



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS, TECNOLOGIAS E SAÚDE DO CAMPUS ARARANGUÁ  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Matheus Müller Borges

**Desenvolvimento de um protótipo baseado no EM-Sense para a coleta de  
Sinais de Ruído Eletromagnético**

Araranguá  
2023

Matheus Müller Borges

**Desenvolvimento de um protótipo baseado no EM-Sense para a coleta de  
Sinais de Ruído Eletromagnético**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Graduação em Engenharia de Computação do Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.

Araranguá

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Borges, Matheus Müller

Desenvolvimento de um protótipo baseado no EM-Sense para  
a coleta de Sinais de Ruído Eletromagnético / Matheus Müller  
Borges ; orientador, Fabrício de Oliveira Ourique, 2023.

33 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá,  
Graduação em Engenharia de Computação, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Reconhecimento de  
objetos ao toque. 3. Rádio definido por software. 4. RTL  
SDR. 5. Computação Ubíqua. I. Ourique, Fabrício de Oliveira.  
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia de Computação. III. Título.

Matheus Müller Borges

**Desenvolvimento de um protótipo baseado no EM-Sense para a coleta de Sinais de Ruído Eletromagnético**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Computação e aprovado em sua forma final pelo curso de Graduação em Engenharia de Computação.

Araranguá, 28 de Novembro de 2023.

---

Prof. Jim Lau, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Fabrício De Oliveira Ourique, Dr.  
Orientador

---

Profa. Analúcia Schiaffino Morales, Dra.  
Avaliadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Jim Lau, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

## Agradecimentos

Foi uma longa trajetória até a finalização desse trabalho. Passadas mais de uma década desde o início da graduação nos idos anos 2011, volto agora para concluir essa história em aberto e cumprir os ritos formais para obtenção do diploma.

Possuindo já alguns anos de experiência profissional, tenho propriedade para reconhecer a importância e o impacto que as políticas públicas de ensino através da Universidade Federal de Santa Catarina e todo seu corpo docente tiveram em minha vida e trajetória profissional.

Ao longo desses anos, muitas pessoas especiais me acompanharam por várias caminhadas. A essas dedico a minha mais profunda gratidão. A lista de pessoas que gostaria de nomear e agradecer é enorme e talvez minha memória falhe ao tentar lembrar de todas. Ainda assim, gostaria de destacar:

A professora Analúcia e ao amigo e colega de curso Augusto Scarduelli, que sem dúvidas foram os responsáveis pelo incentivo na retomada e finalização desse trabalho.

Ao professor e orientador Fabrício por incentivar a conclusão desta jornada iniciada há tanto tempo.

Aos amigos e doutores Fernanda Arno e Guilherme Garcia, pelo apoio inestimável e revisão dado a esse trabalho — minha gratidão a essas amigas tão valiosas.

Ao doutor e futuro psicanalista Gabriel Henrique, amigo e parceiro de tantos trajetos de vida — sua escuta, companhia e trocas são muito importantes para mim.

Ao doutorando Adriel Zortéa, no qual não poderia deixar de retribuir os agradecimentos — acompanho sua trajetória desde a graduação e tenho muito orgulho desse amigo de companhia agradável e intelecto tão refinado.

Aos amigos e colegas de turma André Mattos, Francyne Brião e Maurício Izé pela amizade cultivada muito além da universidade.

Ao professor Eugênio Simão, primeiro coordenador do curso, por seu espírito democrático, no qual sempre visou incluir o corpo discente nas discussões do curso; por proporcionar estágio junto a coordenação e a oportunidade de participar na primeira alteração curricular do curso; por seu apoio na criação do Centro Acadêmico de Engenharia de Computação.

Ao meu amigo de infância Lucas Pinho, que sua amizade foi primordial e decisiva para o tema do presente trabalho; por ajudar a despertar meu interesse pela computação aos meus 11 anos.

Aos amigos Gustavo Mendonça, Thaís Lemos e Sara Medeiros, que compartilham tantos momentos vivências por mais de duas décadas.

À minha mãe Sueli, avó Angelina e demais familiares, por todos os esforços para viabilizar meus estudos.

Ao programa Ciência Sem Fronteiras, iniciativa do governo Dilma Rousseff, sou grato pelo intercâmbio internacional proporcionado. Considero essa experiência no exterior fundamental para minha trajetória profissional.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação.  
A *Buddha*, ao *Dharma* e a *Monja Coen* por todos os seus ensinamentos.

# Desenvolvimento de um protótipo baseado no EM-Sense para a coleta de Sinais de Ruído Eletromagnético

Matheus Müller Borges\*

2023, NOVEMBRO

## Resumo

A integração de sistemas inteligentes no cotidiano é potencializada pelo reconhecimento do toque a objetos. Inspirado no dispositivo EM-Sense, este trabalho desenvolveu um protótipo para a captura e análise de sinais eletromagnéticos emitidos como ruído por dispositivos do cotidiano. Utilizando um Rádio Definido por Software (SDR) de baixo custo modificado, foi possível captar e visualizar esses sinais. Os sinais captados apresentam características únicas que permitem a identificação e classificação de múltiplos aparelhos, tais como eletrodomésticos e ferramentas elétricas. O funcionamento do EM-Sense é explicado e a etapa captação dos dados foi validada por meio da visualização do espectrograma do ruído eletromagnético de alguns dispositivos. Este estudo demonstrou com sucesso a viabilidade de replicar o dispositivo de baixo custo para coleta de sinais de baixa frequência. O protótipo replicado difere-se do EM-Sense por conseguir operar em duas frequências de banda distintas.

**Palavras-chaves:** Reconhecimento de objetos ao toque, Computação Ubíqua, Sistemas Inteligentes, RTL-SDR, Rádio definido por software.

---

\*matheusmb@outlook.com

# Development of an EM-Sense based prototype for Electromagnetic Noise Signal Collection

Matheus Müller Borges\*

2023, NOVEMBER

## Abstract

The integration of intelligent systems into daily life is enhanced by the recognition of touch to objects. Inspired by the EM-Sense device, this work developed a prototype for capturing and analyzing electromagnetic signals emitted as noise by everyday devices. Using a modified low-cost Software Defined Radio (SDR), it was possible to capture and visualize these signals. The captured signals have unique characteristics that allow for the identification and classification of multiple devices, such as household appliances and power tools. The operation of EM-Sense is explained and the data capture stage was validated through the visualization of the spectrogram of the electromagnetic noise of some devices. This study successfully demonstrated the feasibility of replicating the low-cost device for collecting low-frequency signals. The replicated prototype differs from EM-Sense in that it can operate on two different frequency bands.

**Key-words:** Object recognition by touch, Ubiquitous Computing, Intelligent Systems, RTL-SDR, Software defined radio.

---

\*matheusmb@outlook.com



# 1 Introdução

Inferir o contexto e atividades no qual as pessoas realizam no dia-a-dia, particularmente ao interagir com objetos, tem sido alvo dos Sistemas Inteligentes (LAPUT et al., 2015). Tal informação permitiria o desenvolvimento de aplicações ricas em contexto, no qual o toque a um objeto é suficiente para iniciar aplicações previamente programadas. Por exemplo, ao final do expediente de trabalho, quando o usuário se aproxima do seu veículo, um sistema de navegação por satélite (GPS) é automaticamente ativado, fornecendo a rota mais eficiente para sua residência.

A detecção e identificação de objetos em interações ainda é um objetivo relevante de pesquisa. A tecnologia de identificação por rádio frequência (RFID) oferece uma solução para o reconhecimento de objetos. Contudo, ela requer uma infraestrutura específica: cada item deve ter uma etiqueta RFID para ser identificado. Uma limitação da tecnologia RFID, no entanto, é que ela não diferencia se o usuário está realmente tocando no objeto ou apenas próximo a ele.

Diante desse cenário Laput et al. (2015) desenvolveram um protótipo de dispositivo capaz de identificar e classificar objetos ao toque, esse dispositivo foi chamado de *EM-Sense*. O artigo *EM-Sense: Touch Recognition of Uninstrumented, Electrical and Electromechanical Objects* de 2015, descreve o funcionamento de tal protótipo. Tendo como base essa pesquisa, o presente trabalho propõe desenvolver um protótipo similar para aquisição dos sinais.

Logo, os objetivos específicos deste trabalho são: a) Explicar o funcionamento do *EM-Sense* e das técnicas utilizadas no seu desenvolvimento; b) Validar o funcionamento do SDR capturando um sinal de rádio FM e demodular seu conteúdo; c) Modificar e utilizar um dispositivo similar ao do usado na pesquisa original para capturar sinais de ruído eletromagnético; d) Visualizar graficamente os sinais de ruído eletromagnético de 4 dispositivos distintos.

A importância deste trabalho se justifica porque a computação ubíqua aliada de sistemas inteligentes está se tornando cada vez mais presente em nosso dia a dia. O desenvolvimento de dispositivos e aplicações que considerem informações de contexto se torna relevante. Diante disso, o presente trabalho justifica-se com o objetivo do desenvolvimento de um protótipo de baixo custo que possibilitará em trabalhos futuros o fornecimento de dados para identificação das interações do usuário com dispositivos do ambiente.

## 2 Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido nas seguintes etapas:

1. Estudo e pesquisa das técnicas utilizadas e dispositivos necessários para o funcionamento do *EM-Sense*.
2. Aquisição do *hardware* necessário para confecção do protótipo.
3. Aquisição e demodulação de um sinal de rádio FM utilizando o *hardware* adquirido para validar funcionamento do SDR.
4. Modificação do *hardware* conforme realizado na pesquisa original.

5. Coleta do sinal de ruído eletromagnético emitido por 4 dispositivos eletrônicos distintos.
6. Visualização gráfica dos sinais coletados.

### 3 Contextualização: *EM-Sense*

Em parceria com a *Disney Research* e *Carnegie Mellon University*, foi desenvolvido um protótipo chamado de *EM-Sense*, apresentado no *Simpósio ACM em software e Tecnologia de Interface de Usuário*<sup>1</sup> de 2015. O objetivo dessa pesquisa era contribuir com a premissa de que Sistemas Inteligentes melhoram a vida das pessoas por inferir o contexto e atividades em vários cenários, possibilitando aplicações ricas em contexto. Esse objetivo é alcançado e algumas aplicações foram desenvolvidas pelos autores como prova de conceito.

