e especialmente desenvolvidos. Como resultado, o número de receptores de monitoramento é insuficiente para uma cobertura eficaz. Um sistema de monitoramento ideal deve ser capaz de sensoriar uma ampla faixa de frequência com alta sensibilidade e baixo custo, permitindo a avaliação de grandes áreas geográficas de forma mais acessível (13).

Um exemplo de identificador de interferência presente no mercado atual é o R&S MNT100 RF da empresa Rohde&Schwarz®. Esse aparelho é capaz de fazer a análise do espectro eletromagnético de 600 MHz a 6 GHz e identificar automaticamente, através de sua antena radiogoniométrica (HE400CEL), transmissores indesejados (14). Contudo, um equipamento de tal nível de operação é extremamente caro e especializado, o que além de exigir

um desembolso alto, exige mão de obra qualificada para operar, fazer as manutenções e toda a logística de transporte.

Considerando a necessidade do mercado por equipamentos eficazes na identificação de interferências, com custos reduzidos de implementação e facilidade de uso, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema para identificação e localização de interferências de RF. O sistema utiliza SDR de baixo custo e aplica conceitos de análise espectral e detecção de energia, oferecendo uma alternativa acessível e eficaz para atender a essa demanda.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

A interferência em sinais de telecomunicações pode causar uma série de prejuízos, tanto na comunicação quanto no âmbito financeiro. Na comunicação, a interferência pode gerar ruídos, distorções e interrupções nas chamadas, reduzindo a qualidade da experiência do usuário e comprometendo a eficiência das operações. Financeiramente, a perda de clientes, a diminuição da produtividade e os custos com manutenção e reparos podem gerar grandes prejuízos para as empresas de telecomunicações (13).

Outra preocupação é a procedência dessas interferências, muitas vezes de caráter ilegal (15, 16), sendo não apenas prejudiciais aos sistemas de comunicação, mas também utilizadas como meios ilícitos para interromper comunicações com o intuito de cometer crimes, como furtos e ataques cibernéticos, entre outros.

Detectar essas interferências é fundamental para garantir a segurança, a qualidade do serviço e evitar prejuízos. Através da identificação precisa das fontes de interferência, é possível tomar medidas corretivas para eliminá-las, como ajustar a frequência de operação, melhorar a blindagem dos equipamentos, realocar antenas ou, quando necessário, acionar órgãos fiscalizadores do espectro eletromagnético. No entanto, os equipamentos comerciais destinados a essa finalidade geralmente são caros e de operação complexa, exigindo profissionais altamente qualificados para sua configuração e manutenção. Essa elevada complexidade e o alto custo podem limitar o acesso a esse tipo de tecnologia para muitas empresas, especialmente as de menor porte.

Considerando essa necessidade, este projeto final de curso propõe explorar o uso de SDRs de baixo custo para reduzir os gastos com a implementação de detectores de interferência de RF e ampliar seu acesso, abordando um desafio nas indústrias de telecomunicações. A solução proposta também visa facilitar a análise do espectro eletromagnético em RF, utilizando

conceitos de sensoriamento espectral para tornar o equipamento mais acessível e utilizável por operadores não especializados.

1.3 TEMA DO PROJETO

Este projeto final de curso tem como tema o desenvolvimento de um sistema para identificação e localização de interferências de RF utilizando rádio definido por *software* de baixo custo, com foco na aplicação de análise espectral faixa larga e detecção de energia, visando oferecer uma solução eficaz e acessível para a demanda do mercado por equipamentos que identifiquem interferências de maneira econômica e de fácil utilização.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVOS GERAIS

Este PFC tem como objetivo viabilizar, por meio de estudos teóricos e simulações computacionais, o desenvolvimento de um sistema de identificação e localização de interferência de RF de baixo custo e fácil operação, utilizando a tecnologia de rádio definido por *software*.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste estudo estão associados aos requisitos do projeto, assim como às fases implementadas. No PFC1, de caráter mais teórico, as atividades realizadas foram:

- a) Estudos dos conceitos básicos do espectro eletromagnético;
- b) Estudo sobre conceitos básicos de sistemas de comunicação digital e sensoriamento do espectro eletromagnético;
- c) Compreensão do conceito e das diferentes técnicas de interferência intencional (*jamming*);
- d) Estudo sobre diferentes equipamentos de detecção de interferências bem como suas aplicações e especificações;
- e) Estudo os equipamentos de SDR para implementação do projeto, levando em conta custo, desempenho e operação;
- f) Seleção da plataforma de SDR mais adequada para o projeto.

Por outro lado, no PFC2 as atividades propostas são:

- a) Implementar um gerador de interferência intencional usando o *software* GNU Radio® e um SDR.

- b) Testar o gerador de interferência utilizando um analisador de espectro comercial.
- c) Desenvolver um analisador de espectro de baixo custo utilizando SDR, com frequência central e banda configuráveis. O *software* a ser utilizado será o Matlab®, com o auxílio de uma ferramenta interna chamada GUIDE.
- d) Incorporar ao analisador espectral um sistema de monitoramento de energia em uma faixa espectral configurável.
- e) Definir e implementar no sistema de monitoramento de energia um método gráfico e/ou sonoro para possibilitar a detecção de aumento ou diminuição de nível de sinal.
- f) Testar em laboratório a solução proposta, visando verificar sua eficácia em indicar a direção de emissão do sinal interferente, comparando o resultado obtido com aquele de um analisador de espectro comercial

1.5 JUSTIFICATIVAS

Esse projeto final de curso visa implementar técnicas de processamento digital de sinais e conceitos de sensoriamento do espectro com o objetivo de detectar e localizar diferentes fontes de interferência de RF em sistemas de comunicação sem fio, possibilitando a adoção de medidas eficazes para mitigar seus efeitos. Fazendo-se o uso de um SDR de baixo custo, essa pesquisa se torna acessível e aplicável em diversos cenários, desde redes domésticas até grandes infraestruturas de telecomunicações.

Portanto, esse trabalho justifica-se pela relevância para a área de telecomunicações e seu potencial contribuição para melhorar serviços de comunicação sem fio. Além disso, os resultados obtidos nesse projeto poderão servir de amparo e base para o desenvolvimento de novas técnicas e tecnologias nesse campo de pesquisa.

CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo tem por finalidade abordar conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do PFC. Os principais tópicos de estudo serão: sistemas de comunicação digital, interferências em sistemas de comunicação, detecção de interferência, sensoriamento e análise espectral, e rádio definido por *software*.

2.1 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DIGITAL

Um sistema de comunicação digital é composto por equipamentos responsáveis pela transmissão e recepção de sinais digitais. Para garantir uma comunicação confiável e segura, esse tipo de sistema converte dados binários em formas de onda adequadas para transmissão através de um canal de comunicação, em um processo conhecido como modulação digital. Existem diversos tipos de modulação digital, destacando-se o chaveamento de fase da portadora (PSK - *Phase Shift Keying*), o chaveamento de amplitude (ASK - *Amplitude Shift Keying*) e o chaveamento de frequência (FSK - *Frequency Shift Keying*), além de combinações entre eles. Exemplos práticos incluem as modulações BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), M-ary-PSK (*M-ray Phase Shift Keying*), M-ary-QAM (*M-ray Quadrature Amplitude Modulation*) e M-ary-FSK (*M-ray Frequency Shift Keying*) (17).

Para compreender os princípios básicos de sistemas de comunicação digital, especialmente em cenários com interferência de RF, será abordado no estudo teórico a modulação BPSK, uma das mais simples e robustas.

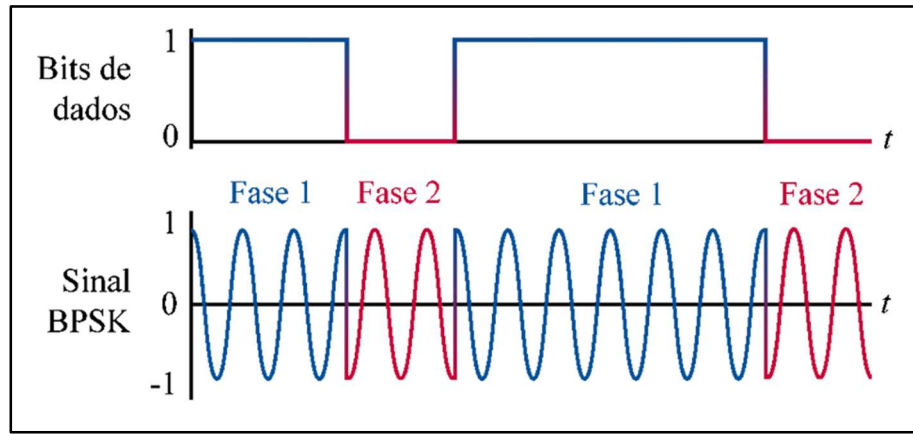
2.1.1 MODULAÇÃO BPSK

A modulação BPSK é um modelo binário de modulação cujas informações são transmitidas por meio da variação da fase da onda portadora (17). A duração de símbolo (T) é exatamente o tempo de um bit (T_b). Seus símbolos binários têm as formas de onda representadas pela Equação 1 (18).

$$s_i(t) = \begin{cases} s_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \\ s_2(t) = -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \end{cases}, \quad (1)$$

onde E_b é a energia média de bit e f_c é a frequência da portadora ($f_c = n_c \frac{1}{T_b}$). Sendo n_c um número inteiro, ou seja, no intervalo do tempo de bit T_b , ocorrem n_c ciclos da portadora. A Figura 1 apresenta um exemplo de um sinal modulado BPSK, no domínio do tempo, para uma sequência de bits de dados de entrada.

Figura 1 - Sinal BPSK no domínio do tempo.



Fonte: (17)

Observa-se, pela Figura 1, que os símbolos têm o mesmo módulo, porém com fase invertida. Isso se explica pelo fato de o sinal ser antipodal, característico de um sinal BPSK. Além disso, a relação entre a potência média de transmissão ou recepção com a energia média de bit na transmissão ou recepção é dado por

$$P = \frac{E_b}{T_b}. \quad (2)$$

2.1.1.1 Função-base e Constelação do Sistema BPSK

Existe apenas uma função base para esse tipo de modulação, visto que é antipodal. Sua energia unitária é dada como

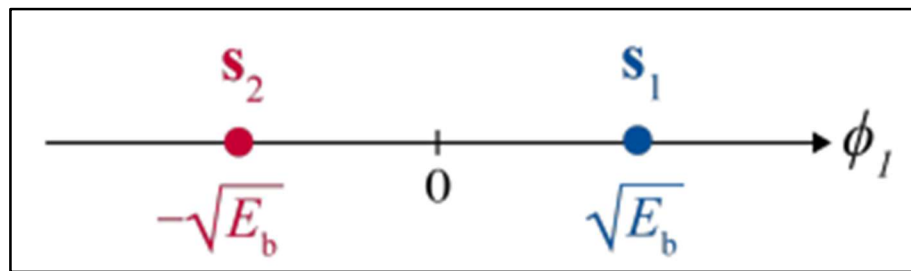
$$\phi_1 = \frac{s_i(t)}{\sqrt{E_b}} = \sqrt{\frac{2}{T_b}} \cos 2\pi f_c t, 0 \leq t \leq T_b. \quad (3)$$

Desse modo, observa-se que os coeficientes s_{11} s_{12} das formas de onda $s_1(t)$ e $s_2(t)$ valem $+\sqrt{E_b}$ e $-\sqrt{E_b}$, respectivamente. Reescrevendo, tem-se

$$s_i(t) \begin{cases} s_1 = s_{11}\phi_1(t) = \sqrt{E_b}\phi_1(t) \\ s_2 = s_{12}\phi_1(t) = -\sqrt{E_b}\phi_1(t) \end{cases} \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (4)$$

A partir dessa equação é possível construir o espaço de sinais, ou constelação, desse tipo de modulação, que pode ser observado pela Figura 2.

Figura 2 - Espaço de sinais (Constelação) da modulação BPSK.



Fonte: (17)

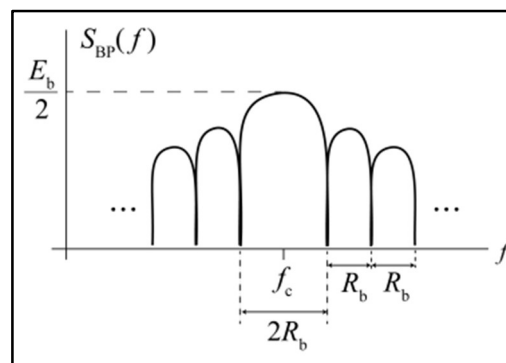
2.1.1.2 Densidade espectral de potência e Eficiência espectral para modulação BPSK

A Densidade Espectral de Potência (DEP) para um sinal BPSK é dada por (18)

$$S_s(f) = \frac{1}{4}[S_B(f - f_c) + S_B(f + f_c)] = \frac{E_b}{2} \text{sinc}^2[(f - f_c)T_b] + \frac{E_b}{2} \text{sinc}^2[(f + f_c)T_b], \quad (5)$$

onde S_B é a Densidade espectral do sinal BPSK em banda base. O esboço teórico da DEP de um sinal BPSK está representado pela Figura 3.

Figura 3 - DEP teórica (BPSK).



Fonte: (17).

A largura do lóbulo central é de $2R_b$, onde R_b é a taxa de bits. Considerando o lóbulo central como banda, a eficiência espectral para esse tipo de modulação pode ser calculada como

$$\rho = \frac{R_b}{B} = \frac{R_b}{2/T_b} = \frac{R_b}{2R_b} = 0,5 \frac{\text{bit/s}}{\text{Hz}}, \quad (6)$$

onde B representa a banda ocupada pelo sinal transmitido.

2.1.1.3 Probabilidades de erro na modulação BPSK

Devido a ser uma sinalização antipodal, a probabilidades de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) e a probabilidade de erro de símbolo (P_e) são iguais em um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise* - Ruído Branco Gaussiano Aditivo), sendo calculadas como

$$P_e = BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (7)$$

onde N_0 representa a densidade espectral de potência do ruído térmico no receptor dada em watts/Hz.

A modulação BPSK é uma das mais robustas entre todas as modulações existentes; no entanto, em um cenário com interferência adicional ao ruído, a probabilidade de erro calculada pela Equação 7 torna-se

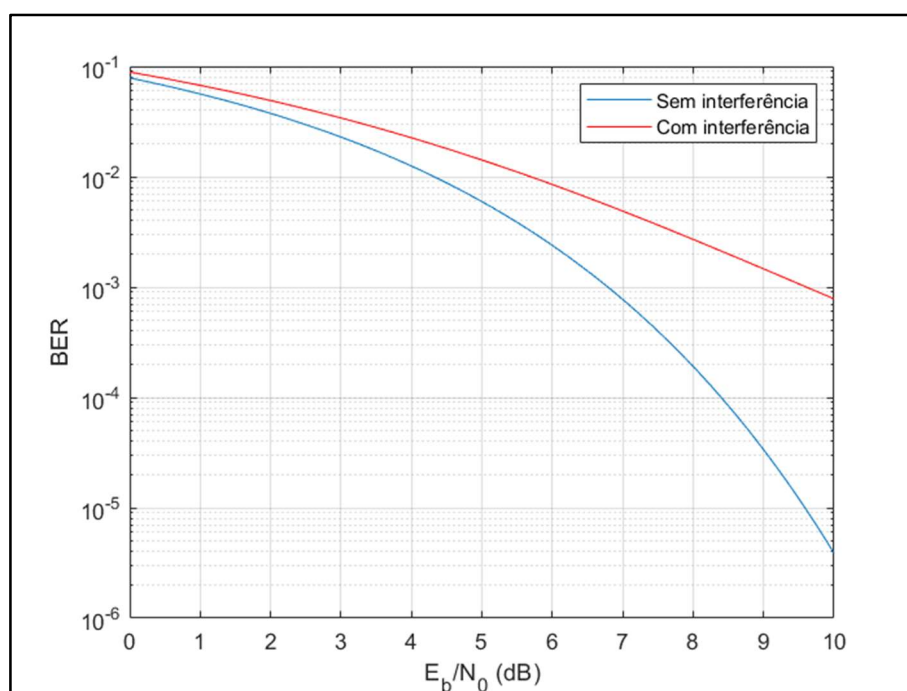
$$P_e = BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0 + J_0}} \right), \quad (8)$$

onde J_0 é a densidade espectral de potência média do sinal interferente na banda, também dada em watts/Hz.

Dependendo da intensidade da potência interferente na banda de operação do sinal BPSK, a comunicação pode sofrer uma degradação significativa. Para exemplificar essa queda de desempenho, a Figura 6 apresenta curvas de desempenho para o BPSK operando sem interferência e com interferência em função de E_b/N_0 . Para geração da curva de desempenho BPSK sem interferência (curva azul) foi utilizada a Equação 7; para geração da curva de desempenho em um cenário com interferência (curva vermelha) utilizou-se a Equação 8, considerando a energia média de bit igual a 1 joule e densidade de potência interferente igual a 0,1 watts/Hz, que simula um cenário no qual o sinal interferente tem potência dez vezes menor que aquela do sinal BPSK em sua banda de operação.

Analisando a Figura 4, é possível perceber que, em um ambiente com interferência (linha vermelha), ocorre um aumento na BER para qualquer valor de SNR (E_b/N_0 - Relação Sinal-Ruído), em comparação ao desempenho sem interferência (linha azul). Esse aumento torna-se mais significativo com o crescimento da SNR, uma vez que, para altos valores de SNR, apesar de a intensidade do ruído térmico ser baixa, a interferência externa afeta o sinal BPSK com a mesma densidade espectral de potência (0,1 watts/Hz).

Figura 4 - Curva de probabilidade de erro com e sem interferência.



Fonte: o autor.

Portanto, detectar interferências é crucial porque ela aumenta a BER, degrada a qualidade do sinal e reduz a capacidade de comunicação. Se esse efeito não for mitigado, o sistema precisaria de uma potência de sinal muito maior para atingir a mesma qualidade, o que tornaria a transmissão inviável, ineficiente e de pouca qualidade. Em ambientes reais, onde dispositivos podem compartilhar o mesmo espectro de frequência, entender e mitigar interferências se faz fundamental.