Alguns outros trabalhos já exploraram a identificação de objetos visando aplicações ricas em contexto, no entanto, requerem algum tipo de instrumentação nos objetos (RFIDS, código de barras, BLE beacons) (LAPUT et al., 2015). O diferencial utilizado pelo *EM-Sense* e originalmente proposto por Cohn et al. (2011) é instrumentar o usuário e não o ambiente. Isso permite reconhecer interações com objetos já presentes no dia a dia, sem que seja necessário modificações físicas nos mesmos. Sendo pré-requisito o conhecimento do perfil de ruído eletromagnético dos objetos.

A pesquisa foi inspirada por outros trabalhos anteriores como *Your noise is my command* (COHN et al., 2011) e *Humantenna* (COHN et al., 2012) no qual já utilizavam o corpo como uma antena para detecção de gestos, localização em ambientes e toques a objetos. O *EM-Sense* difere desses trabalhos por utilizar um *hardware* de baixo custo, pequeno o suficiente para ser utilizado no pulso, além de focar exclusivamente na identificação de objetos ao toque físico.

*EM-Sense* é um dispositivo capaz de identificar objetos no qual o usuário está interagindo fisicamente. Utilizando os ruídos eletromagnéticos (EM) emitidos por objetos eletromecânicos utilizados no dia a dia (e.g. eletrodomésticos), o protótipo aproveita a tendência dos sinais EMI possuírem um padrão único em conjunto com a capacidade do tecido humano de conduzir esses ruídos. O dispositivo pode ser facilmente integrado em *smartwatches* no futuro, além de possuir um *hardware* de baixo custo (menos de R\$ 49,00<sup>2</sup>) (LAPUT et al., 2015). Tal feito é alcançado modificando um dispositivo de uso doméstico, como o da Figura 1, utilizado originalmente para sintonizar sinais de TV Digital (DVB-T), *Digital Audio Broadcast* (DAB) ou rádio FM.

<sup>1</sup> ACM Symposium on User Interface software and Technology (ACM UIST) 2015

<sup>2</sup> Valor médio de US\$ 10,00; 1 USD = 4,90 BRL - Cotação BACEN em 6 de nov. de 2023

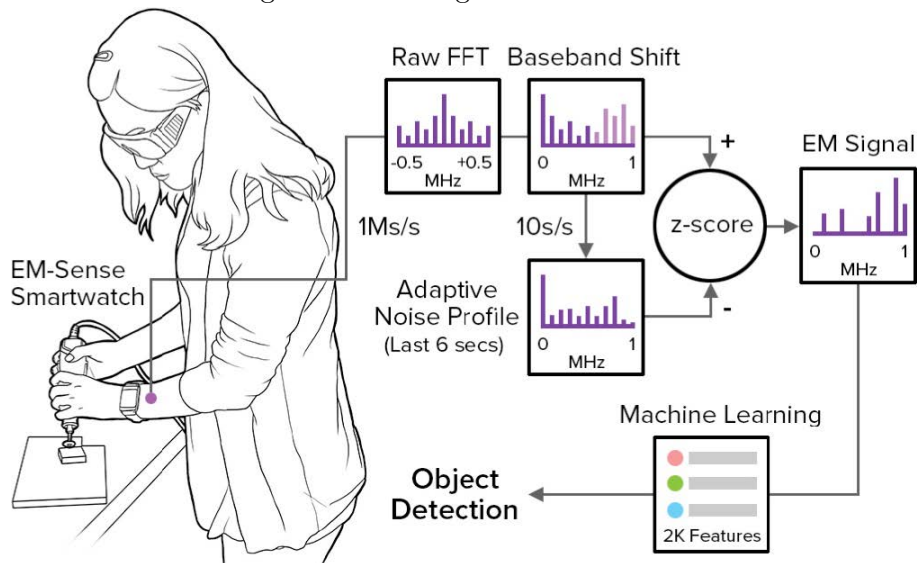
Figura 1 – *Dongle* utilizado para sintonizar DVB-T, DAB e FM



Fonte: Anúncio do *dongle* no site de vendas eBay, 2016

A visão geral da tecnologia *EM-Sense* pode ser observada na Figura 2. Seu funcionamento pode ser dividido como um conjunto de quatro blocos: Aquisição dos Sinais, Tratamento dos Sinais, Aprendizagem de Máquina e Aplicações.

Figura 2 – Visão geral do *EM-Sense*



Fonte: Laput et al. (2015)

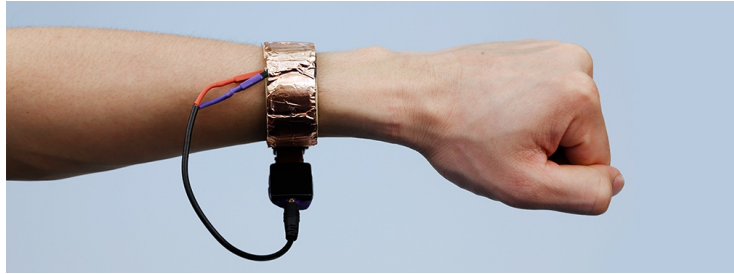
### 3.1 Ruído Eletromagnético

Os equipamentos eletrônicos e eletromecânicos emitem pequenas quantidades de ruído eletromagnético, também conhecido como Interferência Eletromagnética (EMI). Quando um contato físico é realizado, esse ruído é propagado através do corpo do usuário. O *EM-Sense* está interessado em capturar esse ruído e caracterizá-lo para distinguir qual objeto o usuário está encostando. Como o ruído eletromagnético é alvo de interesse por possuir informações a respeito de um objeto, também podemos chamá-lo alternadamente de sinal eletromagnético no contexto desse trabalho.

Esse sinal eletromagnético (ou ruído) está presente principalmente em equipamentos

que possuem motores (e.g. liquidificador) ou fontes chaveadas (e.g. tela LCD) (LAPUT et al., 2015). Para captar esse sinal o *EM-Sense* utiliza uma versão modificada do *dongle* da Figura 1, conectado a pulseira revestida com fita de cobre na qual o usuário deve utilizar em um dos braços (Figura 3). Uma modificação de *hardware* se faz necessária para ajustar faixa de operação do dispositivo com a faixa no qual a maioria dos ruídos são transmitidos por condução (1 kHz - 30 MHz).

Figura 3 – *EM-Sense* sendo utilizado no pulso de um usuário



Fonte: Laput et al. (2015, p. 3)

O sinal amostrado pelo *dongle* é enviado por meio de uma conexão USB a um *smartwatch* que o usuário porta. Os dados amostrados são encaminhados para um computador por uma conexão *Wi-Fi*, onde o processamento e tratamento dos sinais será realizado. Inicialmente são extraídas as informações sobre as frequências que compõem esse sinal (espectro), aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). O espectro do sinal é a fonte de dados primária para a etapa de classificação.

O ruído ambiente está presente nesse sinal amostrado, para ser possível isolar o sinal emitido pelo objeto que está sendo segurado pelo usuário, é necessário eliminar esse ruído ambiente, para tal é utilizado um algoritmo de subtração de fundo adaptativo. Então é realizada uma análise entre o perfil modelado do ruído ambiente e do sinal captado, aplicando um teste de significância (Z-escore) no qual as bandas de frequência do espectro que possuem um Z-escore acima de um valor especificado são amplificadas e as demais zeradas.

### 3.2 Classificação de dispositivos

O sinal desacoplado do ruído ambiente é utilizado para alimentar um algoritmo de aprendizagem e classificação. Algumas características (*features*) são geradas para o treinamento, tais como: derivativas, índices máximos e mínimos, RMS entre outros. Na pesquisa é utilizado uma *Support Vector Machine* (SVM) fornecida pelo Toolkit Weka (HALL et al., 2009).

Inicialmente a SVM foi treinada com dados coletados de apenas um usuário sobre uma coleção de nove objetos. Testes foram realizados com 12 adultos de diferentes biotipos. No primeiro teste, utilizando apenas os dados coletados de um usuário como *training set*, o *EM-Sense* atingiu uma precisão média de 96,1%, máxima de 100% e mínima de 85%. Em um segundo experimento, novas amostras foram coletadas de 12 usuários em duas localizações distintas. Esses dados foram incorporados aos do primeiro experimento e um novo treinamento de máquina foi realizado. Com isso o *EM-Sense* atingiu uma precisão média de 97,9% e mínima de 85,6% (LAPUT et al., 2015).

Foram realizados múltiplos estudos que determinaram: a precisão e robustez da

técnica de identificação entre diferentes usuários; a consistência longitudinal dos resultados com o decorrer do tempo; e a singularidade dos padrões eletromagnéticos de objetos idênticos, similares e diferentes (LAPUT et al., 2015).

Com a SVM treinada e validada, o *EM-Sense* consegue identificar em tempo real os objetos que o usuário realiza contato físico. Isso possibilita desenvolver aplicações que utilizem essa informação para inferir e realizar atividades pré-determinadas. As aplicações podem utilizar outras informações dos vários sensores presentes nos *smartphones*, tais como: acelerômetro, geolocalização, luminosidade, além da informação adicional fornecida pelo *EM-Sense* de qual objeto o usuário está segurando, criando assim, aplicativos que consideram o contexto do usuário.

Laput et al. (2015) dão alguns exemplos de aplicações tais como o início de um *timer* assim que uma escova de dentes elétrica é ligada, ou quando o usuário chega em seu escritório e ao encostar na maçaneta seu *smartphone* informa os próximos compromissos e a quantidade de e-mails não lidos.

O autor classifica os aplicativos que utilizam as informações sobre a interação do usuário com os objetos em seis categorias:

- Aplicações de objetos específicos: ao detectar a interação com um objeto específico e conhecido pelo *EM-Sense*, aplicações específicas podem ser iniciadas. Ex: uso de escova elétrica inicia um *timer*.
- Aplicações baseadas em sequência de objetos: detectar que uma interação com objetos ocorreu em uma determinada sequência e iniciar uma aplicação baseada nesse padrão. Ex: inferir que o usuário está cozinhando devido à sequência de interações com uma geladeira e um fogão.
- Reconhecimento de estado do objeto: as aplicações de objetos específicos podem ser estendidas com base na informação sobre o estado de operação do objeto. Ex: indicador de potência durante a utilização de uma furadeira.
- Autenticação: por meio de um processo de *handshaking* o usuário pode se autenticar entre dispositivos e aplicações. Ex: o usuário encosta no *touch-pad* de um *laptop*; o *EM-Sense* detecta a interação com o *touch-pad* e o *touch-pad* detecta que está sendo tocado; essa informação é encaminhada para um servidor por cada uma das partes no qual reconhece o *handshaking* e autoriza o desbloqueio do computador.
- Diferenciação de usuário: similarmente a autenticação, usuários podem ser diferenciados em dispositivos que permitem interação em grupo. Ex: em uma aplicação de desenhos no dispositivo *Microsoft Surface Hub* cada usuário possui uma cor determinada para desenhar.
- Deixar lembretes em objetos: é possível atribuir lembretes a determinados objetos ao manipulá-los. Ex: o usuário registra um lembrete ao encostar no seu carro durante a manhã; no final do dia, ao interagir novamente com o veículo, esse lembrete é reproduzido.

Devido ao uso do filtro adaptativo de fundo, a técnica de identificação demonstrouse independente de local. No entanto, identificação de objetos sem uma fonte de energia ativa, como escadas e esquadrias, é altamente dependente do local onde os sinais foram

coletados para treinamento. A identificação de objetos está limitada àqueles que geram algum tipo de ruído eletromagnético, por ser uma técnica inteiramente passiva. Ainda, os dispositivos que emitem níveis de ruído muito baixo podem não serem identificados. Além que possivelmente algumas frequências de ruído não são conduzidas através do corpo humano e, portanto, não chegam até o sensor (LAPUT et al., 2015).

Também existem limitações relativas à referência utilizada como terra para o conversor A/D, bem como em relação a sua resolução (8 bits). O *EM-Sense* utiliza como referência o terra provido pela bateria do *smartwatch*. A melhora na referência do sinal de terra e na resolução do conversor A/D provavelmente aumentariam a precisão e a gama de objetos no qual o *EM-Sense* consegue identificar.

Outra limitação está em ambientes que apresentem níveis de ruído extremamente elevados. Apesar do uso do filtro adaptativo de fundo, o ruído ambiente pode ofuscar sinais sutis, porém discriminativos dos dispositivos. Adicionalmente, o movimento frequente do braço do usuário, e conseqüentemente do sensor, pode causar efeitos elétricos não intencionais (e.g. efeito Doppler). Esse último limitante poderia ser contornado através do uso de sensores de movimento (e.g. acelerômetros e giroscópios) presentes nos *smartwatches* e *smartphones*.

### 3.3 Aquisição dos sinais

A maioria dos dispositivos eletrônicos modernos e lâmpadas fluorescentes utilizam fontes chaveadas (SMPS), visando obter alta eficiência energética, redução de tamanho físico e custos menores, quando comparado as fontes de alimentação tradicionais. Esse tipo de fonte gera de forma não intencional um ruído eletromagnético (EMI) contínuo de alta frequência (GUPTA; REYNOLDS; PATEL, 2010).

Esses sinais EMI são estáveis, previsíveis e estão relacionados com as características da frequência de chaveamento do dispositivo. O ruído apresenta um padrão específico no domínio da frequência conforme as características de *design* interno (circuitos) e externo dos dispositivos, o que permite a sua identificação e diferenciação (GUPTA; REYNOLDS; PATEL, 2010).

Dispositivos que utilizam motores tais como furadeiras, ventiladores e secadores de cabelo produzem ruídos na frequência da rede elétrica (60 Hz no Brasil) e de seus harmônicos (120 Hz, 180 Hz, etc.) devido à contínua abertura e fechamento de contatos elétricos com as escovas do motor (GUPTA; REYNOLDS; PATEL, 2010). Em contraste, os dispositivos que utilizam fontes chaveadas produzem ruídos na frequência de seus osciladores internos, tipicamente na ordem de centenas de kHz (GUPTA; REYNOLDS; PATEL, 2010).

Objetos estruturais grandes, principalmente metálicos (e.g. portas, escadas, esquadrias), agem como uma espécie de antena capturando os sinais do ambiente em volta. Isso pode permitir que apresentem um perfil de ruído eletromagnético único o suficiente para sua identificação. Contudo, esse perfil é altamente dependente das fontes de EMI do ambiente onde esse objeto se encontra (LAPUT et al., 2015).

Esses sinais são indesejáveis (i.e. ruídos) e se propagam por condução ou ondas de rádio e podem interferir nos dispositivos próximos. No final dos anos 70 nos Estados Unidos, a *US Federal Communications Commission* (FCC) estabeleceu regras para regular a suscetibilidade dos dispositivos domésticos ao ruído eletromagnético. Também foram estabelecidas regras para prevenir que o ruído interfira com outros dispositivos eletrônicos,

tais como TV e rádio (LAPUT et al., 2015).

O *EM-Sense* capta e analisa esses ruídos, que se propagam através do corpo humano durante a interação física com um dispositivo emissor. Esses sinais se propagam através do tecido humano devido as suas propriedades condutoras. Segundo Zimmerman (1996) o corpo pode ser modelado como um condutor perfeito.

No geral, o ruído é de baixa potência e se propaga por condução pelos circuitos e linhas de transmissão entre 1 kHz a 30 MHz ou por radiação para o ambiente entre 30 MHz a 10 GHz (LAPUT et al., 2015). Em virtude das propriedades elétricas do tecido humano, o sinal EMI também se propaga pelo corpo humano por condução. Esses sinais são detectados e classificados em tempo real pelo *EM-Sense*. O ruído é amostrado por meio de um dispositivo chamado *software-defined-radio* que está conectado a uma pulseira condutora utilizada por um usuário.

### 3.4 Software-defined radio (SDR)

Um rádio é todo tipo de dispositivo que transmite ou recebe sinais sem fio na faixa de 30 kHz a 300 GHz do espectro magnético, chamada faixa de rádio frequência (RF). Atualmente o rádio está presente vários dispositivos tais como celulares, computadores, televisões e outros (Wireless Innovation Forum, 2016).

Tradicionalmente os rádios são dispositivos baseados em hardware, ou seja, todas as funções de comunicação são implementadas via *hardware*, de forma que qualquer alteração em suas capacidades de comunicação exige uma alteração de hardware (IEEE, 2008). Isso resulta em custos de produção mais altos e flexibilidade mínima para suportar diferentes padrões de comunicação. Em contraste, a tecnologia de *software-defined radio* permite uma solução eficiente e mais barata para esse problema, permitindo o desenvolvimento de dispositivos sem fio multimodo, multibanda e/ou multifuncionais que podem ser melhorados por alterações de *software* (Wireless Innovation Forum, 2016).

*Software-radio* (SR) é um transceptor (i.e. dispositivo que combina um transmissor e um receptor utilizando um circuito em comum) no qual com um mesmo *hardware* diferentes técnicas de modulação e demodulação são implementadas via *software*. Um SR ideal coleta amostras o mais direto possível da sua antena. Um *software-defined-radio* é a versão realizável de um SR: os sinais são amostrados após passarem por um filtro de banda adequado (JONDRAL, 2005).

O desenvolvimento do SDR foi possível devido aos avanços do *software* e nas técnicas de silício que permitiram o processamento digital de sinais em frequência de rádio (YOUNGBLOOD, 2002). Inicialmente foi utilizado com fins militares como meio de comunicação entre diferentes unidades em um formato seguro (VACHHANI; MALLARI, 2015).

De acordo com o IEEE (2008) um SDR é definido como “um tipo de rádio em que alguma ou todas as funções da camada física são definidas em *software*”. Em outras palavras, é um rádio reconfigurável capaz de processar sinais de diferentes padrões ou até mesmo sinais não padronizados de aplicações específicas (JONDRAL, 2005).

Em geral, os sinais amostrados pelos SDRs são complexos por utilizarem a técnica de amostragem em quadratura (*quadrature-sampling*). Os sinais complexos são necessários para permitir a demodulação via *software* de todas as técnicas de modulação existentes (e.g.: AM, FM, PM, etc.).

O *EM-Sense* usa um SDR similar ao da Figura 1 para captar os ruídos eletromagnéticos. Esse dispositivo de uso doméstico e de baixo custo (cerca de US\$ 10,00) é originalmente utilizado com a finalidade de sintonizar com sinais de TV Digital (DVB-T), *Digital Audio Broadcas* (DAB) ou rádio FM. Porém, foi descoberto que modificando seu *driver* é possível utilizá-lo como um SDR de baixo custo. Esse SDR também é conhecido como *RTL2832U*, *DVB-T SDR*, *RTL dongle* ou como “Software Defined Radio de \$10” (RTL-SDR.COM, 2023a).

Um sinal em quadratura é um sinal em duas dimensões que pode ser representado como um único número complexo; sendo a parte real chamada de *in-phase* (I) e a parte imaginária de *quadrature* (Q) (LYONS, 2008). De forma simples, um sinal em quadratura ou sinal I/Q, é uma forma de representar as alterações de magnitude (ou amplitude) e de fase de uma onda senoidal (National Instruments, 2016).

O processamento de sinais em quadratura é utilizado em muitos campos da ciência e engenharia (e.g. sistemas de radar, sistemas de comunicação digitais, moduladores de banda única (SSB), etc.) sendo necessários para descrever o processamento e implementação dos sistemas digitais de comunicação modernos (LYONS, 2008).