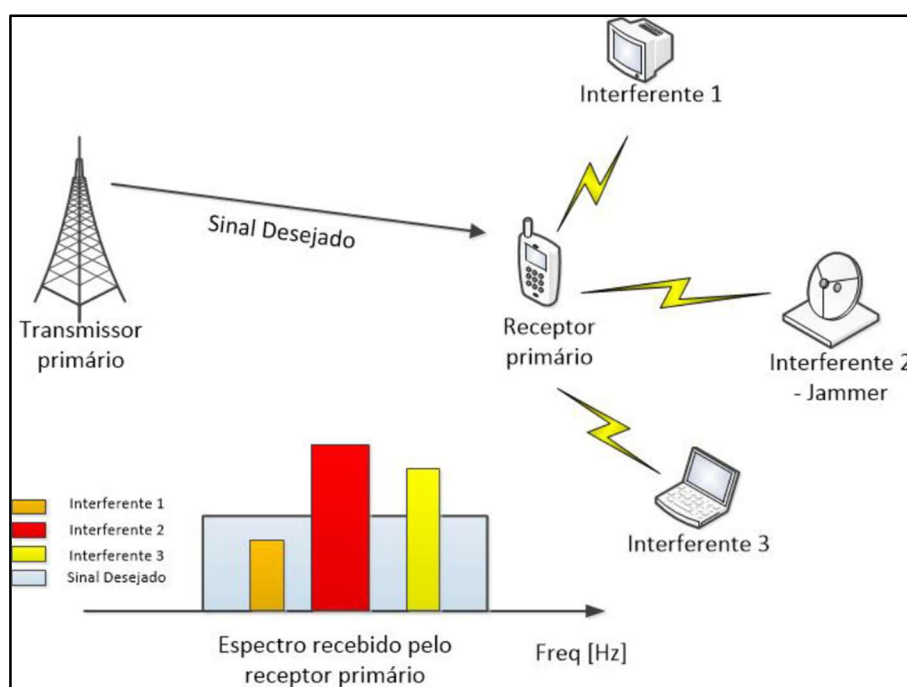
2.2 INTERFERÊNCIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES

Com o crescente avanço das tecnologias de transmissão de informação na área de telecomunicações, a interferência é um dos mais significativos problemas enfrentados nessa área. Ela pode ser definida como um sinal intruso, indesejado, dentro da faixa de operação de um determinado sistema de comunicação, ou seja, na região do espectro onde esta comunicação

está ocorrendo (17, 19). É preciso destacar que interferências indesejadas, também ocorrem em sistemas analógicos, contudo esses sistemas não serão abordados no presente trabalho.

Um parâmetro que precisa ser levado em conta em sistemas de telecomunicação é a sua qualidade. A qualidade de um sistema de comunicação está ligada a relação entre a potência de sinal desejado e a potência de ruído somada a interferências (SINR) captada no receptor dentro da banda de transmissão (19). Independentemente do tipo de interferência, haverá uma redução dessa relação, o que levará a uma degradação na qualidade de comunicação (19). A Figura 5 ilustra esse processo de interferência, na qual um receptor primário é prejudicado devido a sinais de outros aparelhos ao redor.

Figura 5 - Ilustração do processo de interferência em sistemas de telecomunicações.



Fonte: (19).

A fim de simplificação, as interferências podem ser separadas em 3 tipos: interferências elétricas, de intermodulação e de radiofrequência.

2.2.1 INTERFERÊNCIA ELÉTRICA

Na maioria das vezes são causadas por falhas ou problemas de manutenção em algum dispositivo elétrico-eletrônico ou até mesmo causas naturais como descargas elétricas. Esse tipo de interferência é mais fácil de ser solucionado. Além do mais, equipamentos que costumam causar esse tipo de interferência, não são concebidos para serem fontes de RF (19). Existem,

basicamente, três tipos de interferências elétricas: os ruídos gerados por sistemas elétricos, ruídos gerados por sistemas eletrônicos e a interferência de fontes naturais (19).

2.2.2 INTERMODULAÇÃO

A interferência por intermodulação ocorre quando duas ou mais componentes de sinal interagem em sistemas não lineares, como um amplificador de potência, resultando na criação de sinais adicionais que podem interferir nos sinais originais. Se difere da interferência de radiofrequência, pois é oriundo de um problema dentro da própria rede de comunicação, e não de uma outra fonte externa (19).

2.2.3 INTERFERÊNCIA DE RADIOFREQUÊNCIA

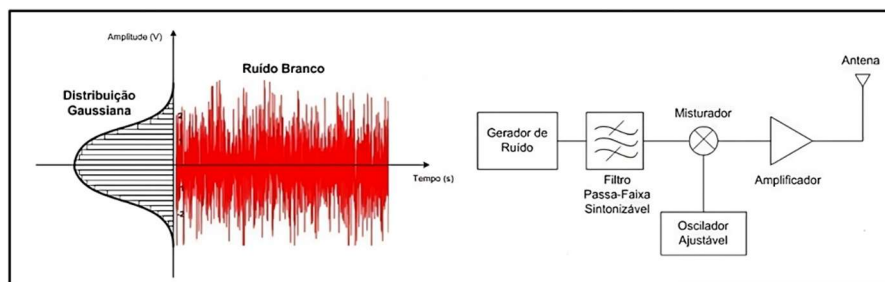
Sinais de radiofrequência na mesma frequência do sistema interferido ou em frequências próximas causam esse tipo de interferência. Sinais com potências muito elevadas próximos a sinais de telecomunicações, podem afetá-lo, degradando e diminuindo a qualidade da comunicação (19). Esses tipos de interferências podem ser intencionais ou não intencionais.

As interferências não intencionais são aquelas que geralmente estão associadas a falha na construção dos equipamentos e que inserem no espectro algum tipo de energia eletromagnética que não deveria estar ali. Em contrapartida, a interferências intencionais, também conhecidas como bloqueio ou *jamming*, são originadas propositalmente, com o objetivo de inviabilizar o estabelecimento de enlaces de comunicação em frequências específicas. Os próximos tópicos explicarão os principais tipos de bloqueio.

2.2.3.1 Bloqueio com ruído (*Noise Jamming*)

Esse tipo de bloqueio está ligado a degradação de um sistema de comunicação específico através de um sinal de ruído branco aleatório. Há a inserção desse ruído dentro da banda captada pelo receptor do sistema interferido. A Figura 6 ilustra um sinal de ruído branco AWG, bem como um exemplo em diagrama de blocos de um bloqueador desse tipo. O sinal interferente, neste caso, é gerado por um gerador de ruído artificial em banda base, seguido por um filtro com largura de banda configurável. Em seguida, o sinal é transladado para a banda passante utilizando um oscilador ajustável, amplificado e direcionado para a antena de transmissão (19).

Figura 6 - Representação de um Ruído branco (esquerda) e de um bloqueador por ruído (direita).



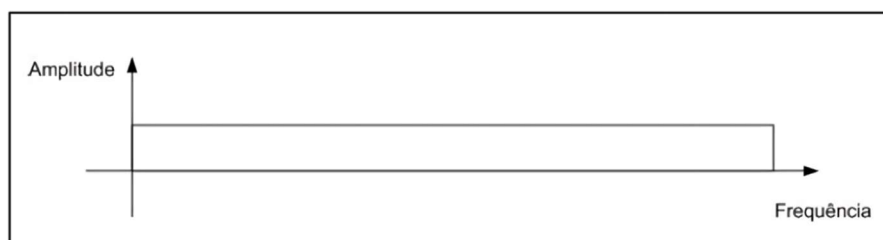
Fonte: (19).

O bloqueio com ruído pode ser realizado de três formas se considerado a ocupação de banda do sinal no espectro eletromagnético: bloqueio com ruído em banda larga, em parte da banda e em banda estreita.

2.2.3.2 Bloqueio com ruído em banda larga (BBN - *Broadband Noise Jamming*)

Nesse tipo de bloqueio, o sinal de bloqueio é irradiado em todo o espectro de comunicação de interesse, cobrindo assim, várias frequências e canais. Devido a isso, esse sinal pode até mesmo interferir em outros sistemas que não se deseja interferir (19, 20). A Figura 7 ilustra o espectro de um bloqueio BBN.

Figura 7 - BBN: espectro do bloqueio.



Fonte: (19).

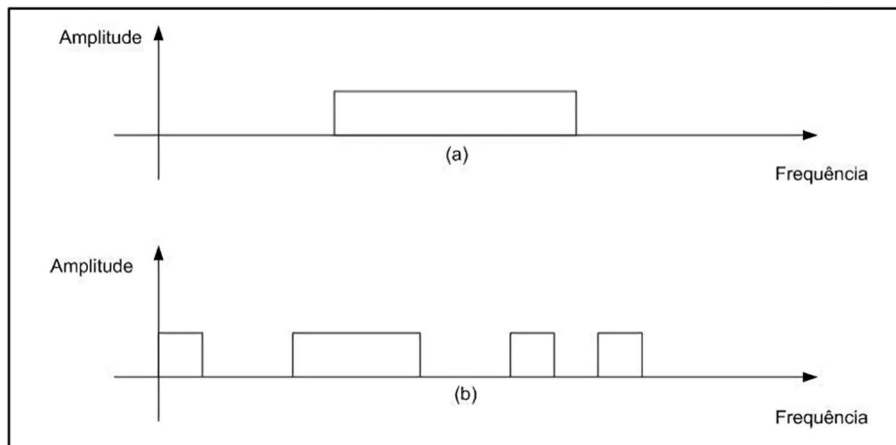
Devido ao espalhamento do sinal de bloqueio, o valor da densidade espectral de potência é baixo se comparado com outros tipos de sinais de bloqueio com ruído. Visto que a potência interferente está espalhada em uma ampla faixa espectral, a densidade de potência observada pelo alvo pode ser insuficiente para interromper sua operação (19).

2.2.3.3 Bloqueio com ruído em parte da banda (PBN - *Partial - Band Noise Jamming*)

O bloqueio PBN envolve a transmissão de um sinal de interferência em uma parte da banda de frequência do sistema de comunicação alvo. O sinal é inserido em múltiplos canais

do espectro e esses canais podem ser contínuos ou alternados. A Figura 8 mostra esses sinais para os dois tipos de canais.

Figura 8 - Espectro PBN em canais contínuos (a) e canais alternados (b).



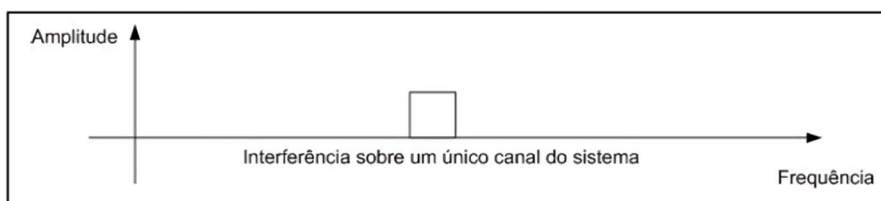
Fonte: (19).

Se comparado ao BBN, o modelo PNB aumenta a densidade espectral de potência interferente para uma mesma potência transmitida, o que interferirá e prejudicará mais o sistema a ser interferido, caso ele opere em um dos canais interferidos.

2.2.3.4 Bloqueio com ruído em banda estreita (NBN - *Narrow-Band Noise Jamming*)

Nessa técnica, o sinal de bloqueio afeta somente uma faixa estreita da banda de frequência de um sistema de comunicação, ou seja, apenas um canal. O espectro NBN pode ser visto pela Figura 9.

Figura 9 - Espectro do NBN.



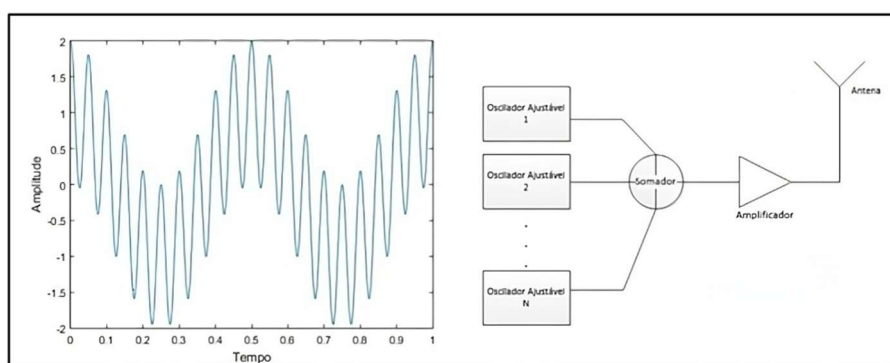
Fonte: (19).

Se comparado aos outros dois modelos de bloqueio de ruído, esse é o que apresenta o maior valor de densidade espectral de potência justamente por ter uma largura de banda estreita do sinal de bloqueio. Essa característica é importante pois prejudica e degrada ainda mais o sinal a ser interferido quando este se encontra na largura de frequência específica em que o bloqueador está atuando.

2.2.3.5 Bloqueio por tom (*Tone Jamming*)

Esse tipo de bloqueio envolve a transmissão de um ou mais tons colocados especificamente em valores de frequências programados. A posição espectral e quantidade de tons inseridos influenciarão no desempenho desse tipo de bloqueio. Sendo assim, um tom é um sinal de largura de banda extremamente estreita. Essa técnica pode ser implementada com tons simples ou múltiplos tons. A Figura 10 mostra um bloqueio por tom no domínio do tempo e um exemplo de um bloqueador do tipo tom. Nesse caso, vários tons de diferentes frequências são somados, amplificados e direcionados para a antena de transmissão.

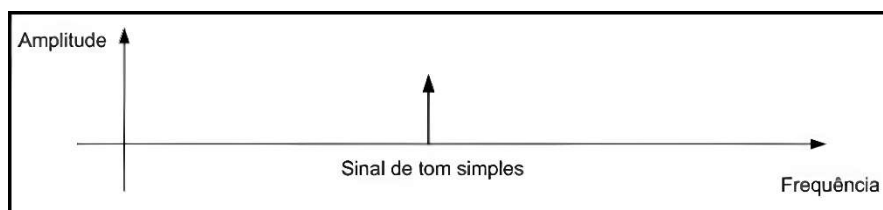
Figura 10 - Sinal de bloqueio tipo tom e um bloqueador do tipo tom.



Fonte: (18).

Se tratando de bloqueio de tom simples, o sinal apresenta uma única frequência no espectro a ser interferido. Dessa forma, é classificado como um tom simples de onda contínua (*cw – continuous wave*). Seu espectro pode ser observado pela Figura 11.

Figura 11 - Espectro do bloqueio por tom simples.

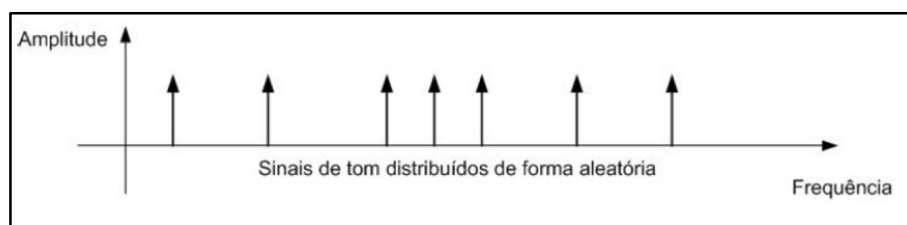


Fonte: (18).

O bloqueio por tom simples também pode ser chamado de bloqueio pontual (*spot jamming*). É um método de fácil implementação, já que é preciso apenas de um oscilador na frequência desejada e um amplificador de RF.

O bloqueio por múltiplos tons, por sua vez, usa de múltiplos tons de onda contínua adicionados no espectro a ser interferido, seja de forma aleatória ou em frequências específicas. Bloqueio por pente (*comb jamming*) é o nome dado quando os tons são inseridos em canais consecutivos. A Figura 12 exemplifica o espectro desse tipo de bloqueio.

Figura 12 - Espectro do bloqueio por múltiplos tons.



Fonte: (18).

Se comparado a técnica de bloqueio por tons simples, essa técnica consegue aumentar a probabilidade de se atingir a condição de bloqueio caso não se conheça o canal alvo. Todavia, sua implementação requer uma maior complexidade, visto que o bloqueador precisará de mais de um tipo de osciladores de frequência para gerar o sinal.

2.2.3.6 Bloqueio por Varredura (*Swept Jamming*)

É uma técnica de interferência que consiste em deslocar toda a potência de um bloqueador de uma frequência para outra. Esse movimento, chamado varredura, interfere em múltiplas frequências em rápida sucessão, embora não em todas ao mesmo tempo. Em outras palavras, o sinal de banda estreita é varrido no tempo ao longo da banda de frequência de interesse. A cada instante, apenas uma frequência central e a região em sua volta estão ocupadas com o sinal de bloqueio (19). Como é um processo dinâmico e se repete ao longo da banda de frequência, seus valores de largura de banda dependem do ajuste da amplitude do sinal oscilador controlado por tensão (VCO).

2.2.3.7 Bloqueio por pulso (*Pulse Jamming*)

Nesse tipo de bloqueio, o sinal bloqueador é inserido no espectro de frequência de interesse em forma de pulsos intermitentes que tem duração definida através do ciclo de atividade do dispositivo bloqueador construído com essa técnica. A grande vantagem dessa técnica é que ela utiliza um nível médio de potência menor que o das outras técnicas discutidas, podendo ser tão eficiente quanto elas em inviabilizar a comunicação (19).

2.2.3.8 Bloqueio seguidor (*Follower Jamming*)

Essa técnica visa perturbar a comunicação ao acompanhar e imitar os sinais em interesse. Consiste em monitorar os canais de comunicação e ajusta sua interferência para coincidir com os sinais transmitidos, dificultando a detecção e decodificação pelos receptores legítimos (19, 21).

Não existe um bloqueador perfeito, um ideal que atenda a todos as situações com qualidade e desempenho ótimo. Cada situação exige uma análise específica de caso para escolher o melhor tipo de bloqueador e o melhor método a ser adotado (22).

Nesse processo de escolha do melhor bloqueador, três informações precisam ser levadas em conta: a frequência que o sistema de comunicação que será interferido opera, a banda ocupada por ele e a relação SNRI mínima que o sistema interferido necessita para operar adequadamente. A partir disso, a escolha da melhor técnica de bloqueio se tornará mais eficaz e garantirá que, de fato, o sinal alvo será bloqueado. Quando não há todas essas informações disponíveis, uma análise mais aprofundada precisa ser feita para estimar o melhor tipo de bloqueio, e, algumas vezes até alguns testes com diferentes bloqueadores (19).

Os conceitos teóricos sobre interferências abordados nesta seção serão utilizados para viabilizar a implementação de um sistema interferidor em SDR.