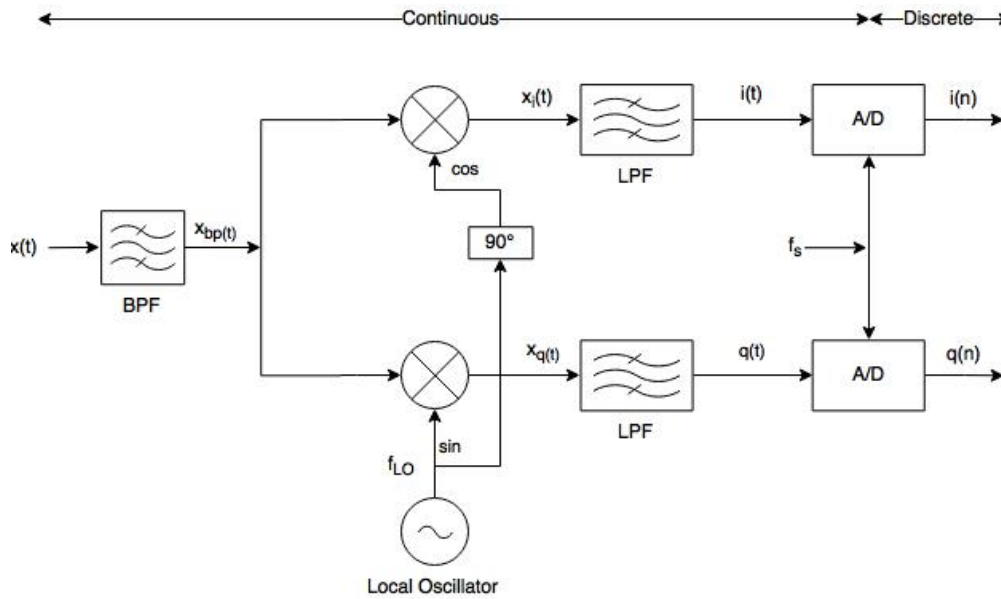
Sinais em quadratura são predominantes em sistemas de comunicação por rádio frequência, geralmente na modulação do sinal, por serem uma forma mais conveniente e econômica para modular sinais (National Instruments, 2016). Variar precisamente a fase de uma onda senoidal portadora de alta frequência em um circuito de *hardware* de acordo com um sinal de mensagem de entrada é difícil. Um circuito modulador de sinal que manipula a amplitude e fase de uma portadora é caro e difícil de projetar e construir, além de não ser tão flexível quanto um circuito que usa a técnica de modulação em quadratura (National Instruments, 2016).

Uma técnica para modulação ou demodulação de um sinal em quadratura é conhecida como Método de Weaver (*Weaver Method*). Um sinal real pode ser amostrado e representado como um sinal em quadratura através da técnica de amostragem em quadratura (*quadrature-sampling*).

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos para o método de amostragem em quadratura de *Weaver*. Inicialmente um sinal  $x(t)$  é filtrado por um filtro passa banda. O sinal filtrado  $x_{bp}(t)$  é então aplicado a dois canais em paralelo. No início de cada canal há um misturador ou *mixer* que é um dispositivo que realiza uma multiplicação em frequência de um sinal tanto para mais quanto para menos (National Instruments, 2016).



Figura 4 – Amostragem em quadratura - Método de *Weaver*.



Fonte: Youngblood (2002, p. 16). Adaptado pelo autor.

Ao passar pelo *mixer* o sinal é multiplicado por uma onda sinusoidal com a frequência  $f_{LO}$  do oscilador local. No canal superior, o sinal do oscilador local é atrasado em  $90^\circ$ , se tornando um cosseno. Esse conjunto forma um sinal em quadratura (i.e. o sinal entre os dois canais são ortogonais). Em seguida, o sinal é filtrado por um filtro passa-baixa criando a componente em fase  $i(t)$  e a componente quadratura  $q(t)$ . Subsequentemente, as componentes são filtradas por um filtro passa-baixo que é especificado para evitar o efeito de *aliasing* durante a etapa de conversão analógico digital (A/D). Finalmente, os sinais são amostrados por dois conversores A/D, um em cada canal, a uma frequência de amostragem  $f_s$  (YOUNGBLOOD, 2002). A saída desse circuito são dois sinais discretos na forma  $i(n) - jq(n)$  (LYONS, 2008).

Segundo Lyons (2008) algumas das vantagens da amostragem em quadratura são:

- Cada conversor A/D opera na metade da taxa de amostragem em relação à amostragem padrão de um sinal real, o que pode implicar em menor consumo de energia;
- Dada uma mesma taxa de amostragem  $f_s$ , é capturado sinais analógicos com uma largura de banda maior;
- Sequências de quadratura tornam o processamento da FFT mais eficiente devido a maior cobertura de faixas de frequência;
- Informações sobre a fase de um sinal permitem o processamento síncrono;
- Amostragem em quadratura facilita a medição da magnitude e fase instantânea durante a demodulação.

A técnica de amostragem em quadratura é empregada para amostrar sinais cuja largura de banda é igual à frequência de amostragem  $f_s$ , contrariando aparentemente o critério de *Nyquist*. Este último é frequentemente interpretado como a necessidade de uma frequência de amostragem  $f_s$  ser no mínimo  $2B$  Hz para um sinal com banda limitada

em  $B$  Hz (LATHI, 2007). Contudo, esta interpretação simplificada do critério de *Nyquist* omite detalhes cruciais. Na realidade, *Nyquist* estabelece que a reconstrução completa de um sinal requer no mínimo  $2B$  amostras por segundo. A amostragem em quadratura, que fornece duas amostras por evento de amostragem — as componentes em fase (I) e em quadratura (Q) — se alinha com o critério de *Nyquist*. Assim, uma taxa de amostragem de  $f_s$  por segundo resulta efetivamente em  $2f_s$  amostras por segundo, respeitando o critério de *Nyquist* para a reconstrução de sinais.

### 3.5 RTL-SDR

O RTL-SDR é um *software-defined-radio* de baixo custo que é um *dongle* originalmente utilizado como sintonizador de TV Digital (DVB-T) baseado no *chipset* RTL2832U (LAPUT et al., 2015). O RTL2832U é um *chipset* fabricado pela Realtek como um demodulador DVB-T COFDM (Coded OFDM) que está presente num grande número de DVB-T *dongles* (PERAL-ROSADO et al., 2014). O RTL-SDR também é conhecido como *RTL2832U*, *DVB-T SDR*, *RTL dongle* ou como o “*Software Defined Radio de \$10*” (RTL-SDR.COM, 2023a).

A descoberta do *RTL-SDR* começa por volta de março de 2010, quando o *hacker* de *hardware* chamado *Eric Fry* estava estudando os pacotes USB enviados pelo *dongle* em uma aplicação de reprodução de FM e DAB no ambiente *Windows*. Essa aplicação, de código fechado, vêm acompanhada do *dongle* em um mini CD. A intenção de *Fry* era oferecer suporte a essa aplicação no ambiente *Linux*, quando descobriu que os pacotes USB continham amostras brutas do sinal (RTLSDR.ORG, 2016).

Em fevereiro de 2012, o desenvolvedor de *drivers Linux* *Antti Palosaari* soube da descoberta que dispositivo pode enviar amostras I/Q *unsigned* de 8 bits (SUPERKUH, 2016). Rapidamente *Palosaari* e a equipe *Osmocom* desenvolveram um *driver Linux* que possibilitou o uso do chip *Realtek RTL2832U* como um SDR de baixo custo (LAUFER, 2015). Um dispositivo com essa capacidade teria custado centenas ou até milhares de dólares até alguns anos atrás (RTL-SDR.COM, 2023a).

Considerando o baixo custo, o dispositivo apresenta um custo-benefício satisfatório. Seu desempenho não pode ser comparada à de um SDR dedicado, porém ainda, sim, permite desenvolver muitos projetos que antes só poderiam ser realizados com SDRs muito caros (LAUFER, 2015).

Para ilustrar alguns SDRs receptores, podem ser citados como o *AirSpy* (\$199) e *SDRPlay* (\$149) que apresentam um desempenho muito melhor. Existem também SDRs que são capazes de transmitir e receberem sinais, como o *HackRF* (\$300) e *BladeRF SDR* (\$420 e 650) (RTL-SDR.COM, 2023a). Conclui-se que o RTL-SDR é uma ótima alternativa tendo em vista os preços praticados na venda de SDRs dedicados.

Atualmente o RTL-SDR vem sendo utilizado por *hobbistas*, rádios amadores (HAM) e até como ferramenta de ensino e pesquisa em universidades americanas (PERAL-ROSADO et al., 2014). Existe uma infinidade de aplicações, das quais cita-se algumas como: rádio escuta não criptografadas de forças de segurança e emergência; rastrear a posição de aviões como um radar com a decodificação ADS-B<sup>3</sup>; receber imagens de satélites meteorológicos; entre outras (LAUFER, 2015).

O alcance da frequência do RTL-SDR varia conforme o *tuner* que acompanha o

---

<sup>3</sup> Automatic Dependent Surveillance - Broadcast

*dongle*. O mais comum é o *Rafael Micro R820T* (24 - 1766 MHz). A taxa máxima de amostragem é de 3,2 MS/s. Contudo o RTL-SDR é instável nessa taxa e pode descartar algumas amostras, assim sua taxa máxima prática é de cerca de 2,4 MS/s. A resolução de seu conversor analógico digital (ADC) é de 8 bits, mas o Número Efetivo de Bits (ENOB) é estimado em  $\approx 7$ . Sua impedância de entrada é de cerca de 75 Ohms e possui um consumo aproximado de corrente de 300 mA (LAUFER, 2015). Utiliza um cristal de baixa qualidade de 28,8 MHz como oscilador local, com uma precisão média de  $\pm 30$ ppm (PERAL-ROSADO et al., 2014). Portanto, é esperado que haja variações entre a frequência central escolhida e a real que está sendo amostrada. O cristal pode apresentar uma variação maior ou menor conforme a diferença de temperatura com o ambiente.

Muitos dos avanços realizados com o RTL-SDR se devem a técnicas de engenharia reversa, pois, o *datasheet* do *chipset* RTL2832U somente está disponível para fabricantes através da assinatura de um NDA (RTL-SDR.COM, 2023a). Talvez ainda não tenha sido explorado todo o potencial do chip, tendo em vista que podem existir funções e registradores de configuração ainda não descobertos. Contudo, existe um esquemático criado por GGToshi (2014) através de engenharia reversa. Já o *datasheet* do *tuner* R820T pode ser facilmente encontrado para download (SUPERKUH, 2016).