2.3 MODO CONVENCIONAL DE DETECÇÃO DE INTERFERÊNCIAS

Grandes empresas de telecomunicações utilizam equipamentos sofisticados e caros para a detecção de interferências. Esses dispositivos são essenciais para garantir a integridade e a eficiência das comunicações.

Os equipamentos mais usuais no processo de localização de interferências são

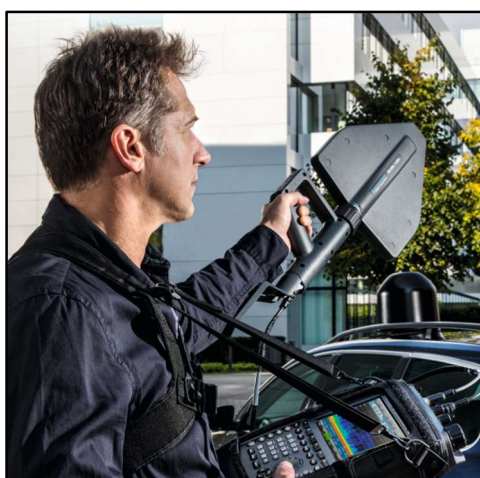
- **Analisadores de Espectro:** Dispositivos que medem e analisam a distribuição de frequências de sinais. Costumam ser volumosos e caros, exigindo operadores treinados para a correta interpretação dos dados.
- **Sistemas de Varredura de Frequência:** São utilizados para detectar interferências em redes de comunicação. Esses sistemas são complexos e frequentemente requerem instalação fixa devido ao seu tamanho e peso.
- **Detectores de Interferência de Rádio Frequência (RF):** Embora portáteis, a maioria desses equipamentos são pesados, caros e de difícil manuseio, sendo usados para identificar fontes de interferência em ambientes industriais.

- Antenas: São essências para a detecção, pois direcionam a emissão de sinal ou concentram a irradiação na recepção. É o equipamento intermediário entre o meio de propagação e os equipamentos de medição.

Os principais desafios relacionados ao uso desses tipos de equipamentos são custo, manuseio e treinamento (23,24). Primeiro, esses equipamentos podem custar dezenas de milhares de reais, representando um investimento alto e significativo para qualquer empresa. Segundo, devido ao tamanho e complexidade, o transporte e a operação desses dispositivos são complicados. A logística necessita de operadores especializados. Por fim, esses operadores precisam de treinamento específico para usar os equipamentos de forma eficaz, o que gera custos adicionais.

Existem diversos equipamentos no mercado e cada um com sua especialidade baseada na sua operação. Como exemplo, cita-se o Rohde&Schwarz FSW, um analisador de espectro de altíssima performance, conhecido por sua precisão e capacidade de análise detalhada, mas também pelo seu alto custo e necessidade de operadores especializados (25). Outro exemplo seria o analisador de espectro portátil, Tektronix RSA500 (26), que apesar de ser mais fácil de transportar, ainda requer conhecimento técnico avançado para operação. Um outro exemplo mais sofisticado é o R&S MNT100, ilustrado na Figura 13, um equipamento dedicado à localização de interferências. Ele vem equipado com uma antena log-periódica de faixa larga (700 MHz a 6 GHz) e incorpora tecnologia avançada de processamento espectral em tempo real por meio de FFT (*Fast Fourier Transform*).

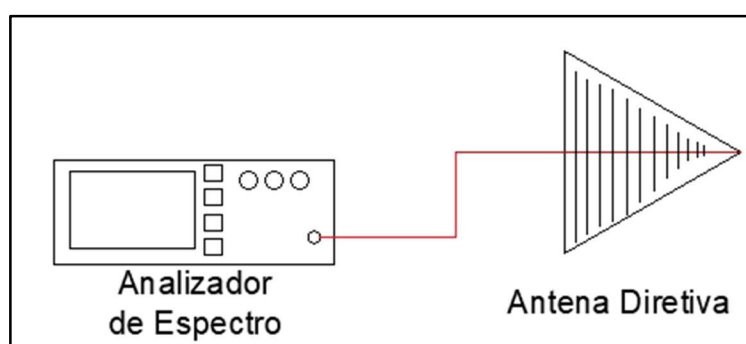
Figura 13 – Localização de Interferências com equipamento R&S MNT100.



Fonte: (25).

De forma geral, para identificar a posição de um sinal interferente, o analisador de espectro, ou um equipamento dedicado para esta finalidade, capta o sinal de interesse utilizando uma antena altamente direcional. Esse sinal é então processado pelo equipamento, que, por meio de gráficos de DEP, análise espectral em cascata e monitoramento de nível, auxilia na determinação da direção da interferência. A direção do interferente é considerada como sendo aquela em que a antena direcional apontada registra a maior potência captada. A Figura 14, demonstra, de forma esquemática e simplificada, a montagem prática para a captação de um sinal interferente.

Figura 14 - Esquemático do modo usual de detecção de interferências.



Fonte: o autor.

Com base em toda a complexidade em se obter, montar e operar um sistema identificador de interferência, vê-se uma necessidade no mercado de sistemas detectores de interferência que sejam de baixo custo, fáceis de manusear e operar.

2.4 SENSORIAMENTO DO ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO

Tendo em vista os problemas já levantados sobre o efeito da interferência em sistemas de comunicação sem fio, se faz necessário uma boa técnica de detecção, a fim de mitigar o problema.

A detecção de um determinado sinal em ruído pode ser formulada como um clássico problema de detecção binária. O detector terá que decidir entre duas possíveis hipóteses: na primeira, hipótese nula H_0 , representa um cenário livre de interferências. Na segunda, hipótese H_1 , representa o cenário onde um jammer está presente. A saída de uma simples antena $y(t)$ tem informação suficiente para detectar o jamming em ambas as hipóteses (27). Sendo

$$\begin{cases} H_0: y(t) = n(t) & \text{Ausencia de interferência} \\ H_1: y(t) = h(t)x(t) + n(t) & \text{Presença de interferência} \end{cases} \quad (9)$$

onde $y(t)$ é o sinal capturado, $n(t)$ representa o ruído térmico no receptor, $h(t)$ é o ganho ou atenuação no sinal devido ao canal de transmissão e $x(t)$ representa o sinal interferente. Quando não houver nenhum sinal, o sinal $y(t)$ será composto apenas de ruído, se não, será composto pelo sinal interferente ponderado pelo ganho ou atenuação do canal somado ao ruído (28).

É preciso definir um limiar de decisão (γ) e uma variável de decisão (T) sobre a ocupação espectral para que se consiga realizar o processo de decisão. A variável T é gerada pelo processamento do sinal $y(t)$ e irá depender da técnica que será utilizada no processamento. Caso $T > \gamma$, considera-se que o sinal interferente está presente. Caso contrário, o espectro é considerado livre (28).

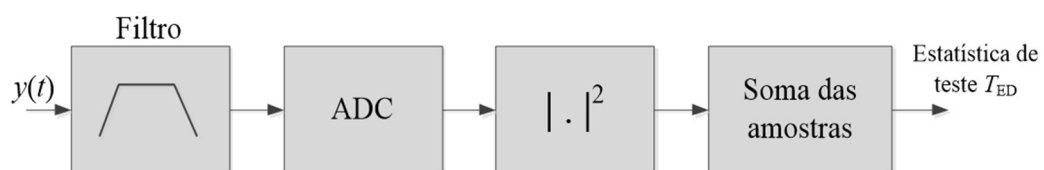
Existem diversas técnicas para se fazer o sensoriamento espectral. Dentre as eles, pode-se citar a detecção por filtro casado, a detecção ciclo-estacionária, a detecção por autovalores e a técnica de detecção por energia (28). Neste projeto, serão utilizados os conceitos de sensoriamento por detecção de energia para auxiliar na identificação da direção de emissão do sinal interferente.

2.4.1 SENSORIAMENTO ESPECTRAL USANDO DETECÇÃO DE ENERGIA

Esse trabalho se limitou a fazer as análises espectrais usando a técnica de detecção de energia, pois é uma técnica de baixa complexidade de implementação se comparado a outras técnicas. É preferível optar por esta técnica quando, por exemplo, não se tem nenhum conhecimento prévio do sinal de transmissão. A detecção da presença ou não do sinal é feita com base no monitoramento da energia medida no canal.

A Figura 15 mostra o diagrama em blocos para a implementação da técnica de detecção de energia no domínio do tempo.

Figura 15 - Técnica de Detecção de energia: Diagrama de Bloco no domínio do tempo.



Fonte: (28).

Observa-se que, inicialmente utiliza-se um filtro passa-faixa centralizado na frequência do canal que será utilizado na transmissão. Esse sinal filtrado é então convertido para frequências mais baixas e é digitalizado através de um conversor analógico para digital (ADC). As amostras geradas por esse processo passarão por um dispositivo capaz de fazer uma elevação quadrática, para então ser calculada a variável estatística de decisão T_{ED} de acordo com a equação

$$T_{ED} = \sum_{i=1}^n |y(i)|^2, \quad (10)$$

cujas variáveis n e $y(i)$ são o número total de amostras coletadas e a i -ésima amostra digitalizada e coletada. Após se calcular a T_{ED} , é realizada uma comparação de seu valor com γ para que seja feita a tomada de decisão entre as hipóteses H_0 ou H_1 .

Na ausência ou presença de sinal na banda sensoriada, a variável de decisão possuirá uma distribuição qui-quadrado com n graus de liberdade. Se considerar o número de amostras n suficientemente grande, e utilizando o Teorema do Limite Central, a variável em questão poderá ser aproximada para uma variável aleatória gaussiana,

$$\begin{cases} T_{ED} = N(n\sigma_w^2, n\sigma_w^4) & \text{sob a hipótese } H_0 \\ T_{ED} = N(n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2), n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2) & \text{sob a Hipótese de } H_1. \end{cases} \quad (11)$$

onde σ_s^2 é a variância do sinal desejado e σ_w^2 é a variância do ruído branco.

Assim, as probabilidades de falso alarme e de detecção podem ser resolvidas numericamente ficando dadas respectivamente por

$$P_{FA} = \Pr(T_{ED} > \gamma | H_0) = Q\left(\frac{\gamma - n\sigma_w^2}{\sqrt{n\sigma_w^4}}\right), \quad (12)$$

e

$$P_D = \Pr(T_{ED} > \gamma | H_1) = Q\left(\frac{\gamma - n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)}{\sqrt{n(\sigma_s^2 + \sigma_w^2)^2}}\right), \quad (13)$$

nas quais $Q(*)$ é a função Q, usada para resolução de problemas envolvendo integral numéricas de área em distribuições gaussianas. O limiar de decisão γ pode ser obtido de forma empírica,

verificando o nível de energia com canal livre e configurando um limiar ligeiramente superior a esse para detectar interferências. Alternativamente, γ pode ser calculado teoricamente por

$$\gamma = \sigma_w^2(Q^{-1}(P_{FA})\sqrt{n} + n) , \quad (14)$$

Os conceitos de sensoriamento do espectro apresentados nesta seção serão utilizados como suporte para a implementação do sistema proposto de detecção e localização de interferências de RF.

2.5 ESPECTRO DE UM SINAL DIGITALIZADO

Um conceito fundamental para o desenvolvimento do sistema proposto é a análise espectral de um sinal digitalizado, essencial para identificar e caracterizar os sinais sob análise. O processo para se obter o espectro de um sinal digitalizado, ou seja, analisar suas componentes de frequência, precisa seguir, resumidamente, algumas etapas importantes (29).

A primeira etapa consiste na captura e digitalização do sinal de interesse, que, no nosso caso, será realizada por um SDR. É necessário capturar o sinal contínuo em intervalos regulares com uma frequência de amostragem f_s adequada, conforme o Teorema de Nyquist. Segundo o teorema, f_s deve ser, no mínimo, o dobro da maior frequência presente no sinal (f_{max}), garantindo que a informação do sinal original seja preservada nesse processo.

Após essa etapa, começa o pré-processamento. Nele, o sinal digitalizado pode passar por processos como filtragem, janelamento e *zero-padding* para melhorar a qualidade do espectro eletromagnético.

Dado o sinal pré-processado, é preciso aplicar o cálculo de transformada, seja a Transformada Discreta de Fourier (DFT) ou a Transformada rápida de Fourier (FFT). É nessa etapa que se obtém o espectro do sinal. Especificando a FFT, é preciso fazer essa operação em N pontos nas amostras capturadas. Essa operação matemática é importante pois é nela que o sinal no domínio do tempo é convertido para o domínio da frequência. A expressão para esse processo é

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] * e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad (15)$$

onde $X[k]$ é o coeficiente da FFT correspondente à frequência k , $x[n]$ é a amostra do sinal do instante n , e $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ é o fator de rotação complexa, que faz o mapeamento das amostras de tempo para o domínio da frequência.

Para calcular a densidade de potência em cada ponto dessa FFT, é preciso calcular o módulo dos valores de FFT de acordo com a expressão

$$|X[k]| = \sqrt{\Re(X[k])^2 + \Im(X[k])^2}. \quad (16)$$

A densidade espectral de potência será proporcional ao quadrado da magnitude dessa FFT, normalizada pelo número de pontos amostrais N , conforme

$$DEP[k] = \frac{|X[k]|^2}{N}. \quad (17)$$

Para converter para decibéis, basta aplicar logaritmo, como em

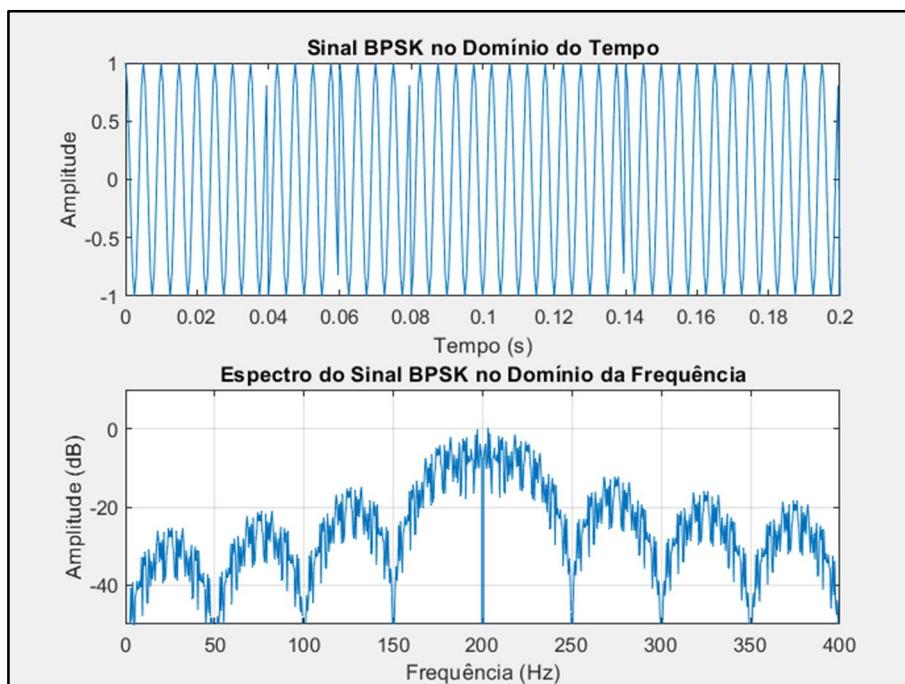
$$DEP_{dB}[k] = 10 \log_{10}(DEP[k]). \quad (18)$$

As frequências que correspondem aos pontos da FFT são calculadas de acordo com

$$f[k] = \frac{k}{N} f_s. \quad (19)$$

A Figura 16 mostra, a nível de exemplificação, um sinal simulado BPSK hipotético, com frequência central de 200 Hz e taxa de bit de 50 bits/s, no domínio do tempo (em cima) e a sua DEP (em baixo).

Figura 16 - Sinal BPSK no domínio do tempo e no domínio da frequência.



Fonte: O autor.

Destaca-se que uma das funcionalidades mais importantes do sistema de localização de interferência proposto neste trabalho é a obtenção, em tempo real, da densidade espectral de potência por meio da FFT, visando oferecer uma ferramenta adicional para identificação e caracterização de interferências de RF.

2.6 RÁDIO DEFINIDO POR *SOFTWARE*

Uma vez determinadas as técnicas de processamento digital de sinais a serem usadas no sistema proposto, é preciso selecionar uma plataforma de *hardware* capaz de comportá-las e executá-las. Os sistemas de telecomunicações tradicionais utilizam *hardware* dedicado, com componentes como filtros de RF e osciladores ajustados para operar em uma única frequência fixa e específica. Esse tipo de arquitetura, embora eficiente para certas aplicações, não é a plataforma ideal para um sistema que precisa cobrir uma faixa ampla de frequências, pois cada ajuste de frequência ou função adicional exige modificações físicas no *hardware*, elevando os custos e limitando a flexibilidade (30).

Uma alternativa para tornar o acesso ao espectro mais flexível e dinâmico é o uso de rádios definidos por *software* (SDRs), que são transceptores configuráveis versáteis, de baixo custo e são sintonizáveis até alguns giga-hertz de operação, dependendo do modelo. Com os SDRs, funções como filtragem e ajuste de frequência são realizadas por *software*, permitindo

que o mesmo equipamento opere em diferentes frequências realizando diferentes funções apenas com mudanças de código. Essa flexibilidade não só facilita a adaptação a novas necessidades, mas também reduz significativamente os custos com reprojeto, já que ajustes e atualizações podem ser feitos rapidamente sem a necessidade de substituir o *hardware*.

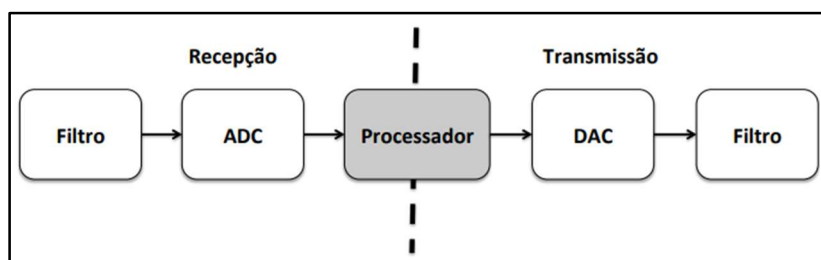
Os SDRs estão sendo amplamente aplicados em diversos domínios, desde sistemas mais básicos de rádio universais de baixo custo até sistemas mais robustos e flexíveis para redes de computadores e telecomunicações. Em mercados cuja interoperabilidade é um requisito obrigatório, como em aplicações de cunho militar e de segurança pública, a maioria dos transceptores e estações base utiliza SDR. Além disso, eles também estão sendo utilizados para diminuir custos para operadores de telecomunicações. Por exemplo, a empresa China Mobile adota o C-RAN, que é uma estação base de comunicações móveis que utiliza da tecnologia SDR para fazer todo o seu processamento de dados em servidores em nuvens, facilitando atualizações nas funções de rede. Ao mesmo tempo, a arquitetura mais simples reduz o consumo de energia (30).