## 4 Desenvolvimento

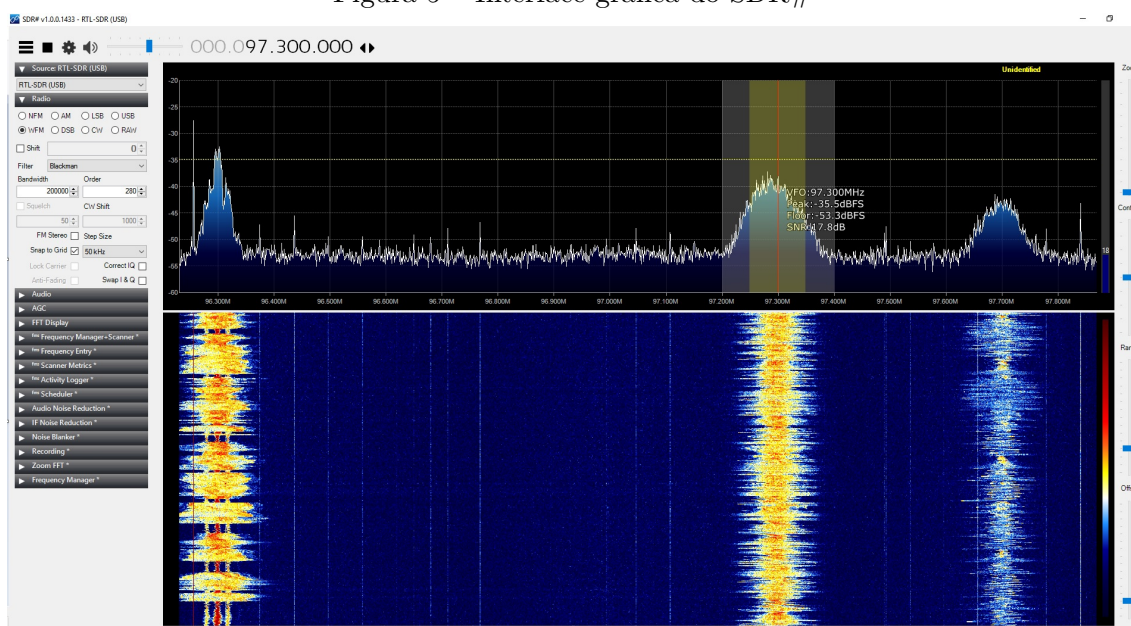
Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi adquirido através do site de compras *eBay*, o *RTL-SDR dongle* (Figura 1) por onze dólares australianos, ou aproximadamente trinta reais<sup>4</sup>. O dispositivo vem acompanhado de uma antena, mini CD, controle remoto além do *dongle* em si (Figura 1).

Visando validar o desenvolvimento do *dongle*, foi utilizado o *software* SDR#, que permite a aplicação de várias técnicas de processamento digital de sinais, obtidos por SDRs ou arquivos, e reproduzir os resultados através da placa de áudio do computador (SRUTHI et al., 2013). Sua interface gráfica pode ser observada na Figura 5.

---

<sup>4</sup> 1 AUD = 2,68 BRL em 23 nov. 2015

Figura 5 – Interface gráfica do SDR#

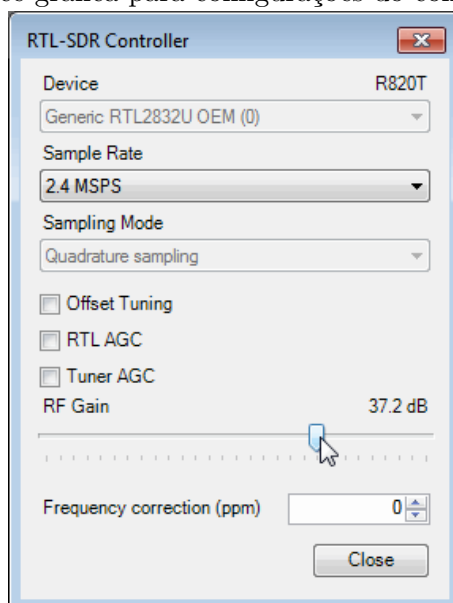


Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode ser observado na Figura 5, quando a imagem foi capturada, estava sendo reproduzido uma rádio FM na frequência de 97,3 MHz. Também é possível observar através do espectro que existem mais duas estações, uma na frequência de 96,3 MHz e outra em 97,7 MHz.

Existem alguns parâmetros do processo de amostragem do RTL-SDR que podem ser modificados, conforme pode ser observado na Figura 6. Dentre as configurações, é possível alterar a taxa de amostragem, especificar o valor do ganho, habilitar o controle de ganho automático (AGC) e especificar a correção de frequência em ppm.

Figura 6 – Interface gráfica para configurações do controlador RTL-SDR



Fonte: RTL-SDR.COM (2016).

Para obter as amostras diretamente do SDR-RTL foi utilizado o conjunto de ferramentas de linha de comando *OsmoSDR* desenvolvido pelo grupo *Osmocom* (*Open source mobile communications*). Foi utilizado a ferramenta *rtl\_sdr* descrita como um gravador de dados I/Q para receptores DVB-T baseados no RTL2832U. Pode ser utilizado para gravar amostrar I/Q em arquivo para poderem ser processadas posteriormente. Já a *rtl\_tcp* é descrita como um servidor de espectro I/Q para receptores DVB-T baseados no RTL2832U. Essencialmente é criado um servidor TCP permitindo que aplicações terceiras se comuniquem com esse servidor e obtenham amostras I/Q em tempo real do RTL-SDR.

Os dados enviados pelo RTL-SDR precisam ser pré-processados. Cada amostra é enviada como um conjunto *unsigned* de dois bytes, sendo o primeiro a representação da componente em fase (*I*) o segundo da componente em quadratura (*Q*). Inicialmente deve-se converter os bytes para *signed* e subtrair 127, seguido da transformação dos dois bytes em um único número complexo, sendo as amostras de índice ímpar a parte real e as de índice par a parte imaginária.

#### 4.1 Demodulando sinal FM em MatLab

Foi executado um experimento de demodulação de um sinal FM de uma rádio local para elucidar melhor o formado dos dados enviados pelo RTL-SDR. Para isso foi utilizado a ferramenta *rtl\_sdr* com a seguinte linha de comando:

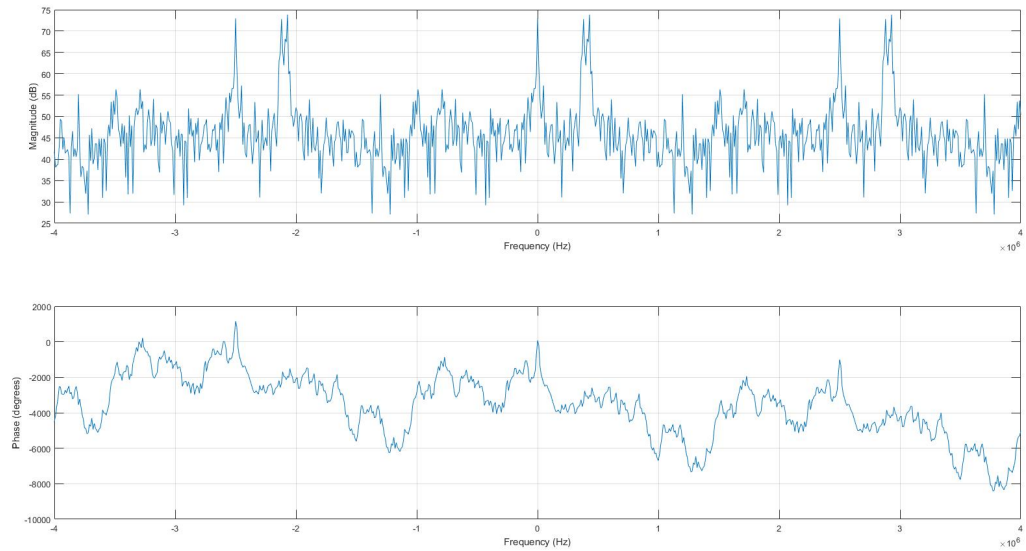
```
rtl_sdr -f 97600000 -g 48.9 -s 2500000 -n 25000000 iq.dat
```

Os parâmetros passados como argumento para a ferramenta são:

- -f 97300000: especifica que o RTL-SDR deve ser sintonizado na frequência 97,3 MHz
- -g 48.9: o ganho deve ser de 48,9 dB. Esse valor foi obtido por meio de testes no SDR#
- -s 2500000: especifica taxa de amostragem por segundo em 2,5 MS/s
- -n 25000000: determina a quantidade de amostras a serem obtidas. Ou seja, serão colhidas amostras por 10 segundos (taxa de amostragem  $\times$  10)
- iq.dat: o nome do arquivo onde as amostras serão gravadas

O arquivo gerado possui cerca de 48 MB. Utilizando a ferramenta *MatLab* e seguindo o tutorial disponibilizado pelo Dr. [Scher \(2015\)](#), o arquivo foi lido, os dados pré-processados e o áudio da amostra foi reproduzido com sucesso. Na Figura 7 pode ser observado a faixa de espectro entre  $\pm 4$  MHz das primeiras 5000 amostras (primeiros 0.002 s). O espectro está centrado em 0 Hz, porém sabe-se que o centro, na verdade, é apresentado pela frequência de 97,3 MHz que foi especificada durante a amostragem. Como esperado, o espectro possui *aliases* com período igual à taxa de amostragem (2,5 MHz). Também é possível observar o sinal da rádio da outra rádio de frequência 97,7 MHz. Portanto, com esse mesmo arquivo é possível obter o áudio transmitido por ambas as rádios.