Diversos grupos de pesquisas na área de telecomunicações começaram a usar os SDRs em suas pesquisas e listas de equipamentos de ensino e prática, pois ele diminui os custos. Dessa forma, experimentos que antes só eram possíveis em laboratórios de grandes empresas e centros tecnológicos, podem ser feitos em laboratórios universitários com custos razoáveis (30).

Apesar de todas as vantagens do SDR, existem desvantagens também, como desempenhos inferiores se comparado a sistemas circuitais específicos para uma determinada transmissão, uso de energia maior em alguns casos e, algumas vezes, a segurança pode ser comprometida em níveis mais baixos dos protocolos (30). Contudo, nenhuma dessas desvantagens é suficientemente relevante se comparada a todas as vantagens do SDR para a implementação desse trabalho.

2.6.1 ARQUITETURA BÁSICA DE UM SDR

Figura 17 - Arquitetura simplificada de um SDR.



Fonte: (30).

A Figura 17 exemplifica uma arquitetura básica de um SDR que pode agir tanto como um transmissor, quanto um receptor. É preciso notar que o conversor analógico para digital (ADC), o conversor digital para analógico (DAC) e os filtros de frequência são componentes implementados em *hardware*. Todas as outras operações do transceptor podem ser realizadas por unidades de processamento programáveis, ou seja, em *software*. Essa unidade de processamento pode empregar CPUs de propósito geral, FPGAs, processadores de sinais DSP ou até lógica discreta.

2.6.2 COMPARATIVO ENTRE DIFERENTES PLATAFORMAS DE SDRs

Com o objetivo de selecionar um *hardware* adequado para a implementação do sistema de detecção e localização de interferência de baixo custo, foi feita uma análise comparativa das principais características dos SDRs: RTL-SDR, HackRF One, e USRP N210.

O RTL-SDR é o mais acessível, estando em uma faixa de 20 a 50 dólares (30). Seu preço o torna uma das primeiras escolhas para aqueles que querem aplicações mais simples, sendo capaz de receber sinais na faixa de 500 kHz até 1.75 GHz, com largura de banda instantânea de 3.2 MHz. É importante ressaltar que suas aplicações estão ligadas, somente, a recepção e não transmissão de sinais (24).

O HackRF One é o SDR de médio custo, estando em uma faixa de 300 a 500 dólares (31). Muito utilizado em transmissão de sinais, esse rádio é capaz de operar em uma ampla faixa de frequência (1 MHz até 6 GHz) com banda de 20 MHz. Com *hardware* e *software Open-source*, esse dispositivo é muito procurado por desenvolvedores de projetos mais elaborados de transmissão e recepção, entusiastas de rádio amador e profissionais de segurança da informação (32).

O USRP N210, por sua vez, é um rádio de custo mais elevado, em uma faixa de 1700 a 2000 dólares (31). A frequência de operação é de 0 Hz até 6 GHz, dependendo da placa transceptora acoplada ao módulo principal, e opera com banda máxima de 50 MHz. É utilizado, geralmente, em aplicações de pesquisa e desenvolvimento profissionais. Esse rádio é versátil e pode ser usado em uma ampla faixa de aplicações, desde comunicações sem fio até mesmo em radares e sistemas de medições (33, 34).

A Tabela 1 mostra uma síntese comparativa das principais características de cada um dos SDRs citados.

Tabela 1 - Características gerais de diferentes SDRs.

Característica	RTL-SDR (RTL2832U)	HackRF One	USRP N210
Faixa de Frequência	500 kHz – 1.75 GHz	1 MHz – 6 GHz	0 Hz – 6 GHz (com módulos)
Capacidade	Somente recepção	Transmissão e recepção	Transmissão e recepção
Resolução de Amostragem	Até 3.2 MSPS	Até 20 MSPS	Até 50 MSPS
Ganho Máximo	50 dB	70 dB	31.5 dB
Custo Aproximado	US\$ 20 – US\$ 50	US\$ 300 – US\$ 500	US\$ 1.700 – US\$ 2.000
Potência de Transmissão máxima	USB	USB	Gigabit Ethernet
Interface de Conexão	N/A (não transmite)	Até 15 dBm	Até 20 dBm

Fonte: O autor.

2.6.3 SDRS SELECIONADOS PARA O PROJETO

Considerando a necessidade de selecionar um SDR adequado para a implementação do sistema de identificação e localização de interferência e levando em conta que as fases deste projeto também incluem a validação do sistema proposto por meio de um gerador de interferência de RF, que também deverá ser implementado, é necessário escolher dois SDRs para essas duas funções distintas.

Foi decidido que a plataforma HackRF One será usada para implementação do gerador de interferências, já que é capaz de transmitir e receber sinais, ainda que em modo *half-duplex*. Com uma largura de banda de até 20 MHz e potência de transmissão de até 15 dBm, o HackRF One oferece especificações suficientes para os testes práticos planejados. Uma vantagem adicional é sua alimentação via USB, o que permite realizar testes em locais sem acesso a fontes de energia fixa, sendo mais conveniente do que alternativas como o USRP N210, que requer fonte externa.

Para o sistema de detecção de interferências, o RTL-SDR foi o selecionado, visto que apenas a recepção de sinais é necessária para esta aplicação e devido ao seu baixo custo e portabilidade. Embora o RTL-SDR tenha limitações na frequência de operação (500 kHz a 1.75 GHz) e largura de banda (até 3.2 MHz), ele ainda abrange grande parte das faixas utilizadas em serviços de telecomunicações, como rádio, TV e alguns sistemas celulares. É importante

menção que o protótipo será desenvolvido principalmente em *software* e proporcionará a flexibilidade para substituição futura por um *hardware* mais robusto, caso seja necessário ampliar a faixa de operação do sistema. A Figura 18 apresenta os dois SDRs selecionados para o projeto.

Figura 18 - SDRs utilizados no projeto: HackRF One e RTL-SDR.



Fonte: (27).

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho teve por finalidade desenvolver um detector de interferências de RF para sistemas de telecomunicações. Com esse propósito, a metodologia desse projeto se embasou em pesquisas teórica sobre o tema abordado, simulações teórico-práticas e, por fim, implementação dos códigos no SDR via GNU Radio® e MATLAB®. Almeja-se desenvolver um novo projeto, de baixo custo, capaz de realizar uma detecção eficiente de interferências de RF. Além disso, espera-se, com os resultados obtidos, avaliar a qualidade do sistema de detecção proposto por meio de testes práticos que serão apresentados.

3.1 MATERIAIS

Dados os objetivos específicos da parte 1 e 2 do PFC, estimou-se a utilização dos seguintes recursos:

- Acesso e utilização dos equipamentos do Laboratório de Informática – UFU Patos de Minas, bloco Alpha. *Softwares* como Matlab® e GNU Radio® instalados nas máquinas do laboratório de informática serão utilizados como base para as simulações e levantamento de cálculos teóricos e práticos;
- Acesso e utilização de componentes e equipamentos do Laboratório de Eletrônica – UFU Patos de Minas, bloco Major Jerônimo.
- Utilização do SDR HackRF One e da antena VERT900 (omnidirecional) para implementação de um sistema de geração de interferência intencional, que será utilizado na validação prática do sistema de detecção proposto no trabalho.
- A obtenção do SDR-RTL modelo V3 e da antena direcional HT8 (Log-periódica), utilizados na implementação do sistema e nos testes práticos, que serão disponibilizados pelo orientador do projeto.
- Dois notebooks serão utilizados para implementar e executar tanto o gerador de interferência quanto o sistema principal proposto para localização de interferências.
- Analisador de espectro para validação prática e comparação de desempenho do sistema proposto

- Desenho de um transferidor de 360° para os testes práticos de localização de direção do interferente.

3.2 MÉTODOS

Para alcançar os objetivos propostos, iniciou-se um estudo teórico baseado em artigos, livros e dissertações que fundamentam e possibilitam a implementação. Os estudos partiram de conceitos gerais dos sistemas de telecomunicação, focando em modulações BPSK. Após, estudos sobre interferência e técnicas de detecção por energia foram essenciais para basear o sistema criado.

Após o estudo da parte teórica, foi construído um sinal interferente através do *software* GNU-Radio® e do SDR HackRF One. Pelo *software* MATLAB®, um código foi criado para a identificação e localização de um sinal interferente através de um SDR-RTL e a Antena HT8.

A validação do sistema criado foi feita a partir de testes práticos que objetivavam detectar a posição de maior potência e energia do sinal interferente. Em todos os testes os mesmos equipamentos foram usados, somente mudando as disposições e os valores configuráveis do sinal interferente.

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTAÇÕES PRÁTICAS

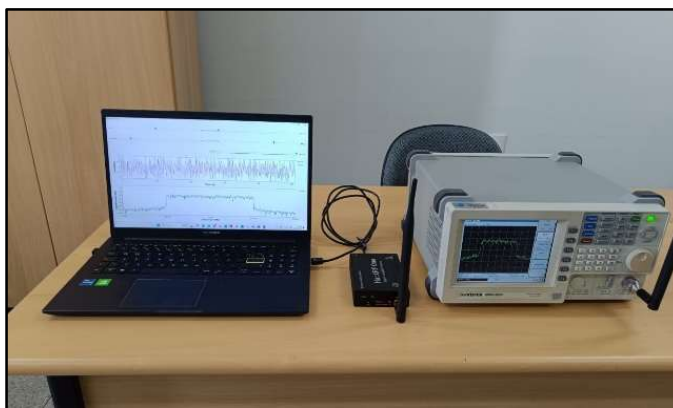
Neste capítulo, serão apresentadas as implementações práticas desenvolvidas para alcançar os objetivos especificados para este projeto final de curso. Serão detalhados os dois sistemas desenvolvidos: (i) o gerador de sinal interferente e (ii) o sistema de identificação e localização de interferência de RF.

4.1 GERADOR DE SINAL INTERFERENTE

Este projeto tem como foco o desenvolvimento de um sistema completo de identificação e localização de sinais interferentes. Para isso, é essencial o uso inicial de um gerador controlado de interferências de RF, também implementado neste trabalho. Com o gerador, torna-se possível avaliar o desempenho do sistema de detecção em condições próximas às reais, garantindo sua capacidade de identificar sinais em diferentes cenários. Esse processo de geração de interferências permite testar a robustez e precisão do sistema, proporcionando uma análise mais completa e confiável de sua eficácia na identificação de interferências de RF.

O gerador de interferência desenvolvido consiste em uma antena omnidirecional VERT900, com ganho de 3dBi, conectada a um SDR HackRF One, que, por meio de uma interface USB, se liga a um notebook executando o *software* GNU RADIO® e a aplicação de geração de interferências. A Figura 19 ilustra o sistema gerador em operação, emitindo um sinal interferente que é captado por um analisador de espectro.

Figura 19 - Gerador de interferência de RF emitindo um sinal capturado pelo analisador de espectro.

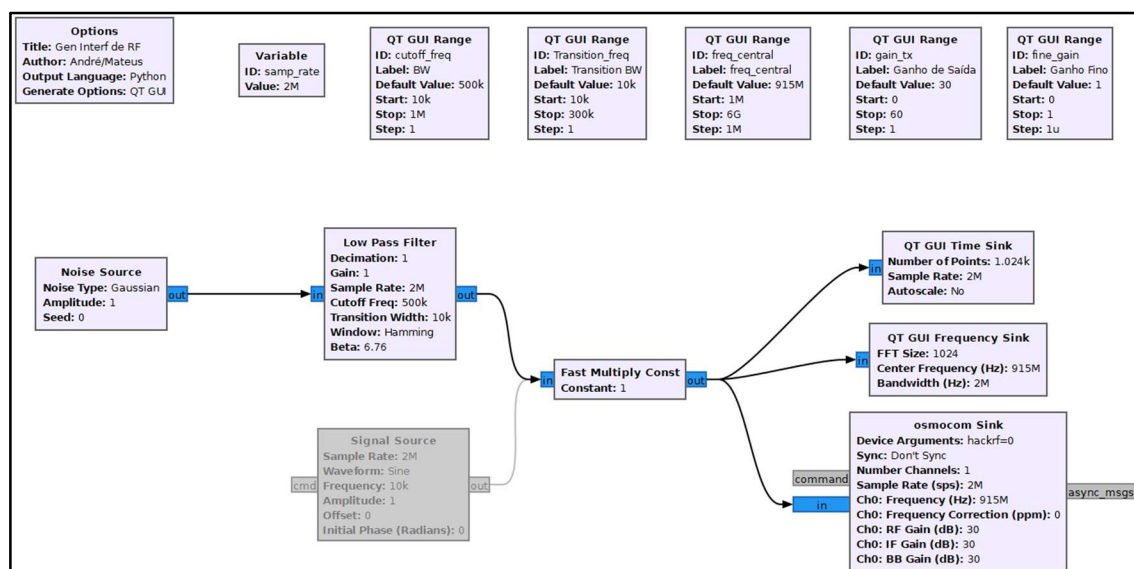


Fonte: O autor.

O GNU Radio® foi a plataforma de desenvolvimento escolhida para implementar o gerador de interferências devido à sua flexibilidade, configurabilidade e modularidade na criação de sistemas de comunicação. Trata-se de uma ferramenta de simulação baseada em diagramas de blocos, o que facilita a prototipação. Por meio dela, foi desenvolvido o diagrama do sistema gerador de interferência que, ao ser executado, gera um código em Python, viabilizando a transmissão de sinais com o auxílio do SDR HackRF One.

A Figura 20, mostra o digrama em blocos da aplicação desenvolvida no GNU Radio®. A aplicação é constituída de blocos de configuração na parte superior, blocos de execução na parte central, blocos de monitoramento do sistema e um bloco de comunicação com o SDR utilizado.

Figura 20 - Fluxograma do sinal interferente criado no GNU Radio®.



Fonte: O autor.

A seguir é descrito a função de cada bloco de configuração:

- Variável *samp-rate*: define a largura de banda máxima da interferência gerada. O valor padrão é 2 MHz, mas pode ser ajustado até 20 MHz para uso com o Hack RF One.
- *Cutoff_freq*: variável responsável pela frequência de corte do filtro passa-baixa, que controla a banda do sinal interferente. O intervalo vai de 10 kHz a 1 MHz, com um valor padrão de 500 kHz.
- *Transition_freq*: define a suavidade da banda de transição do filtro. Começa em 10 kHz e pode ser ajustada até 300 kHz, sendo o valor padrão 10 kHz.

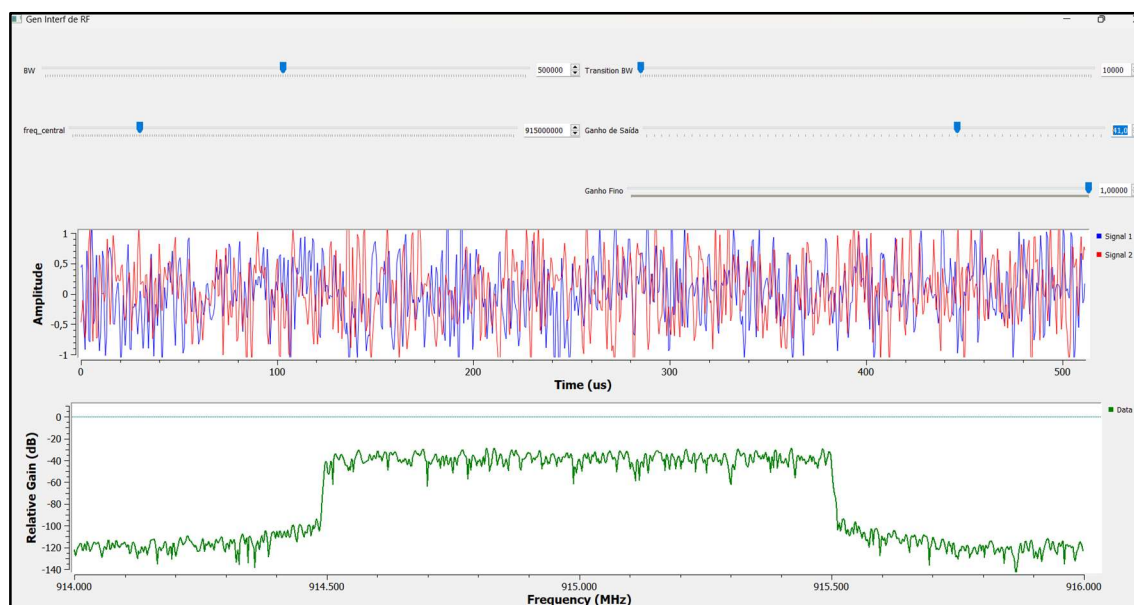
- *Freq_central*: define a frequência central de transmissão do sinal, variando de 1 MHz a 6 GHz, com um valor padrão de 915 MHz.
- *Gain_tx*: ajusta o ganho de saída do sinal, variando de 0 a 70 dB, com um valor padrão de 30 dB.
- *Fine_gain* é a variável que define o ganho fino no sistema, variando de 0 até 1, com valor padrão definido como 1.

Além das variáveis de configuração, existem os blocos principais de execução, que se interconectam no diagrama para geração do sinal interferente para o SDR. A função do bloco *Noise Source* é gerar amostras de um ruído branco aditivo gaussiano na frequência de amostragem configurada pelo sistema. Na sequência, esse ruído é filtrado no bloco *Low Pass Filter*, um filtro passa baixa com frequência de corte e banda de transição configuráveis. O resultado na saída do filtro é multiplicado por um valor ajustável entre 0 e 1, determinado pelo bloco *Fast Multiply Const*, que controla o ganho fino. Após esse processo, o resultante é enviado para o bloco de comunicação com o HackRF One (*Osmocom sink*), que irá transladar o sinal para uma frequência central configurável. A partir desse ponto, o sinal interferente, do tipo ruído filtrado de banda configurável, é transmitido por uma antena omnidirecional. Vale destacar que o sistema gerador de interferência atualmente inclui um bloco desabilitado chamado *Signal Source*, que pode ser utilizado para gerar uma interferência do tipo tom único. No entanto, este bloco não foi ativado para as medições realizadas neste PFC.