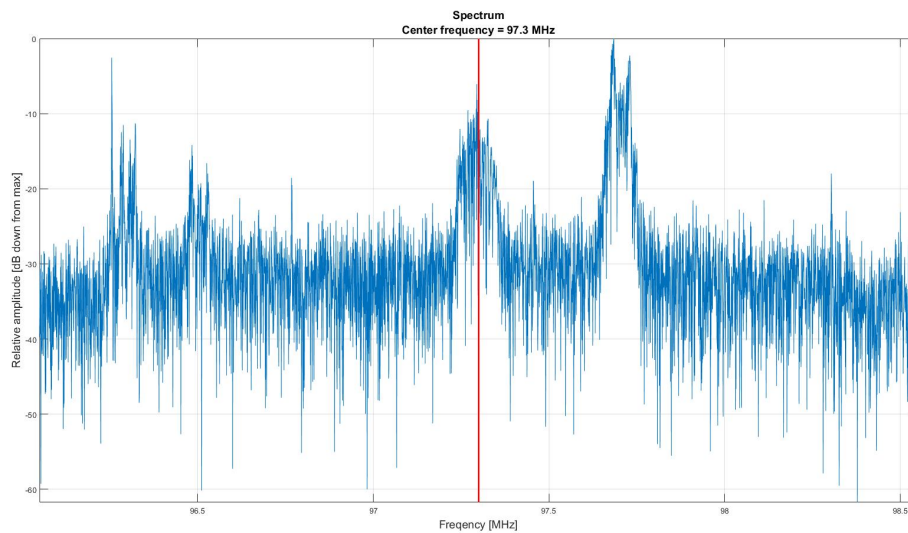
Figura 7 – Espectro das primeiras 5000 amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O espectro obtido através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) do primeiro segmento de 0.002s pode ser observado da Figura 8.

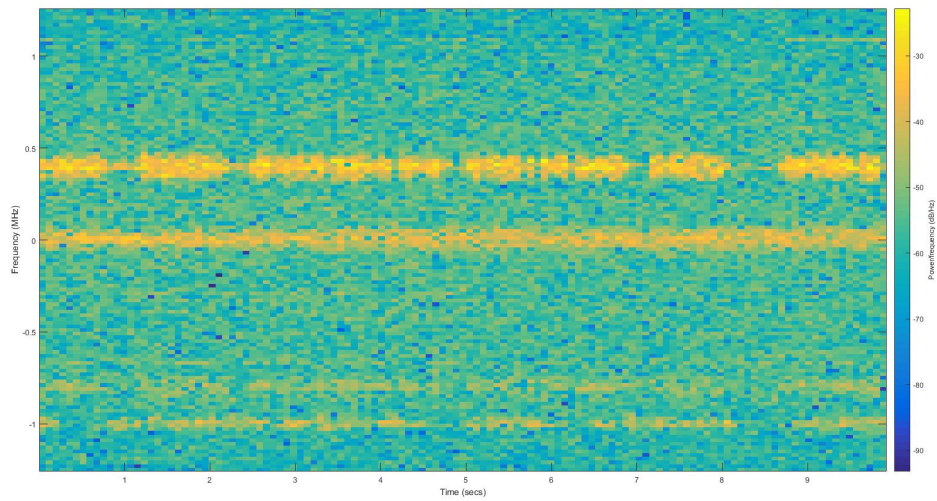
Figura 8 – FFT de um segmento de 2 ms



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9 mostra o espectrograma do sinal. Observa-se claramente o sinal duas estações de rádio nas faixas mais amareladas.

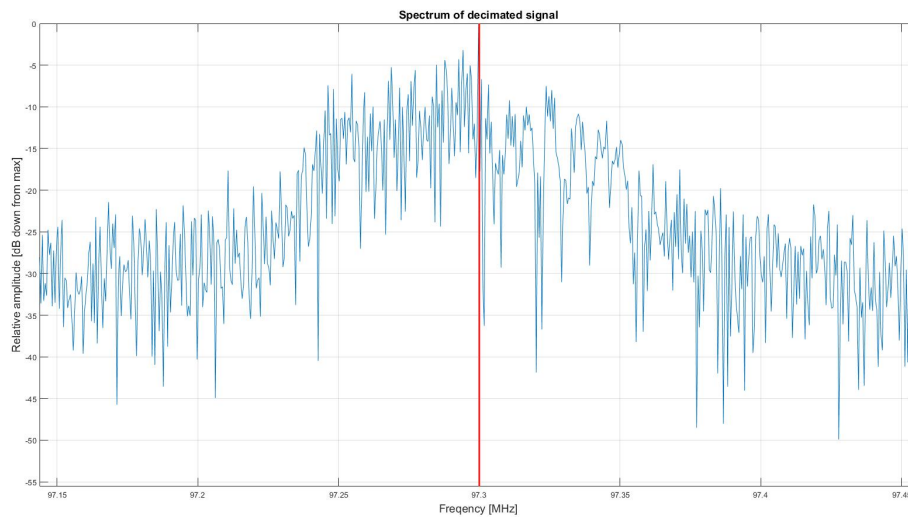
Figura 9 – Espectrograma do sinal amostrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um filtro passa baixo é aplicado no sinal para obter apenas o sinal da estação 97,3 MHz. Isso é realizado no MatLab através da função *decimate* que além de ser um filtro passa baixo também reduz a taxa de amostragem do sinal para um valor menor. O sinal é decimado em 8 vezes, o que implica em uma nova taxa de amostragem de 312,5 kHz. O resultado dessa operação pode ser conferido na Figura 10.

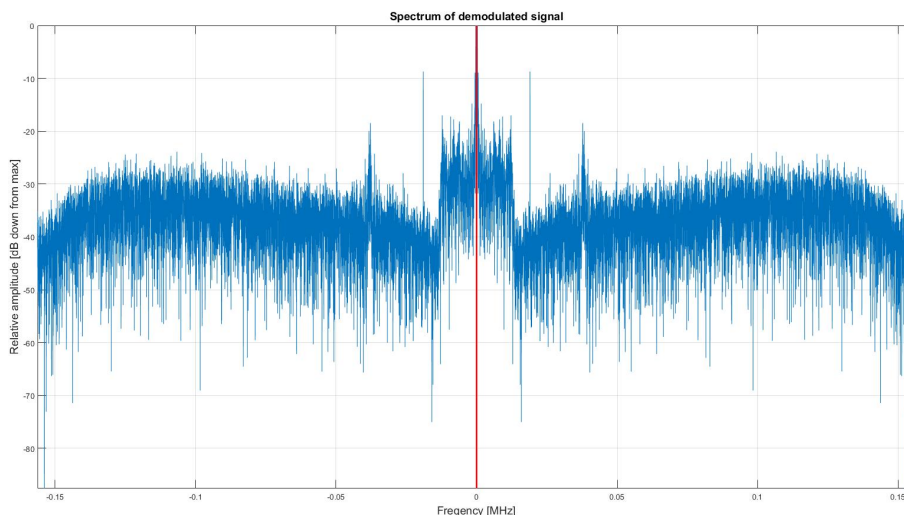
Figura 10 – Espectro do sinal filtrado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Finalmente o sinal é demodulado utilizando um algoritmo apresentado por [Scher \(2015\)](#). O espectro do sinal demodulado é demonstrado na Figura 11.

Figura 11 – Espectro do sinal FM demodulado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o áudio poder ser reproduzido, a taxa de amostragem do sinal precisa ser igual à taxa de amostragem da placa de som do computador. O sinal então é decimado por um fator de 10, implicando na taxa de amostragem de 31,25 kHz que coincide com a taxa de amostragem da maioria das placas de som.

Esse simples experimento proporcionou um entendimento melhor de como as amostras são enviadas pelo RTL-SDR, além de demonstrar potencial *software-defined radio* no qual é possível “sintonizar” em outra estação de rádio FM simplesmente via *software*.

## 4.2 Modo de amostragem direta

O RTL-SDR consegue sintonizar entre as frequências 24 MHz a 1766 MHz. Contudo, o ruído eletromagnético é conduzido na faixa de frequência de 1 kHz a 30 MHz. Para que o SDR consiga captar essa faixa de frequência será necessária uma modificação de *hardware* no *dongle* conhecida como *direct sampling mode* (modo de amostragem direta). Essa modificação consiste em permitir que os sinais da antena cheguem diretamente ao chip RTL2832U, desviando do *tuner* (LAUFER, 2015). Essa modificação permite o SDR sintonizar entre 1 Hz e 28,8 MHz (LAPUT et al., 2015).

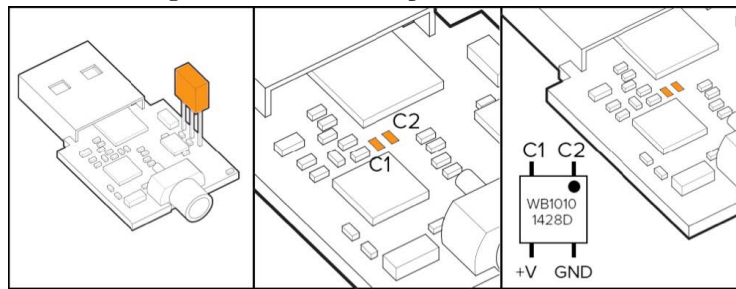
A modificação realizada pelos autores do *EM-Sense* é representada pela Figura 12. Consiste em remover o sensor Infravermelho (utilizado pelo controle remoto do *dongle*) e os capacitores C1 e C2, conectando um transformador de banda larga em seus lugares. Conforme pode ser observado na figura, é indicado que foi utilizado o transformador WB1010 produzido pela *Coilcraft*.

Foi solicitado a *Coilcraft* uma amostra gratuita desse transformador, que foi enviada dos Estados Unidos. Segundo o fabricante, a unidade do transformador custa US\$ 4,64 ou aproximadamente R\$ 22,67<sup>5</sup> (COILCRAFT, 2023).