Os blocos de monitoramento *QT GUI Time Sink* e *QT GUI Frequency Sink* permitem a visualização do sinal gerado na interface de operação com o usuário, nos domínios do tempo e da frequência, respectivamente.

Ao executar a aplicação, uma interface com o usuário é aberta, como mostrado na Figura 21, onde é possível configurar em tempo real parâmetros da interferência gerada, como largura de banda (*BW*), banda de transição, frequência central, ganho de saída e ganho fino. Também é possível monitorar a interferência no domínio do tempo e seu espectro correspondente.

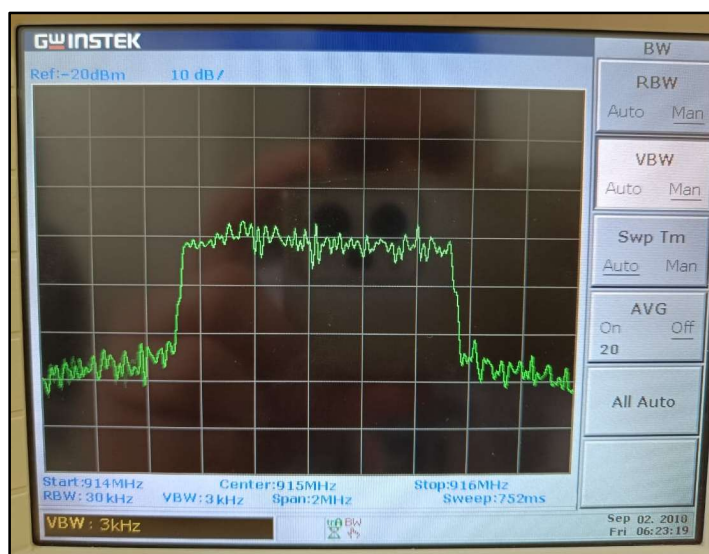
Figura 21 - Interface com o usuário do Gerador de Interferência.



Fonte: O autor.

Para averiguar se o sinal interferente estava sendo gerado em conformidade com o que era apresentado pelo *software* GNU Radio®, o sinal da saída do SDR foi conectado de forma cabeada a um analisador de espectro GSP-830 para avaliação. O resultado da análise é apresentado na Figura 22. Note que o espectro, com banda de aproximadamente 1 MHz e a frequência central de 915 MHz, apresentada no analisador, é bem similar àquele gerado pelo GNU Radio® na Figura 21. Isso demonstra que o sinal interferente está modulado e sendo transmitido de acordo com as configurações desejadas.

Figura 22 - Sinal Interferente observado por um Analisador de Espectro.



Fonte: O autor.

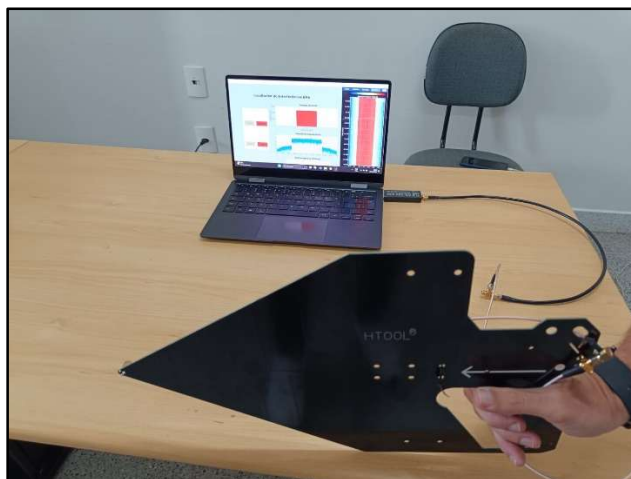
Um Medidor de potência portátil também foi utilizado para medir a potência em dBm do sinal de saída do SDR HackRF One. O aparelho utilizado para a medição foi do modelo V3500A da Agilent®. Por meio da aferição da potência, foi possível constatar que o interferidor de RF desenvolvido pode gerar sinais de saída com potência na faixa de até +7 dBm na frequência de central de 915 MHz. O gerador de interferências desenvolvido é capaz de gerar interferências intencionais em uma faixa de frequências de 1 MHz a 6 GHz, com uma largura de banda máxima de 20 MHz, desde que se escolha uma antena adequada para a faixa de operação selecionada.

O interferidor desenvolvido em GNU Radio® foi utilizado durante toda a implementação e testes do sistema de detecção de interferências.

4.2 SISTEMA DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE INTERFÊNCIA

O sistema de detecção e localização de interferência de RF implementado neste projeto final de curso é composto por uma antena direcional H8 HTOOL, do tipo log-periódica, com alta diretividade e ganhos entre 7 e 12 dBi na faixa de 0,1 a 6 GHz, conectada a um RTL-SDR, que se comunica via interface USB com um notebook executando o *software* MATLAB e a aplicação desenvolvida. A Figura 23 ilustra o sistema em operação.

Figura 23 - Sistema de detecção e localização de interferências em operação.



Fonte: O autor.

O MATLAB®, com a sua ferramenta GUIDE (*Graphical User Interface Development Environment*), foi a plataforma de computação numérica selecionada para este desenvolvimento, pois oferece uma linguagem de programação de alto nível, ferramentas interativas para visualização de dados e um vasto conjunto de funções matemáticas, que

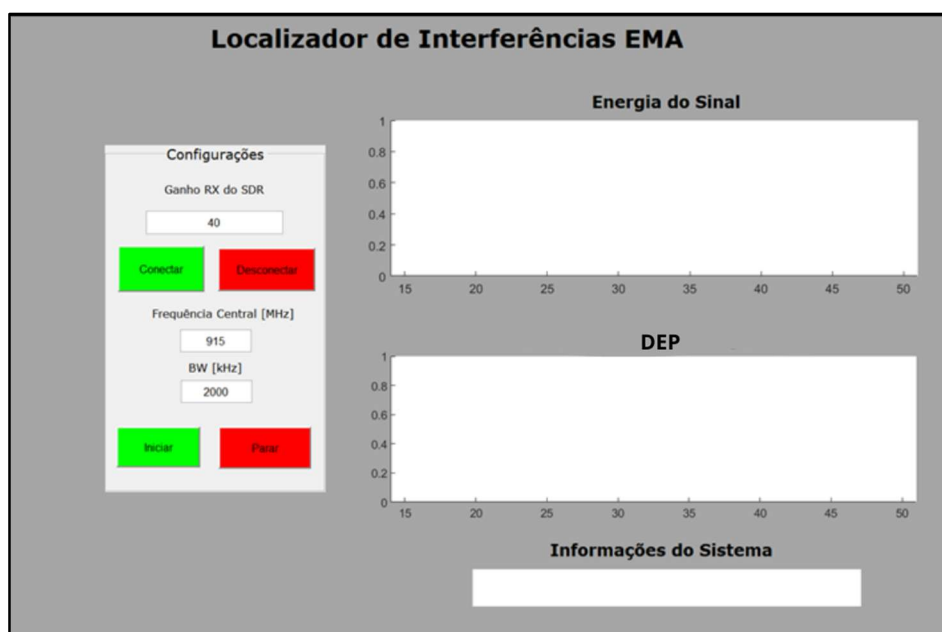
facilitam a resolução de problemas complexos e permite aos usuários criar interfaces gráficas de usuário de forma intuitiva.

Para viabilizar a detecção e localização eficiente de interferências de RF, o sistema proposto foi desenvolvido com quatro funcionalidades principais: (i) um analisador de espectro digital, (ii) um sistema de detecção de energia, (iii) um espectrômetro do tipo *waterfall* e (iv) um sistema de alerta sonoro proporcional ao nível do sinal detectado. Vale destacar que as duas últimas funcionalidades são diferenciais do sistema desenvolvido e não estão presentes em sistemas convencionais de detecção de interferências. A seguir serão descritas as partes essenciais do sistema.

4.2.1 INTERFACE GRÁFICA E CONFIGURAÇÕES DO SDR

A interface gráfica do sistema de localização é apresentada na Figura 24. Ela é constituída de campos de configurações, monitoramento de informações e apresentação dos resultados da análise realizada.

Figura 24 - Interface gráfica do Localizador de Interferência de RF no GUIDE.



Fonte: O autor.

Para operar a plataforma, o usuário deve configurar o *Ganho RX do SDR*, cujo valor padrão é de 40 dB, podendo variar de 0 a 50 dB; a *Frequência Central*, que tem padrão de 915 MHz, mas pode variar de 500 kHz a 1,75 GHz; e a largura de banda (*BW*), com padrão de 2000 kHz, ajustável entre 0 e 3200 kHz.

A partir da definição das configurações visuais editáveis, é possível inicializar o programa seguindo uma ordem lógica. Primeiro, para conectar ao RTL-SDR, basta pressionar o botão *Conectar*, momento em que o *software* reconhecerá o dispositivo e exibirá a mensagem “*Rádio conectado*” na seção de *Informações do Sistema*. Em termos de código, o que ocorre nesta etapa é a execução da função *pushbutton5_Callback*, que cria o objeto *rx* no MATLAB. Esse objeto é responsável por enviar as configurações de operação para o RTL-SDR e serve como interface entre o código principal da aplicação, “*Monitoramento_RF_UFU_PATOS.m*”, e o *hardware* do SDR.

A função *pushbutton5_Callback* é apresentada a seguir, com destaque para os parâmetros necessários para a criação do objeto *rx*: (i) *CenterFrequency*, frequência central de operação do RTL-SDR, configurável pela interface; (ii) *EnableTunerAGC*, controle automático de ganho, desativado para a esta aplicação; (iii) *TunerGain*, ganho de entrada do SDR, configurável no campo *Ganho Rx* da interface; (iv) *SampleRate*, frequência de amostragem do SDR, configurável pelo campo *BW* da interface; (v) *SamplesPerFrame*, número de amostras coletadas por requisição de dados, fixo em 2^{15} ; (vi) *OutputDataType*, formato do dado capturado pelo SDR, definido com *single*; (vii) *EnableBurstMode*, modo *burst* habilitado no momento da captura; (viii) *NumFramesInBurst*, número de quadro de amostras em cada *Burst*, fixado em 1 para aplicação; e, por último, (ix) *FrequencyCorrection*, correção de frequência desabilitada.

```
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject      handle to pushbutton5 (see GCBO)
% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global rx;
%% Parametros configurados na interface
fc = str2double(get(handles.edit8,'String'));
RTL_Sample_rate = SampleRate*10.^3;
Gain = str2num(get(handles.edit2,'String'));

%%Parametros iniciais
CenterFrequency = fc*10.^6;
LocalOscillatorOffset = 0;
SamplesPerFrame = 2^15;
EnableBurstMode = 1;
NumFramesInBurst = 1;

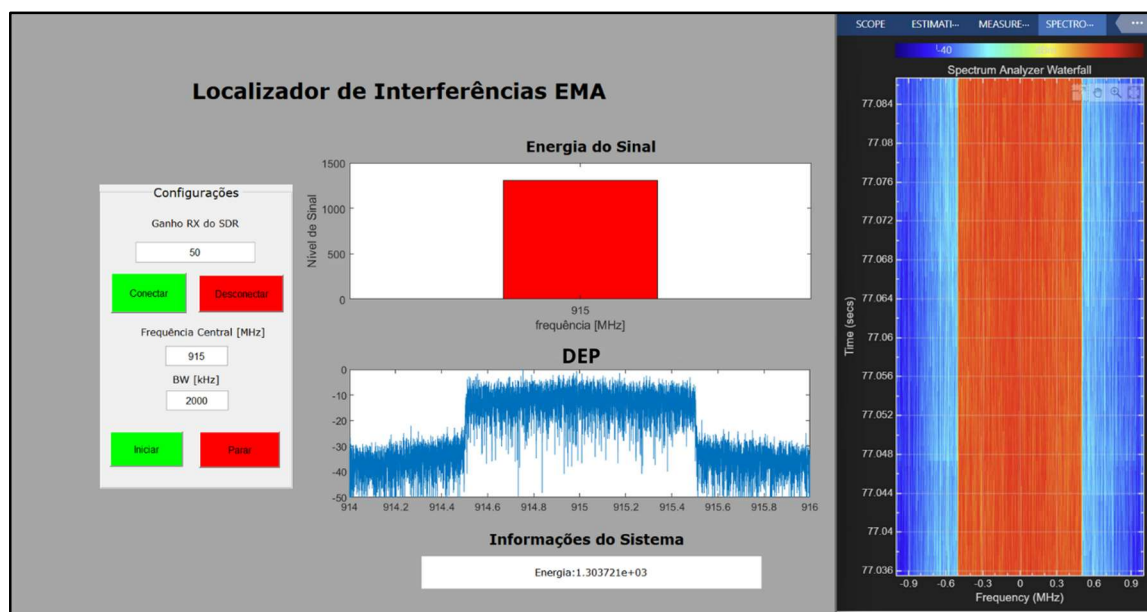
set(handles.edit3,'String','Conectando com o Rádio');
%% Criando objeto rx
rx = comm.SDRRTLReceiver(...
'CenterFrequency', CenterFrequency,...
'EnableTunerAGC', false,...
'TunerGain', Gain,...
'SampleRate', RTL_Sample_rate, ...
'SamplesPerFrame', SamplesPerFrame,...
'OutputDataType', 'single' ,...
'EnableBurstMode',EnableBurstMode, ...
'NumFramesInBurst',NumFramesInBurst, ...
'FrequencyCorrection', 0 );

set(handles.edit3,'String','Rádio conectado');
```

Com o rádio conectado, basta clicar em *Iniciar* para inicializar o sistema de localização e detecção de interferências. O programa entrará em seu loop principal, onde, a cada iteração, o RTL-SDR capturará 2^{15} amostras de sinal na banda e frequência configuradas na interface. Esses dados serão processados para executar as quatro funcionalidades principais da plataforma, já citadas anteriormente e detalhadas nas subseções seguintes.

Os resultados desse processamento são atualizados em tempo real em gráficos de *Energia do Sinal* e *Densidade Espectral de Potência*, incorporados na interface gráfica mostrada na Figura 25. Um gráfico adicional de espectrômetro em cascata também exibe a intensidade do sinal em um mapa de cores. Paralelamente, um aviso sonoro é emitido para auxiliar na detecção. Todos esses recursos são dinâmicos, reagindo à intensidade de potência e energia do sinal conforme captado pela antena HT8 à medida em que ela é movimentada, subsidiando a constatação, por parte do operador, da existência e da direção do sinal interferente. A Figura 25, apresenta a interface do sistema de detecção em operação.

Figura 25 - Localizador de interferência em operação.



Fonte: O autor.

Para parar a análise de sinal, basta clicar em *Parar*. Para se desconectar do SDR-RTL basta clicar em *Desconectar* e logo após aparecerá uma mensagem de *Rádio Desconectado* em *Informações do Sistema*.

4.2.2 IMPLEMENTAÇÃO DA DETECÇÃO DE ENERGIA

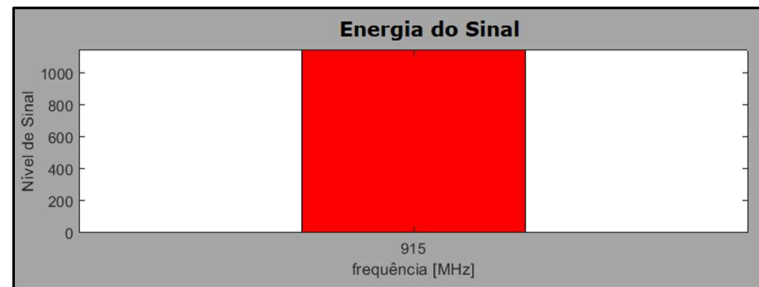
A funcionalidade de Detecção de Energia foi implementada com base nos conceitos apresentados na Seção 2.4. A seguir, são mostrados os trechos de código mais relevantes do loop principal que implementa essa função, nos quais as reticências (...) indicam partes omitidas da função principal que não estão diretamente relacionadas à funcionalidade descrita.

```
while 1 % Loop principal
...

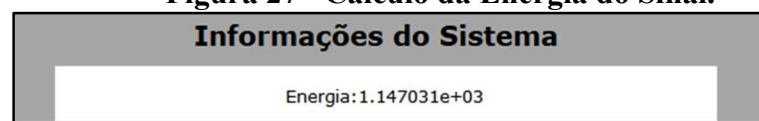
    %% Numero de amostras processadas
    N = 2.^15;
    %% Captura amostras do SDR pelo comando step
    [data, ~, overrun] = step(rx);
    %% Calculo de energia da amostras coletadas
    T = sum(abs(data(1:N)).^2);
    %% Plots de Nivel de sinal na faixa
    axes(handles.axes1);
    bar(rx.CenterFrequency/10.^6,T,'r');
    xlabel('frequência [MHz]');
    ylabel('Nivel de Sinal');
    %% Apresenta valor da energia em Informações do Sistema
    set(handles.edit3,'String',sprintf('Energia: %d', T));

...
end
```

No código, observa-se que *step(rx)* é a função responsável por capturar amostras do receptor SDR e armazenar no vetor *data*. O cálculo da energia é feito através da variável *T*, cujo valor absoluto das amostras em *data(1:N)* é calculado, onde *N* é o número de amostras consideradas, que é 2^{15} . Em seguida, o código eleva ao quadrado esses valores absolutos e soma todos eles com o auxílio da função *sum(.)*. O resultado representa a energia total (*T*) do sinal nas *N* amostras, de acordo com a Equação 10. O resultado de *T* é exibido tanto no gráfico *Energia do Sinal*, em barra vermelha, quanto de forma numérica na seção de *Informações do Sistema*, conforme ilustrado nas Figuras 26 e 27, respectivamente. A energia detectada será maior quanto mais a antena direcional do sistema estiver alinhada com a posição real do emissor de interferências.

Figura 26 - Gráfico de Energia do Sinal.

Fonte: O autor.

Figura 27 - Cálculo da Energia do Sinal.

Fonte: O autor.

4.2.3 IMPLEMENTAÇÃO DA DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

A Densidade Espectral de Potência (DEP) do sinal digital capturado pelo RTL-SDR foi estimada conforme a explicação teórica na Seção 2.5. A seguir, é apresentado os trechos de códigos relacionados ao cálculo da DEP e exibição de resultados.

```
while 1 % Loop principal

    %Configurações dinâmicas o loop principal
    fc = str2double(get(handles.edit8,'String'));
    SampleRate = str2double(get(handles.edit4,'String'));

    ...

    %% Numero de amostras processadas
    N = 2.^15;
    %% Captura amostras do SDR pelo comando step
    [data, ~, overrun] = step(rx);

    ...

    %% Espectro do sinal na Faixa
    Nptfft = 8192;
    Spectrum = abs(fft(data, Nptfft));
    Spectrum = fftshift(Spectrum);
    freq = linspace(-SampleRate*10.^3/2,SampleRate*10.^3/2,8192)+ fc*10.^6;
    axes(handles.axes2);
    plot(freq,(20*log10(Spectrum/max(Spectrum))))
    axis([-SampleRate*10.^3/2+ fc*10.^6 SampleRate*10.^3/2+ fc*10.^6 -50 0])

    ...

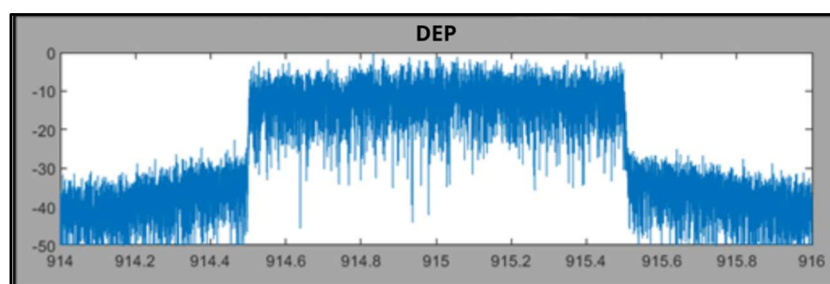
end
```

A partir da definição do número de pontos da FFT (N_{ptfft}), que aqui é 8192, o código estabelece a resolução espectral, calculada como a largura de banda (BW , ou $SampleRate$ no código) dividida por N_{ptfft} . Esse valor determina o espaçamento entre os pontos de frequência

na análise espectral, o que afeta a precisão com que as componentes de frequência podem ser identificadas.

Em seguida, o código realiza a Transformada Rápida de Fourier das amostras capturadas pelo SDR e armazenadas no vetor *data*, o mesmo usado para o cálculo da energia. O espectro resultante é convertido para magnitude absoluta e armazenado na variável *Spectrum*. A função *fftshift(.)* é então aplicada para centralizar o espectro ao redor da frequência zero, facilitando a visualização das frequências negativas e positivas do sinal. O eixo de frequência é criado em uma escala que abrange o intervalo de frequências de $-SampleRate/2$ até $SampleRate/2$, e é centrado em torno da frequência central f_c , ambos armazenados na etapa de configuração. O resultado desse processamento é apresentado no gráfico de *Densidade Espectral de potência (DEP)* da interface da plataforma, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Gráfico de DSP.



Fonte: O autor

Quanto mais bem definido e afastado do ruído de fundo (*floor de ruído*) estiver o espectro produzido, maior será a chance de a antena estar apontada para a direção do interferente.

4.2.4 IMPLEMENTAÇÃO DO ESPECTÔMETRO

Outra importante funcionalidade do sistema desenvolvido é o espectrômetro, que proporciona uma visualização detalhada e dinâmica do espectro de sinais ao longo do tempo. Essa representação tridimensional, com eixos de frequência (horizontal), tempo (vertical) e intensidade (cores), permite monitorar e interpretar mudanças espectrais em tempo real, tornando-se uma ferramenta importante para análises avançadas. As cores indicam a intensidade dos sinais, sendo que as mais quentes revelam maior potência em uma faixa específica. Com o espectrômetro, é possível identificar facilmente padrões de sinal, como o tipo de modulação, largura de banda e efeitos *Doppler*. Além disso, ele consegue detectar até mesmo

sinais de baixa intensidade, auxiliando no entendimento do comportamento dos sinais avaliados, oferecendo precisão e sensibilidade para a aplicação desenvolvida.

Essa funcionalidade específica não foi criada utilizando as ferramentas do GUIDE, mas sim adicionada ao código através da criação de um objeto *dsp.SpectrumAnalyzer*. Esse objeto faz parte do DSP System Toolbox no MATLAB, permitindo incorporar análises espectrais avançadas diretamente na codificação. A seguir é apresentado os trechos de código relacionados à criação do espectrômetro.

```
%Configurações para o loop principal
fc = str2double(get(handles.edit8,'String'));
SampleRate = str2double(get(handles.edit4,'String'));
rx.CenterFrequency = fc * 10.^6;
rx.SampleRate = SampleRate*10.^3;

%Criação do objeto espectrômetro,...
obj_specwaterfall = dsp.SpectrumAnalyzer(...
    'Name', 'Spectrum Analyzer Waterfall',...
    'Title', 'Spectrum Analyzer Waterfall',...
    'SpectrumType', 'Spectrogram',...
    'FrequencySpan', 'Full',...
    'SampleRate', rx.SampleRate);

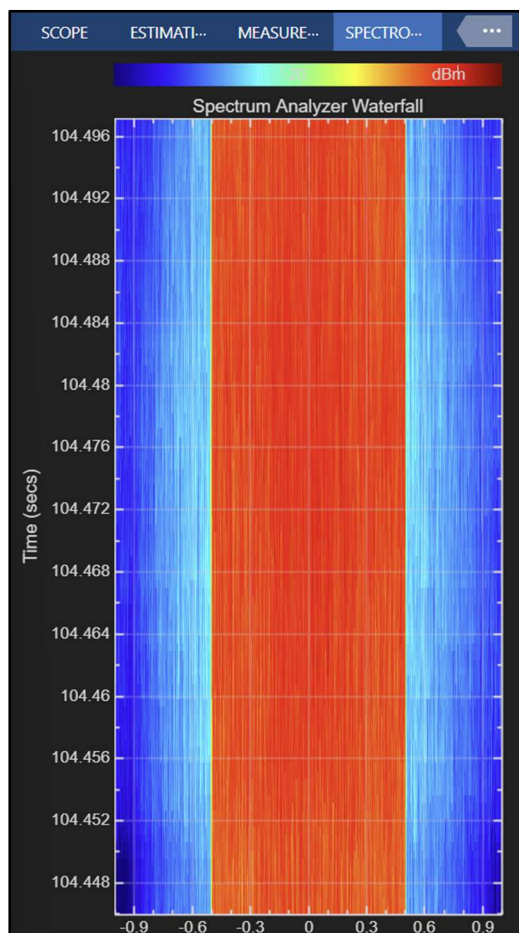
...

while 1 % Loop principal

    ...
    %% Numero de amostras processadas
    N = 2.^15;
    %% Captura amostras do SDR pelo comando step
    [data, ~, overrun] = step(rx);
    ...
    %% Atualiza o espectrograma a cada novo grupo de amostras capturadas
    step(obj_specwaterfall, data)
    ...
end
```

Nesse trecho de código há a configuração de um analisador de espectro em modo *waterfall* para exibir o espectrograma de sinais capturados em tempo real. Inicialmente, ele obtém a frequência central e a taxa de amostragem a partir da interface gráfica, ajustando os parâmetros do receptor SDR. O objeto *dsp.SpectrumAnalyzer* (*obj_specwaterfall*) é então criado para visualizar o espectro como um espectrograma. Dentro do loop principal, o código captura amostras de sinal do SDR e as envia ao analisador de espectro, que atualiza a visualização a cada novo grupo de amostras coletadas pelo comando *step(obj_specwaterfall, data)*, permitindo uma análise contínua e dinâmica do espectro, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Análise Espectral em forma de cascata.



Fonte: O autor.

Na análise espectral do tipo *waterfall*, quanto mais quente e próximo do vermelho for a cor exibida, maior será a intensidade do sinal. Por outro lado, quanto mais fria e tendendo ao amarelo, menor será o nível de sinal na faixa avaliada. É importante observar que o eixo de frequência do espectrômetro (horizontal) é apresentado de forma normalizada em relação à frequência central do sinal avaliado, como está posicionada no centro, correspondente à frequência zero.

4.2.5 IMPLEMENTAÇÃO DO AVISO SONORO

Por último, o sistema desenvolvido também implementa a funcionalidade de alerta sonoro, que, embora tenha uma implementação simples, se destaca como um dos diferenciais do projeto. Essa funcionalidade permite ao operador inferir sobre a direção da interferência por meio de variações no volume e na frequência do alerta sonoro. Quanto maior o nível de sinal detectado, maior será o volume e a frequência do tom de alerta, proporcionando uma forma

intuitiva e eficaz de monitorar e reagir a interferências em tempo real. A seguir seguem os trechos de códigos relacionadas com a referida funcionalidade.

```
while 1 % Loop principal

...
%% Numero de amostras processadas
N = 2.^15;
%% Captura amostras do SDR pelo comando step
[data, ~, overrun] = step(rx);
%% Calculo de energia da amostras coletadas
T = sum(abs(data(1:N)).^2);
...

%% Nivel de max de potência
Powermax = N;
%% Volume criado
Volume = T/Powermax;
%% Frequência do tom proporcional à energia das amostras
fcos = T/100;
%% Gera o tom
cossine = cos(2*pi*fcos*(0:1/44100:1000*1/44100))*Volume;
%% Executa o tom com a função sound com frequencia de amostragem de 44.1 kHz
sound(cossine,44100)

...
end
```

Nesse código, primeiro calcula-se a energia das 2^{15} amostras capturadas do SDR, que é armazenado na variável T . O código então define o nível máximo de potência e calcula o volume do som a ser reproduzido com valor proporcional à energia obtida e normalizado em relação a máxima energia, gerando na variável $Volume$ um valor entre 0 quando a energia for mínima e 1 quando a energia for máxima. A frequência do tom gerado também é proporcional à energia das amostras, $T/100$, valor que foi empiricamente verificado para uma boa diferenciação de frequências na condição de alta e baixa intensidade de captação de sinal. Na sequência, o tom a ser reproduzido é gerado utilizando a função $\cos(\cdot)$ já ponderado pela variável $Volume$. Por fim, o tom gerado é reproduzido com a função $\text{sound}(\text{cossine}, 44100)$, utilizando uma taxa de amostragem de 44100 Hz.

Desse modo, ao se iniciar a varredura de sinais pelo *software* criado, o sinal sonoro começa a funcionar e ao movimentar a antena diretiva HT8 em busca do sinal interferente, o tom sonoro se torna mais baixo e com menor frequência (mais grave) em áreas onde os níveis de energia do sinal são fracos, e mais alto e com maior frequência (mais agudo) nas regiões com níveis de energia mais fortes.

4.2.6 RESULTADOS ESPERADOS DO SISTEMA EM OPERAÇÃO

Com todas as funcionalidades implementadas e o sistema de detecção e localização em operação, espera-se que, ao direcionar a antena HT8 para a fonte de emissão da interferência

de RF, o sistema apresente um espectro de sinal interferente bem definido, com alta energia detectada. O espectrômetro exibirá cores quentes na região da interferência, enquanto um estímulo sonoro intenso e vibrante indicará a posição exata do interferente quando a antena HT8 estiver corretamente alinhada. Por outro lado, quando a antena não estiver apontando para a direção correta do interferente, ou seja, em condições de baixa intensidade interferente captada, o espectro de sinal será menos definido, se aproximando mais do ruído de fundo. A energia detectada será mais fraca, e o tom de alerta será mais suave, com volume e frequência reduzidos. Esse comportamento inverso possibilita uma identificação precisa da localização e intensidade da interferência, tornando o sistema eficaz para monitoramento em tempo real.

Com a montagem dos equipamentos (gerador de interferências e detector e localizador de interferências RF) concluída e com todas as funcionalidades implementadas, foi possível iniciar os testes para avaliar a eficácia do sistema proposto que serão apresentados no Capítulo 5.

CAPÍTULO 5

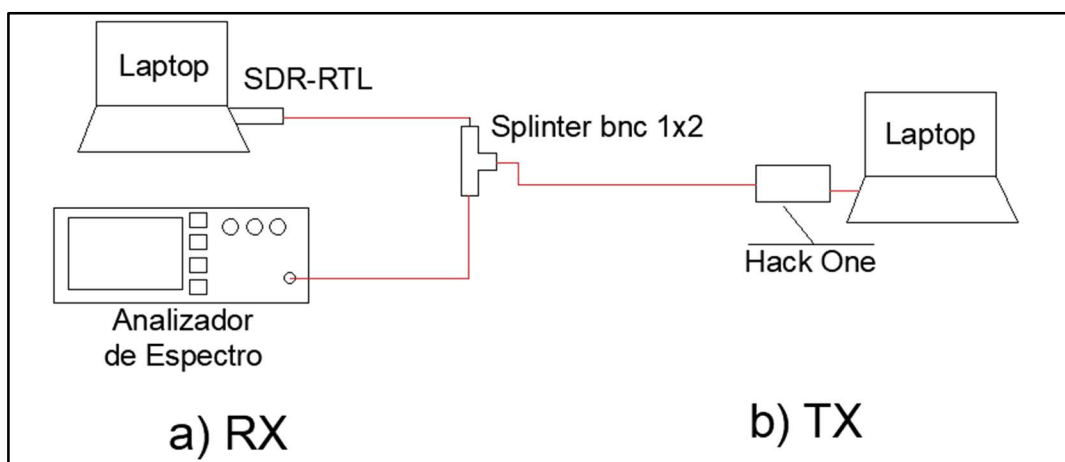
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo validar o projeto desenvolvido por meio de testes práticos que analisam a sensibilidade e a coerência do sistema de detecção e localização de interferências de RF proposto, em comparação com um sistema de detecção convencional implementado com analisador de espectro comercial GSP-830 da GWINSTEK®. Os testes foram realizados tanto em ambientes controlados de laboratório quanto em cenários de propagação sem fio práticos, e serão explicados nas subseções a seguir.

5.1 TESTES EM CENÁRIO CONTROLADO

Para avaliar a coerência das medições e a sensibilidade do sistema proposto em comparação a um analisador de espectro comercial, optou-se inicialmente por comparar ambos em um cenário controlado, ilustrado na Figura 30. Nessa figura, observa-se que o sistema gerador de interferência, à direita, foi conectado diretamente ao sistema proposto e ao analisador de espectro GSP-830, utilizando cabos coaxiais e um *splitter* 1x2, que distribui o sinal de forma igualitária entre os dois sistemas de recepção, permitindo uma comparação justa entre eles. Vale destacar que a impedância característica dos equipamentos de RF utilizados neste trabalho é de 50 ohms, assegurando o casamento de impedâncias necessário para minimizar reflexões e perdas no sistema.

Figura 30 - Esquema de Montagem Cabeado - Transmissão e Recepção de Sinal.



Fonte: O autor.

Nos testes em ambiente controlado, o gerador de interferência transmite um sinal de ruído filtrado com largura de banda de 1 MHz, centrado em 915 MHz e potência de -60 dBm, que é gradualmente reduzida em etapas subsequentes. O analisador de espectro comercial é configurado com frequência central de 915 MHz, faixa de varredura (*Span*) de 2 MHz e nível de referência dependente da potência do sinal avaliado. O sistema de detecção proposto é ajustado para ganho SDR de 40 (primeira verificação) e 50 dB (segunda verificação), frequência central de 915 MHz e largura de banda de 2 MHz.

5.1.1 VERIFICAÇÃO DE CAPACIDADE DE DETECÇÃO DE DIFERENTES NÍVEIS DE SINAL

Com todo o *setup* montado e configurado, o nível de sinal gerado pelo sistema interferente foi gradualmente reduzido de -60 dBm para -80 dBm, com o objetivo de verificar a coerência e a correlação nas medições de potência e na análise espectral fornecidas pelo equipamento comercial, em comparação aos valores de energia e demais resultados gerados pelo sistema proposto. Para isso, foram considerados inicialmente um ganho de 40 dB no SDR e, em seguida, 50 dB. A Tabela 2 apresenta os valores de potência medidos pelo analisador comercial e os valores de energia fornecidos pelo sistema desenvolvido para ambos os casos de ganho do SDR.

Tabela 2 - Níveis de potência do analisador e energia do sistema desenvolvido.

Potência (dBm)	Energia (J) (G = 40 dB)	Energia (J) (G = 50 dB)
-60	27200	39200
-65	16000	33800
-70	13700	22800
-75	5300	6500
-80	7,8	450

Fonte: O autor.

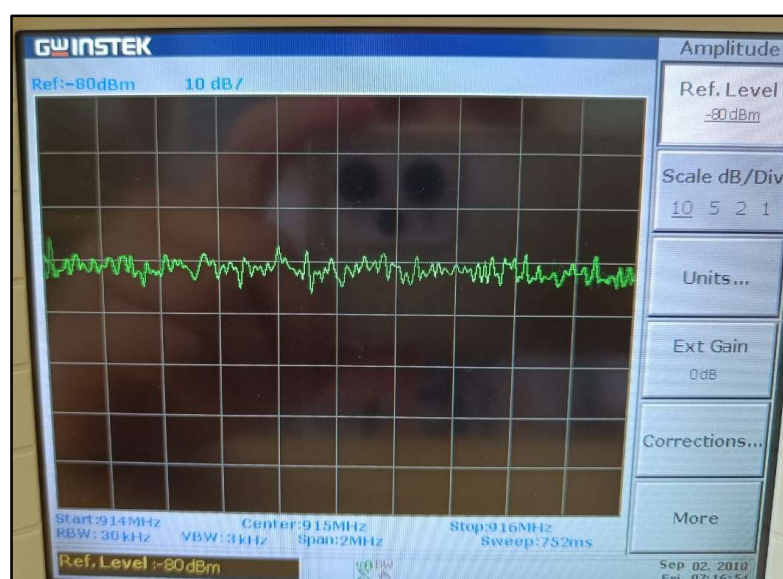
Observa-se na Tabela 2 que o detector de interferência projetado apresenta boa coerência no monitoramento dos níveis de energia do sinal, evidenciando sua capacidade de captar sinais interferentes. Verifica-se que, para ambas as configurações de ganho analisadas, um maior nível de potência resultou em um nível mais alto de energia detectada, enquanto um menor nível de potência refletiu em menor energia. Além disso, observa-se que, com o aumento do ganho do SDR para 50 dB, o nível de energia captado também aumenta em relação ao caso de 40 dB, conforme esperado. Assim, conclui-se que o sistema proposto é capaz de identificar

a intensidade do sinal interferente com base na detecção de energia, de maneira similar a um analisador comercial que utiliza potência. Além disso, o espectro estimado pelo sistema mostrou-se altamente similar ao do analisador comercial. O espectrômetro reproduziu de forma precisa as faixas de potência testadas, com variações de cores mais quentes (tendendo ao vermelho) para a potência mais elevada e mais frias (tendendo azul) para a menor potência avaliada. O alerta sonoro também funcionou conforme esperado, emitindo um som mais alto e agudo para o nível máximo de potência e um som mais baixo para o menor nível de potência, reforçando a capacidade do sistema em distinguir diferentes intensidades de sinal.