<sup>5</sup> Cotação BACEN em 6 de nov. de 2023: 1 USD = 4,89 BRL



Figura 12 – Modificação de hardware



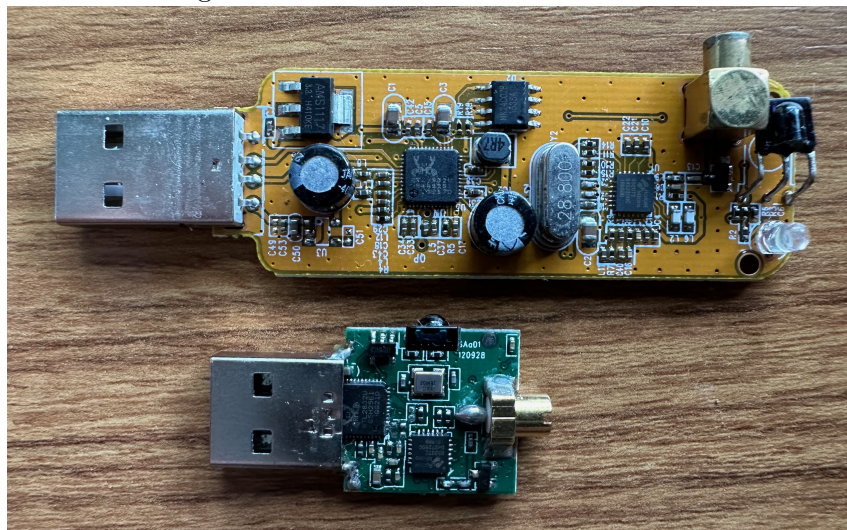
Fonte: Laput et al. (2015)

### 4.3 Modificação do hardware

Após a validação do funcionamento do SDR, foi iniciado a etapa de modificação do hardware. O objetivo é fazer um *bypass* do tuner de forma que o sinal da antena seja diretamente amostrado pelo conversor ADC. Em posse do *datasheet* do RTL e tendo como referência a descrição e a Figura 12, os capacitores C1 e C2 foram removidos e então tentou-se realizar a soldagem das ilhas com os terminais do transformador de banda larga fornecido pela *Coilcraft*. Essa modificação não foi bem sucedida devido à qualidade da PCB e restrições técnicas devido ao tamanho da mesma. Durante a tentativa de modificação, uma das ilhas de solda no qual estava conectado o capacitor C2 acabou caindo, o que resultou na inutilização do *dongle* para o propósito inicial.

Optou-se então em buscar outra abordagem para a modificação que permitiu a amostragem direta. Após buscar por outros modelos similares, foi encontrado um *dongle* que utiliza os mesmos chips *RTL-SDR* e *Tuner* (Figura 13).

Figura 13 – Diferentes formatos de PCB.

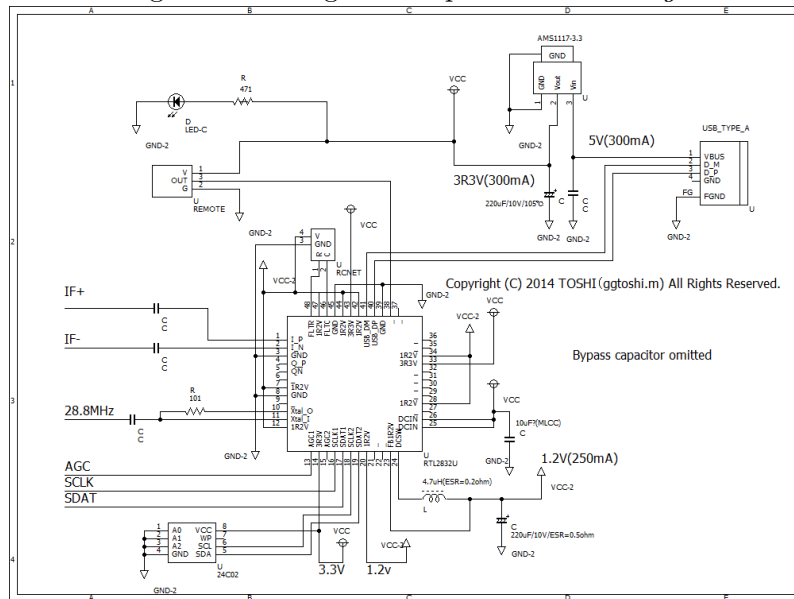


Fonte: Próprio autor

Conforme pode ser observado, o tamanho da PCB do *dongle* é consideravelmente maior que a do *dongle* utilizado pela pesquisa original (5,8 cm x 2,1 cm vs 1,8 cm x 1,8 cm). Esse outro formato facilitou o processo de modificação do hardware, pois além de oferecer um espaço maior de trabalho, a PCB possui serigrafia nas ilhas. Durante o processo de

pesquisa foi descoberto que o chip RTL-SDR possui dois canais de amostragem (I e Q), conforme esquemático da Figura 14.

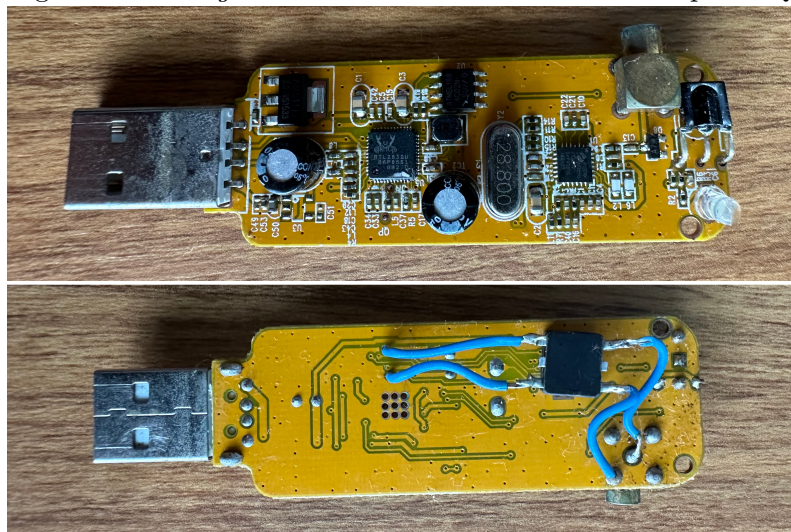
Figura 14 – Diagrama esquemático do *dongle*



Fonte: GGToshi (2014)

Para o uso comercial do *dongle*, apenas o canal I é utilizado (portas 1 e 2). Foi descoberto que é possível selecionar por *software* qual canal o SDR irá utilizar para fazer a amostragem. Diante disso, optou-se por utilizar o canal Q para habilitar a amostragem direta. Sendo assim, o transformador de banda larga foi diretamente conectado entre a antena e as portas 4 e 5 Q do chip RTL-SDR. A ilha da trilha que liga o pino *Qp* do chip pode ser identificada na região inferior esquerda da PCB maior da Figura 13. O resultado da modificação com o transformador soldado na PCB e conectado a porta Q pode ser visualizado na Figura 15.

Figura 15 – *Dongle* com transformador conectado na porta Q.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 Validação da modificação: amostragem direta

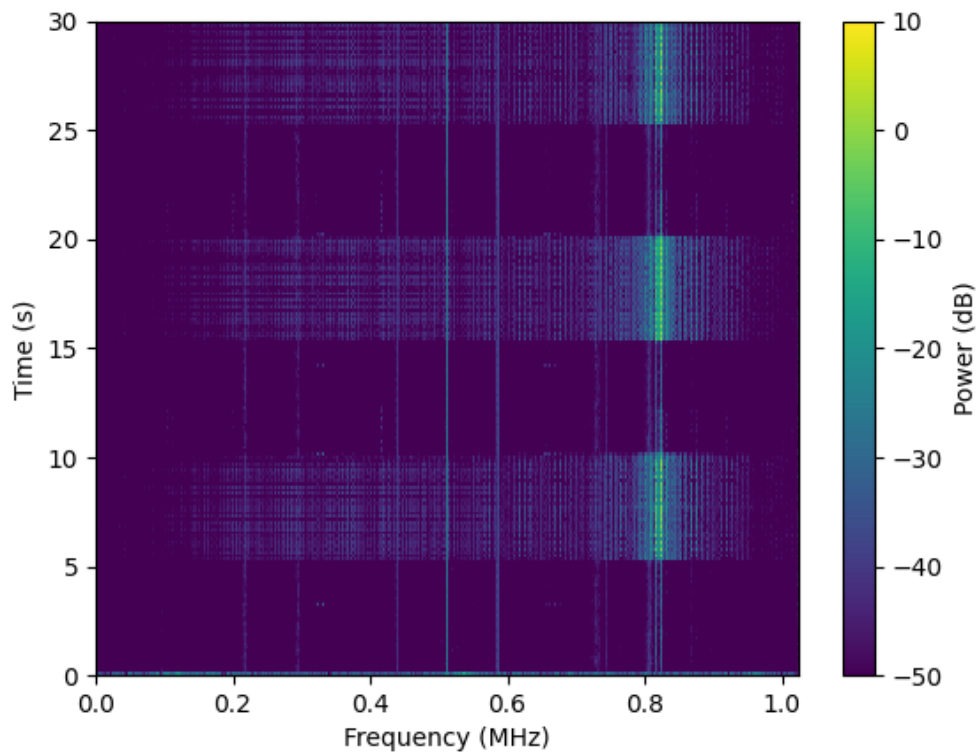
Com a modificação realizada (Figura 15), o *dongle* difere da pesquisa original ao permitir realizar amostragem direta e manter a capacidade de amostragem das faixas de frequências no qual o *dongle* foi projetado.

Foi realizado um experimento para validar a alteração por meio de um *script Python*. Um espectrograma em tempo real foi gerado para visualizar as variações do sinal capturado. Com o *script* execução, foi adotado o seguinte protocolo:

1. Foram capturados 30s de amostras com os seguintes parâmetros:
  - a) Frequência central: 512 kHz
  - b) Taxa de amostragem: 1,024 MHz
  - c) RTL Auto gain control: desativado
  - d) NFFT: 4096
  - e) Canal Q de amostragem habilitado (modo de amostragem direta)
2. Nos primeiros 5 segundos o usuário segurou apenas a antena com a mão esquerda
3. Durante os 5 segundos seguintes, o usuário continuou segurando a antena e, ao mesmo tempo, encostou e manteve o contato ao dispositivo alvo.
4. O passo 3 e 4 foram repetidos iterativamente até atingir os 30s de amostras.

Inicialmente o dispositivo alvo escolhido foi o *trackpad* de um *MacBook PRO 16"*, conforme pode ser observado na Figura 16 o intervalo de 0-5s possui um padrão de ruído claramente distinto do intervalo de 5-10s. Observa-se ainda que esse padrão de ruído se repete entre os intervalos de 15-20s e de 25-30s. É possível observar que existe um forte componente espectral na banda em torno de 800 kHz.