5.1.2 VERIFICAÇÃO DE SENSIBILIDADE MÍNIMA

Para avaliar a sensibilidade mínima dos dois sistemas sob teste, manteve-se o cenário da Figura 30 e configurações descritas no início da Seção 5.1, com o ganho do SDR ajustado para 50 dB (máximo). A potência interferente foi então reduzida gradualmente até que um dos sistemas de detecção deixasse de identificar o sinal interferente. Surpreendentemente, o analisador de espectro comercial parou de detectar o sinal quando o nível de potência atingiu -93 dBm, enquanto o sistema proposto continuava a identificar o sinal interferente, tanto em termos de níveis de energia quanto pela análise espectral. A Figura 31 mostra a tela do analisador de espectro quando a redução da potência de sinal interferente não era mais identificada, momento em que o espectro da interferência praticamente se confundia com o ruído de fundo do equipamento.

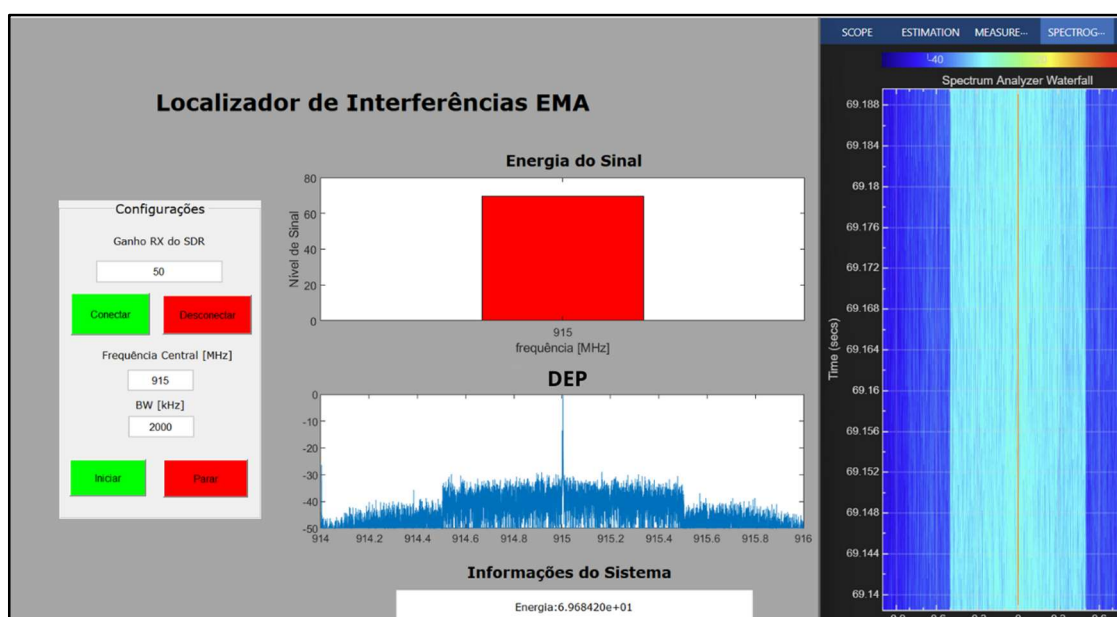
Figura 31 - Analisador de Espectro em -93 dBm de potência.



Fonte: O autor.

A Figura 32 apresenta a interface do sistema detector proposto no mesmo momento, onde, apesar do baixo nível de energia de sinal detectado, é possível distinguir claramente o espectro do sinal interferente do ruído de fundo do RTL-SDR. Isso comprova que a sensibilidade do sistema desenvolvido é, de fato, superior à do analisador comercial utilizado nos experimentos. Esse resultado demonstra que os SDRs, mesmo os de baixo custo, podem competir diretamente, em aplicações com as apresentadas neste trabalho, com equipamentos comerciais de análise espectral, que são geralmente muito caros.

Figura 32 - Sinal captado na potência de -93 dBm



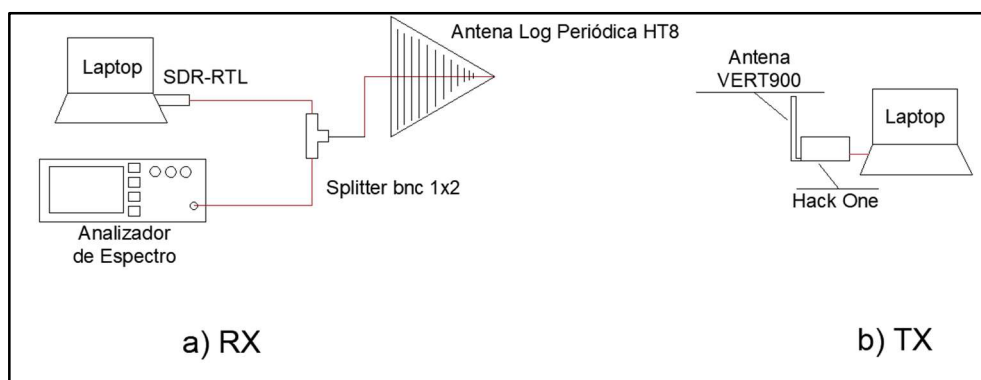
Fonte: O autor.

Infelizmente, não havia nenhum equipamento disponível para monitoramento de potências abaixo de -93 dBm, o que inviabilizou a verificação exata da sensibilidade do sistema proposto. No entanto, na tentativa de estimar o quanto o sistema desenvolvido é mais sensível que o analisador comercial, foi realizado um teste sem fio monitorando a potência do transmissor, conforme descrito na próxima Seção 5.2.1.

5.2 TESTE EM CENÁRIOS SEM FIO

Para avaliar o sistema proposto em condições de operação mais realistas, foram realizados testes em ambiente sem fio, utilizando o esquemático de montagem apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Esquema de Montagem - Transmissão e Recepção de Sinal.



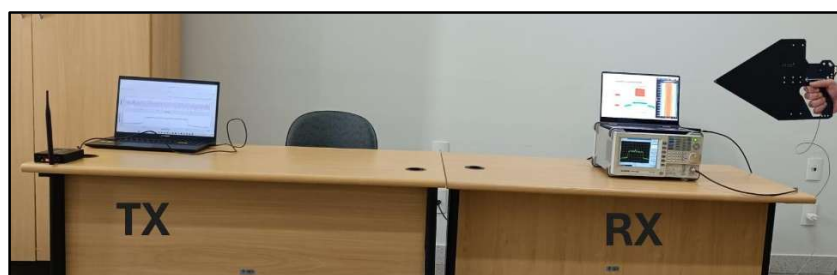
Fonte: O autor.

Diferentemente do cenário cabeado, neste caso, o sinal interferente é emitido pela antena omnidirecional VERT900 no lado da transmissão (TX) e captado pela antena direcional Log-Periódica HT8 no lado da recepção (RX), sendo posteriormente dividido de forma igualitária entre os sistemas sob teste por meio de um *splitter* 1x2. As configurações de frequência e largura de banda, tanto do sinal interferente quanto dos equipamentos de medição, são as mesmas utilizadas no cenário cabeado, com o sinal emitido sendo um ruído filtrado com banda de 1 MHz e frequência central de 915 MHz, mesma frequência central configurada nos equipamentos de recepção, que analisam o sinal em uma banda de 2 MHz. Vale destacar que a frequência central de 915 MHz foi escolhida para os testes por não apresentar interferências adicionais no ambiente de medição e por estar dentro das especificações do RTL-SDR.

5.2.1 VERIFICAÇÃO DE SENSIBILIDADE MÍNIMA EM CENÁRIO SEM FIO

Para avaliar a diferença de sensibilidade entre o sistema comercial e o proposto neste PFC, o esquema apresentado na Figura 33 foi montado na sala dos professores 301, no bloco Alpha (UFU – Campus Patos de Minas), conforme mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Cenário de medição sem fio para análise de sensibilidade



Fonte: O autor.

No cenário ilustrado na Figura 34, o sistema interferente (TX) foi posicionado a 2,5 metros dos dois sistemas de recepção em teste (RX) e emite o sinal de ruído filtrado, com especificações previamente descritas, pela antena VERT900. No lado da recepção, o sinal é captado por uma única antena HT8 (alinhada com a antena do interferente) e dividido entre os dois sistemas de recepção para monitoramento.

A potência do sinal interferente foi então reduzida ajustando-se os ganhos do gerador na interface do GNU Radio® até o ponto em que não era mais possível diferenciar o espectro da interferência do *floor de ruído* em ambos os sistemas. Nesses pontos, a potência emitida pelo interferidor foi monitorada pelo medidor de potência V3500A, onde se constatou que o analisador de espectro comercial GSP-830 deixou de detectar o espectro do sinal interferente quando a potência de transmissão estava em -53 dBm. No entanto, o sistema desenvolvido ainda conseguia detectar o espectro interferente, similar ao resultado mostrado na Figura 32, sendo capaz de identificar o espectro até o limite mínimo de -55 dBm. Esses resultados indicam que o sistema projetado neste PFC apresenta uma sensibilidade 2 dB superior à do sistema comercial nas condições avaliadas.

5.2.2 TESTE FINAIS DE DETECÇÃO E DE LOCALIZAÇÃO DE INTERFERÊNCIA EM CENÁRIO SEM FIO

Por fim, para verificar a eficácia do sistema desenvolvido na detecção e localização da direção do transmissor interferente, foi montado um *setup* de testes no corredor principal do terceiro andar do bloco Alpha, mostrado na Figura 35 e representado esquematicamente também pela Figura 33. O sistema de transmissão (TX), posicionado a 8 metros do sistema de recepção (RX), emite o sinal interferente pela antena VERT900, com uma potência média de saída de -7 dBm. O RX recebe o sinal pela antena HT8 e com o auxílio do *splitter* 1x2 o divide para detector de interferência projetado com o RTL-SDR e para o analisador de espectro comercial GSP-830, para fins de comparação. Vale destacar que, para este teste, foi necessário configurar o ganho do RTL-SDR em 20 dB, a fim de evitar a saturação do sinal recebido e viabilizar o monitoramento adequado.

Figura 35 - Cenário de medições para os testes finais de detecção de localização de interferências de RF.



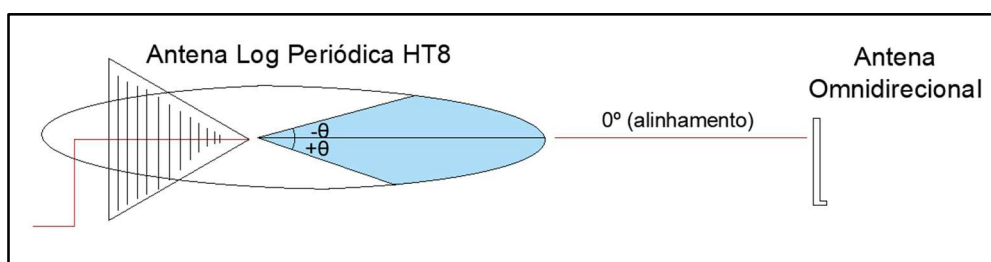
Fonte: O autor.

A distância de separação entre TX e RX de 8 metros foi escolhida pois era necessário que a análise fosse na região de campo distância das antenas, que é uma região em que o comportamento das ondas eletromagnéticas se estabiliza e forma um padrão de radiação consistente. Para averiguar essa condição, a distância r entre a antena transmitida e a receptora deve atender a expressão $r > 2D^2/\lambda$, onde D é a maior dimensão da antena e λ é o comprimento de onda do sinal propagado. O valor de λ pode ser encontrado através da expressão $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz no vácuo de aproximadamente $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$ e f é a frequência

de propagação da onda, em Hz, que nesse teste é 915 MHz. Desse modo, os valores do comprimento de onda e da distância mínima para campo distante são de $\lambda = 0,32$ m e $r > 0,24$ m. Portanto, 8 metros de distância entre as antenas é mais que suficiente para garantir uma condição boa de transmissão e recepção.

Nesse experimento, a antena diretiva HT8 conectada ao sistema de recepção teve seu deslocamento em azimuth variado, permitindo avaliar o desempenho do sistema desenvolvido e de todas as ferramentas de apoio à detecção. Aqui, considerou-se a posição de alinhamento direto entre as duas antenas como a posição de 0° , como ilustrado na Figura 36. As posições angulares foram identificadas através de um desenho de transferidor 360° , impresso e colocado abaixo das antenas. A Figura 37 mostra como os ângulos de azimuth foram obtidos com o auxílio do transferidor.

Figura 36 - Alinhamento entre a antena transmissora e a receptora.



Fonte: O autor.

Figura 37 - Esquemático para obtenção do ângulo de azimuth da Antena HT8 através de um transferidor 360° impresso.



Fonte: O autor.

Para validar o sistema proposto, espera-se observar uma coerência entre a potência captada pelo analisador de espectro comercial e os níveis de energia e o comportamento das

demais funcionalidades oferecidas pelo sistema desenvolvido, nas diferentes direções (angulações) monitoradas. Em particular, na direção em que o analisador comercial registra o maior nível de potência, o sistema proposto também deve indicar o maior nível de energia. Caso essa correspondência seja confirmada, o sistema desenvolvido estará validado, demonstrando sua eficácia na detecção e localização da direção do transmissor interferente.

O resultado de potência do analisador de espectro GSP-830 em dBm, de energia (E) identificada pelo sistema proposto, tanto em J quando em dBJ ($10 \log_{10} E$), para os diferentes valores de ângulos avaliados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de ângulo, potência do analisador e energia do sistema proposto.

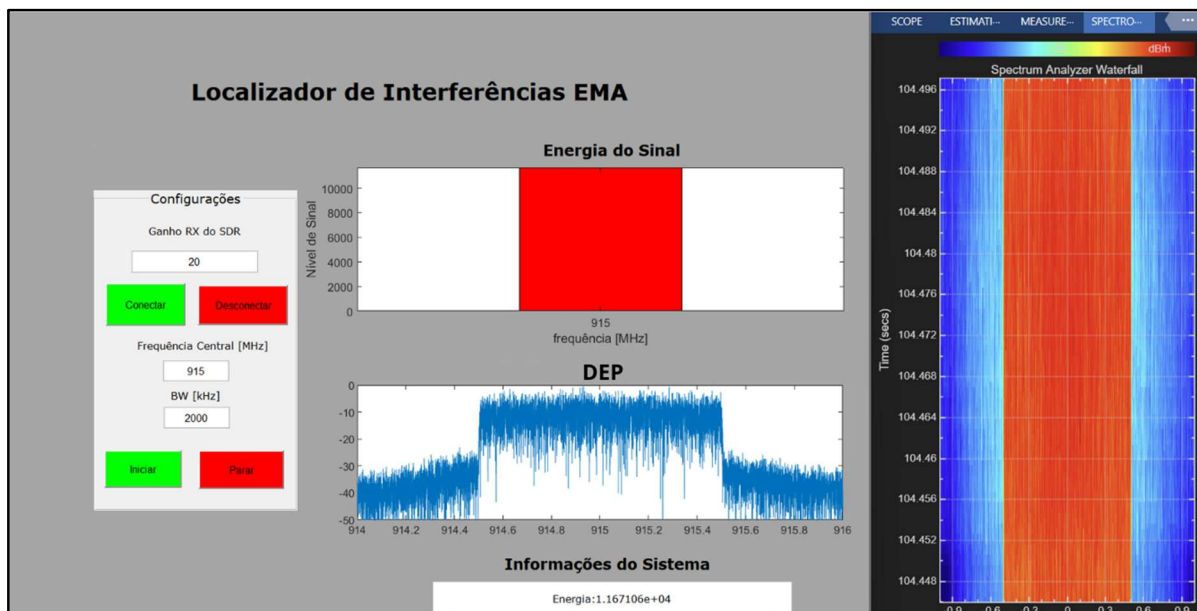
Azimuth (°)	Potência do Analisador (dBm)	Energia do Sistema (J)	Energia do Sistema (dBJ)
-90	-62	830	29.19
-60	-55	5200	37.16
-45	-58	2200	33.42
-30	-55	5300	37.24
-20	-53	8300	39.19
-10	-52	10000	40.00
0	-51	10500	40.21
10	-53	8200	39.14
20	-54	7300	38.63
30	-54	6900	38.39
45	-53	7000	38.45
60	-62	840	29.24
90	-65	540	27.32

Fonte: O autor.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 3, pode-se perceber que em 0° obteve-se o maior valor de potência (-51 dBm) pelo analisador e a maior energia pelo sistema proposto (10500 J). Isso demonstra que no alinhamento das antenas o sistema detector de interferência projetado consegue captar eficazmente o sinal interferente propagado em seu nível mais elevado. A nível de exemplificação, a Figura 38 mostra o sistema captando o nível de energia do sinal próximo ao alinhamento. As barras do gráfico de energia estão altas e o gráfico em cascata com uma coloração mais intensa em vermelho. Ambos demonstrando que a intensidade

do sinal estava alta quando ambas as antenas estavam alinhadas. Nesse mesmo momento, o apito sonoro do sistema estava mais alto e mais intenso, demonstrando o nível alto de energia.

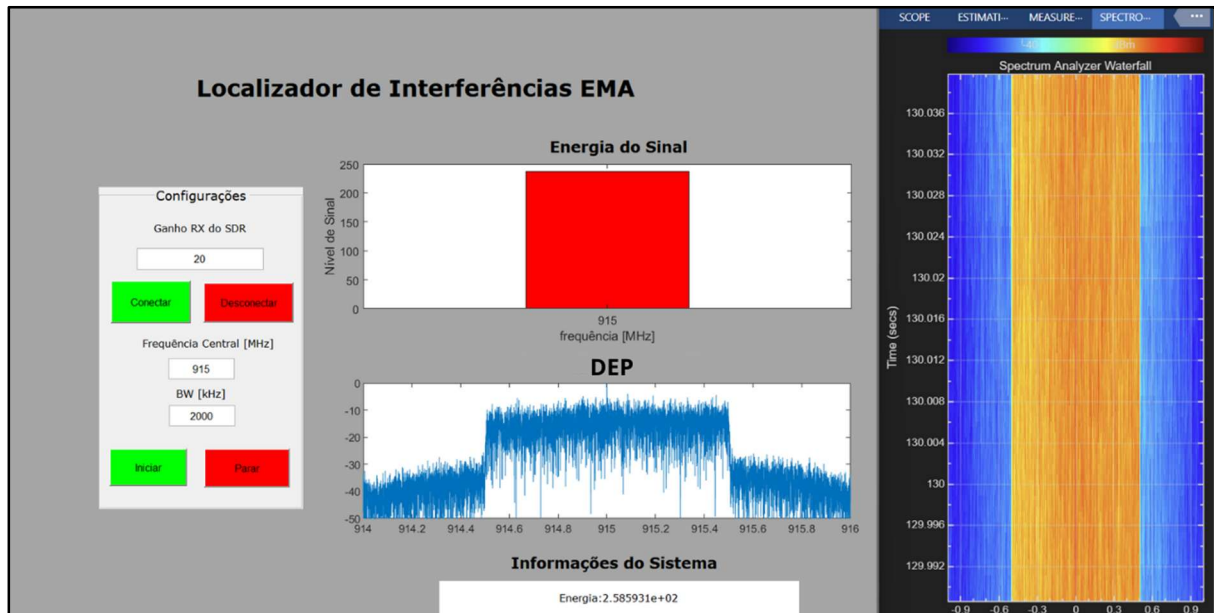
Figura 38 - Sinal interferente capturado próximo ao alinhamento.



Fonte: O autor.

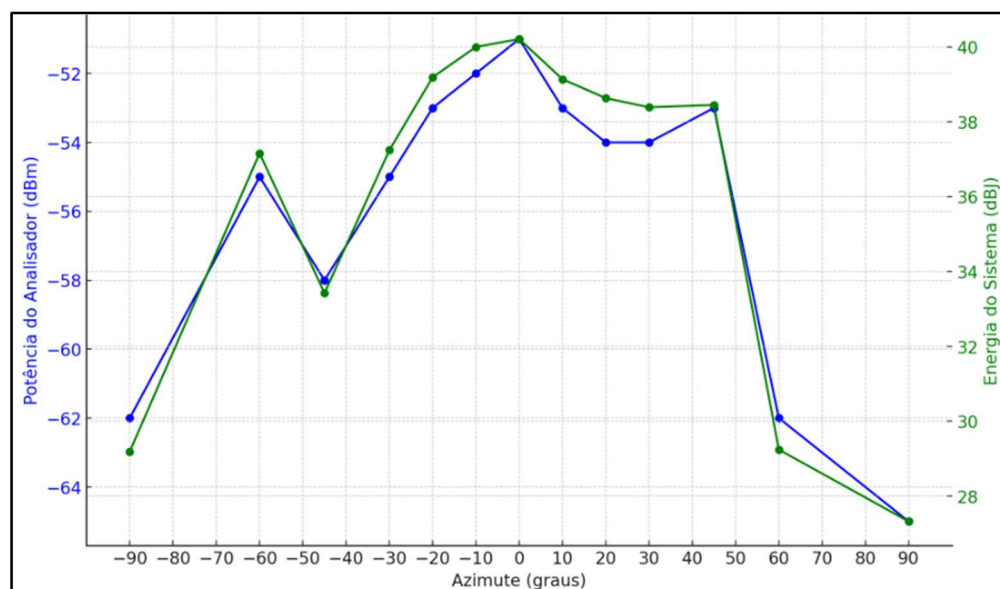
Nas posições angulares extremas do teste, $+90^\circ$ e -90° , obtiveram-se os menores valores de potência e energia, respectivamente: -65 dBm e -62 dBm de potência no analisador e 540 J e 830 J de energia no sistema proposto. Graficamente pela interface de usuário, nessas duas situações, a barra do gráfico de energia estava mais baixa, o sinal no gráfico de cascata apresentava coloração próxima ao amarelo, e o apito sonoro era praticamente inexistente, evidenciando que o gerador de interferência não estava na direção apontada, similar à situação mostrada na Figura 39.

Figura 39 - Sinal interferente capturado fora do alinhamento.



Apesar da diferença significativa nos valores absolutos da potência medida pelo analisador e da energia registrada pelo sistema proposto, observada na Tabela 3, há uma forte correspondência entre essas duas medidas. Essa correspondência torna-se mais evidente quando as comparamos em um mesmo gráfico, convertendo o valor da energia de J para dBJ (coluna à direita na Tabela 2), ou seja, com ambas as grandezas em escala logarítmica. O gráfico resultante é apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Nível de sinal captado pelo analisador (azul) e pelo sistema proposto (verde) para diferentes ângulos de apontamento.

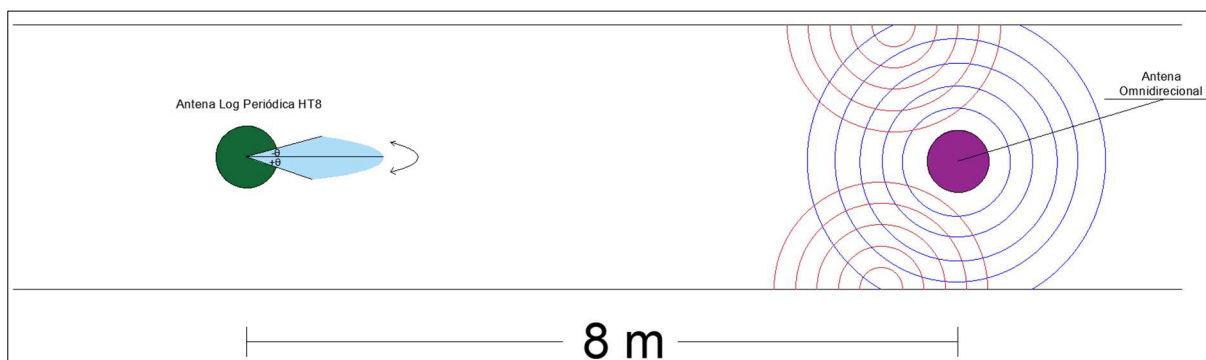


Fonte: O autor

Por meio da análise das curvas na Figura 40, é possível constatar uma forte correlação entre os dados medidos pelo analisador de espectro comercial e pelo sistema proposto. Ambos os sistemas, apresentaram seus valores máximos em 0° , permitindo a identificação correta da direção do emissor de interferência. À medida que o apontamento da antena HT8 se afastava dessa direção de alinhamento, ambos mostraram uma tendência de queda na detecção do sinal.

As exceções ocorreram em 45° e -60° , onde, em vez de seguir a tendência de queda, os valores de potência e energia aumentaram. Isso pode ser explicado pela reflexão das ondas propagadas ao encontrarem as paredes laterais do ambiente onde os testes foram realizados. Em determinados pontos, há uma concentração de ondas incidentes e refletidas, o que resulta em medições mais altas de potência (no analisador comercial) e de energia (no sistema proposto), conforme ilustrado na Figura 41. Esses resultados eram esperados e não comprometem a eficácia e validação do sistema proposto, uma vez que ambos os sistemas de recepção detectaram o mesmo fenômeno. Além disso, na direção de alinhamento correta, tanto o sistema proposto quanto o analisador de espectro apresentaram os maiores níveis detectados. As ligeiras divergências entre as medições dos dois sistemas podem ser atribuídas a imprecisões nas medições e a diferenças de *hardware* entre os dois equipamentos testados.

Figura 41 - Ondas propagadas pelo sistema de transmissão e refletidas pela parede do ambiente do teste.



Fonte: O autor.

Ao final dos testes, observou-se que o sistema proposto funcionou corretamente e captou a variação dos níveis de sinal conforme a posição angular entre as antenas receptora e transmissora. Além disso, as funcionalidades adicionais, como o espectrômetro e o alerta sonoro de direção, facilitaram a orientação do operador para a escolha correta da direção da emissão interferente. Apesar de não apresentado neste trabalho, o sistema proposto foi avaliado preliminarmente em outras frequências e com sinais interferentes de diferentes níveis de potência e banda, apresentando sempre coerência com o sistema comercial de referência.

Conclui-se, portanto, que o sistema proposto, implementado com um SDR de baixo custo, cumpre de forma eficaz a sua função de detectar e localizar a direção de sinais interferentes dentro da faixa de operação utilizada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a validação de um sistema de detecção de sinais interferentes em comunicações, utilizando técnicas de processamento digital de sinais com um SDR acessível e de baixo custo. De modo geral, os resultados obtidos com a montagem, os métodos empregados e os testes realizados foram satisfatórios, atendendo aos objetivos estipulados. Especificamente, a geração do sinal interferente via GNU Radio® foi fundamental para a calibração, configuração e verificação da sensibilidade do sistema de detecção.

As principais funcionalidades implementadas no sistema de detecção — medição de potência de sinal, estimativa da DEP, espectrograma do tipo *waterfall* e alerta sonoro — permitiram identificar e localizar sinais de RF de maneira eficiente, guiando a visualização e análise em todos os testes.

Os ensaios realizados comprovaram a efetividade do sistema proposto: os testes de variação de nível e detecção da potência mínima, tanto em ambientes com fio quanto sem fio, mostraram que o sistema é sensível a variações de potência do sinal interferente, com uma sensibilidade 2 dB superior à do analisador comercial nas condições avaliadas. Esses resultados indicam que SDRs de baixo custo, como o RTL-SDR utilizado, podem oferecer desempenho comparável ou até superior ao de equipamentos comerciais mais caros. O teste final, que envolveu a localização do sinal interferente por variação angular da antena direcional, demonstrou claramente que o sistema é capaz de detectar a posição da fonte interferente com precisão, utilizando suas ferramentas integradas para análise de variação do sinal captado.

Em resumo, este trabalho contribuiu para ampliar o conhecimento sobre interferência de RF, aprofundando em conceitos de propagação de sinal e destacando a importância da detecção de interferências em sistemas de telecomunicações. Com relação ao baixo custo, os materiais e *softwares* empregados demonstraram que é possível construir um detector de interferências confiável com equipamentos portáteis e acessíveis.

Como trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de novas metodologias de medição, considerando diferentes ambientes e faixas de frequência. Também se propõe a

implementação de técnicas de detecção aprimoradas e o uso de novas antenas e SDRs para expandir a faixa de operação do sistema.

REFERÊNCIAS

- 1 BÍBLIA SAGRADA. Tradução Almeida Revista e Corrigida. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 2020.
- 2 Gov.br, 2024. Agência Nacional de Telecomunicações. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel>. Acesso em: 15 de jan. 2024.
- 3 HUANG, Ying, *et al.* **Exploring Technology Evolution Pathways to Facilitate Technology Management: From a Technology Life Cycle Perspective**. IEEE, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8972403>. Acesso em: 14 de jan. de 2024.
- 4 CHAPIN, John M.; Lehr, William H. **Mobile Broadband Growth, Spectrum Scarcity, and Sustainable Competition**. Massachusetts Institute of Technology, 25 de dez. 2011. Disponível em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1992423. Acesso em: 12 de jan. 2024.
- 5 Tp-link, 2024. **Wi-fi Como Nunca Visto Antes**. Disponível em: <https://www.tp-link.com/br/wifi7/>. Acesso em: 12 de jan. de 2024.
- 6 DAROS, Gabriel. **Por que indústria planeja 6G para 2030 se não tem 5G em todo o Brasil?**. Tilt Uou, 2023. Disponível em: <https://www.uol.com.br/tilt/noticias/redacao/2023/03/07/o-que-e-6g-quando-chega-qual-velocidade-nova-rede-no-brasil-melhor-que-5g.htm>. Acesso em: 12 de jan. 2024.
- 7 Rohde-Schwarz, 2024. **Localize e elimine todos os tipos de interferência**. Disponível em: https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/test-and-measurement/mobile-network-testing/interference-hunting/busca-de-interferencias_231996.html. Acesso em: 12 de jan. 2024.
- 8 DICICOLI, Sergio. **TV DIGITAL: Sistemas, Conceitos e Tecnologias**. 1 ed. Gracio Editor, Coimbra. Disponível em: https://www.academia.edu/download/59324900/SD_tv_digital20190520-87635-gbv9gw.pdf. Acesso em: 14 de jan. de 2024.
- 9 Tecnoblog, 2021. **Filtros contra interferência no 5G serão instalados em sete anos**. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/2020/10/16/filtros-contra-interferencia-no-5g-serao-instalados-em-sete-anos/>. Acesso em: 13 de jan. de 2024.
- 10 Revista fórum, 2023. **Problemas de Interferência: 5G impacta transmissão de TV via satélite**. Disponível em: <https://revistaforum.com.br/ciencia-e-tecnologia/2023/7/11/problemas-de-interferencia-5g-impacta-transmissao-de-tv-via-satelite-139257.html>. Acesso em: 14 de jan. de 2024.
- 11 TC, 2023. **Trator autônomo: fique por dentro de tudo sobre as tecnologias mais importantes para o futuro da agricultura**. Disponível em: <https://tecnologianocampo.com.br/trator-autonomo/>. Acesso em: 15 de jan. 2024.

- 12 ALECRIM, E. **DroneGun Tactical, bloqueador que “derruba” drones, é aprovado pela Anatel.** Tecnoblog, 2021. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/2021/07/23/dronegun-tactical-bloqueador-droneshomologacao-anatel-brasil>. Acesso em: 04 fev. 2024.
- 13 VAN DER MERWE, J.R. *et al.* **Low-Cost COTS GNSS Interference Monitoring, Detection, and classification System.** Sensors, 25 de mar. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/7/3452>. Acesso em: 12 de jan. 2024.
- 14 Rohde-Schwarz, 2024. **Uma tradição de inovação.** Disponível em: https://www.rohde-schwarz.com/br/p-gina-inicial_48230.html. Acesso em: 16 de jan. 2024.
- 15 Ewers, Elisa C., *et al.* **Drone proliferation: Policy choices for trump administration.** JSTOR, 2017. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/resrep06354>. Acesso em: 16 de jan. 2024.
- 16 WRIGHT, Tim. **How many drones are smuggling drugs across the U.S. Southern Border?.** Smithsonian. Disponível em: <https://www.smithsonianmag.com/air-space-magazine/narcodrones-180974934?/>. Acesso em: 16 de jan. 2024
- 17 REIS, Murilo P. **Comparação de Interferências internacionais em Sistemas de Comunicação Digital Convencionais e com Espalhamento Espectral.** Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39988>. Acesso em: 17 de jan. 2024
- 18 GUIMARÃES, D., SOUZA, R: **Transmissão Digital: princípios e aplicações**, São Paulo: Érica, 2012.
- 19 ANJOS, A. A. **Interferência em Sistemas de Comunicação Digital.** INATEL: 2016.
- 20 SILVA, Alex A. **Simulação e análise da eficácia das técnicas de bloqueio em sistemas de comunicações: Ênfase no sistema GSM.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica) - Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.
- 21 **Guia de Cursos Inatel.** Inatel, 2022. Disponível em: https://inatel.br/icc/documents/portfolio_Guerra_Eletronica_2020.pdf. Acesso em: 23 de jan. de 2024.
- 22 **Manual de Campanha: A guerra Eletrônica nas operações.** Ministério da Defesa, Exército brasileiro, 1 ed., 2020. Disponível em: <https://1library.org/article/tipos-bloqueios-eletr%C3%B4nicos-sistemas-de-bloqueio-guerra-eletr%C3%B4nica.yr3lm18p>. Acesso em: 04 de fev. 2024.
- 23 **Deteção de Interferência de sinal: A tecnologia avançada do cartrack oferece cobertura.** Catrack, 2024. Disponível em: <https://www.cattrack.co.mz/deteccao-de-interferencia-de-sinal-a-tecnologia-avancada-do-cartrack-oferece-cobertura/>. Acesso em: 13 de out. 2024.
- 24 Thórus Engenharia. **Análise automatizada clash detection através de regras de verificação.** Thórus, 2020. Disponível em: <https://thorusengenharia.com.br/clash-detection/>. Acesso: em 24 de out. 2024.
- 25 **FSW Signal and spectrum analyzer.** Rohde&Schwarz, 2024. Disponível em: <https://www.rohde-schwarz.com/br/produtos/teste-e-medicao/analisadores-de->

- bancada/fsw-signal-and-spectrum-analyzer_63493-11793.html. Acesso em: 24 de out. 2024.
- 26 Spectrum Analyzer – RSA500A Series Portable. Tektronix, 2024. Disponível em: <https://www.tek.com/en/datasheet/spectrum-analyzer>. Acesso em: 25 de out. 2024.
 - 27 FERRE, Ruben M, *et al.* **In-lab validation of jammer detection and direction finding algorithms for GNSS**. IEEE, Alemanha, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8752944>. Acesso em: 05 de fev. 2024.
 - 28 MARTINS, Dayane C. J. **Sensoriamento espectral para rádios cognitivos aplicado em cenários de TVWS**. Projeto Final de Curso (Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações) – Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39830>. Acesso em: 07 de fev. 2024.
 - 29 HIGUTI, Ricardo. **Amostragem e Reconstrução de Sinais**. Departamento de Engenharia Elétrica – FEIS – Unesp.
 - 30 SILVA, Wendley S. **Introdução a Rádios Definidos por *Software* com Aplicações em GNU Radio**. Disponível em: <http://futebol.dcc.ufmg.br/ShortCourses/138299.pdf>. Acesso em: 06 de fev. 2024.
 - 31 Mercado livre, 2024. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/>. Acesso em: 04 de out. 2024.
 - 32 **HackerOne Response Solution Brief**. Hackone, 2024. Disponível em: <https://www.hackerone.com/resources/one-pager/hackerone-response-datasheet>. Acesso em: 13 de out. 2024.
 - 33 HM USRP N Series. Highmesh, 2024. Disponível em: https://www.hmusrp.com/hm-usrp-n-series/usrp-un200-un210.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwveK4BhD4ARIsAKy6pML4jdHJ_DCNZUH1FNP8roDuChqgzS2Aj_hpqNQUEU9wG8u7UbRA4j_UaAtPCEALw_wcB. Acesso em: 27 de set. 2024.
 - 34 HM USRP N Series. Highmesh, 2024. Disponível em: https://www.hmusrp.com/hm-usrp-n-series/usrp-un200-un210.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwveK4BhD4ARIsAKy6pML4jdHJ_DCNZUH1FNP8roDuChqgzS2Aj_hpqNQUEU9wG8u7UbRA4j_UaAtPCEALw_wcB. Acesso em: 27 de set. 2024.