Figura 16 – Variação do espectrograma ao encostar no *trackpad*



Fonte: Próprio autor

Ainda é possível observar que existem duas componentes espectrais fortes em torno das faixas de frequência de 550 kHz e 590 kHz. Essas componentes e as demais seriam utilizadas para compor um perfil de ruído que seria subtraído do intervalo de interesse (e.g. 5-10s), obtendo-se assim apenas as componentes do ruído que compõe o dispositivo alvo.

#### 4.5 Coleta de sinais

Visando confirmar de maneira visual que dispositivos diversos possuem padrão de ruídos eletromagnéticos distinguíveis, foram escolhidos os seguintes dispositivos para coleta e visualização:

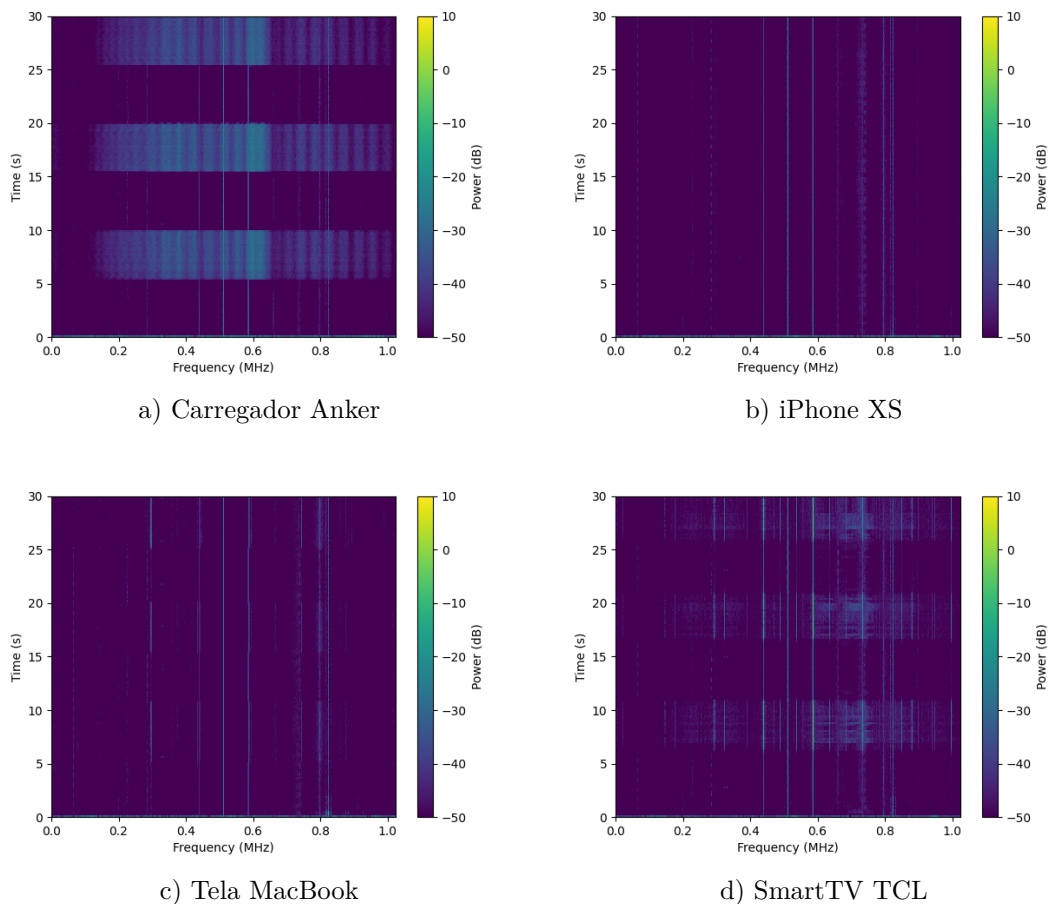
- Carregador portátil Anker 90W (sem carga)
- Apple iPhone XS
- Tela MacBook Pro 16"2023
- SmartTV TCL 32"

Todos os dados coletados seguiram o protocolo descrito anteriormente.

Conforme pode ser observado nas Figuras 17 a), c) e d) o espectrograma desses dispositivos é claramente distinguível. A exceção observada foi as amostras do dispositivo iPhone XS que visualmente não apresentaram diferenças do ruído ambiente. Isso pode

ser explicado devido ao dispositivo operar por uma bateria, ou seja, não possui o forte ruído inerente de fontes chaveadas (GUPTA; REYNOLDS; PATEL, 2010). Ainda assim, conforme a pesquisa original, possivelmente o ruído gerado pelo dispositivo poderá ser distinguido mediante um algoritmo classificador, sensível a sutilezas nas variações entre o perfil de ruído e o ruído do dispositivo.

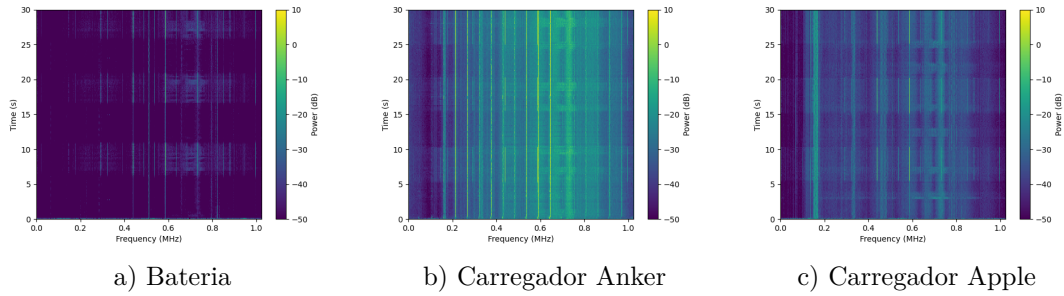
Figura 17 – Espectrograma de quatro dispositivos distintos seguindo protocolo de coleta



Fonte: Próprio autor

Outro fato encontrado durante a coleta das amostras é que a fonte de energia do dispositivo *host* influencia no ruído das amostras. No contexto das coletas, o dispositivo *host* é o laptop no qual o *dongle* está conectado. Na figura abaixo, pode ser observado os diferentes espectrogramas obtidos para o dispositivo SmartTV TCL ao variar a fonte de energia do dispositivo hospedeiro (*host*);

Figura 18 – Espectrograma de um mesmo dispositivo com o *host* com diferentes fontes de energia



Fonte: Próprio autor

Conforme pode ser observado na Figura 18 o sinal coletado sofre fortes influências a depender da fonte de energia do dispositivo hospedeiro. Ainda com o intenso ruído gerado pela fonte energia, é possível perceber nos três cenários que o padrão do ruído do dispositivo analisado se manteve independentemente da fonte de energia. Contudo, na Figura 18 b) ele começa a se tornar visualmente difícil de identificar. Sendo assim, a criação de um perfil de ruído que será subtraído do sinal é extremamente relevante para isolar os componentes únicos do ruído do dispositivo, conforme observado pela pesquisa original. Um ponto a ser observado, é que na pesquisa original o *dongle* estava conectado a um *Smartphone*, e conforme o perfil de ruído observado na Figura 17 b), conclui-se que devido ao *host* não possuir uma fonte de energia ativa, pouco ou nenhum ruído será transferido para as amostras do SDR.

## 5 Resultados e discussão

Com base na pesquisa original, foi possível replicar o *hardware* necessário para a implementação da tecnologia *EM-Sense*. Contudo, o presente trabalho difere-se da pesquisa original por utilizar um *hardware* que possui um formato de PCB distinto. A dificuldade encontrada para a modificação do *hardware* idêntico ao utilizado pela pesquisa original ocasionou a busca de um *hardware* similar que facilitou o processo de preparação para o modo de amostragem direta. Nesse processo foi descoberta a possibilidade implementar a amostragem direta de maneira distinta da pesquisa referência, sem a necessidade de perder a capacidade de sintonizar as frequências originais do SDR. Ao utilizar o canal Q para a amostragem direta, o *hardware* tornou-se mais versátil por ter sua faixa de banda de operação entre 0-14,4 MHz e 24-1766 MHz.

Foi encontrada uma grande comunidade de *hobbistas*, ao redor do SDR que o utiliza para as mais diversas aplicações. Desde sua descoberta, projetos com *hardware* melhorado (melhor dissipação de calor, cristal com maior precisão, melhor qualidade de construção, etc.) foram lançados, ainda mantendo um baixo custo (RTL-SDR.COM, 2023b). Algumas dessas opções já possuem o modo de amostragem direta implementado, sem a necessidade de modificações adicionais.

O dispositivo e os dados coletados confirmam os resultados da pesquisa original. Dispositivos eletrônicos claramente possuem assinaturas eletromagnéticas distintas no qual permitem sua identificação utilizando algoritmos classificadores. Uma descoberta do presente trabalho é que a fonte do dispositivo *host* pode contaminar de maneira

significativa os sinais amostrados, podendo prejudicar a qualidade dos sinais coletados e consequentemente a acurácia dos algoritmos classificadores.

## 6 Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho teve como objetivo replicar um dispositivo de baixo custo para a coleta de sinais de baixa frequência, baseando-se na pesquisa de Laput et al. (2015). O objetivo foi atingido com êxito, através do estudo da pesquisa original, da aquisição e modificação do hardware necessário, e do desenvolvimento de *scripts* em *Python* e *Matlab* para validar o êxito das modificações e a capacidade do dispositivo de coletar os sinais de baixa frequência. Outros *scripts* foram criados para visualização e implementação do protocolo de coletas de amostras.

As principais contribuições deste estudo incluem a demonstração da viabilidade de replicar dispositivos de baixo custo para fins científicos. Além disso, o *hardware* desenvolvido difere-se da pesquisa original por utilizar um segundo canal de mostragem do SDR, possibilitando coleta de dados em duas faixas de banda: 0-14,4 MHz e 24-1766 MHz.

O *hardware* desenvolvido e dados coletados poderão ser utilizados em trabalhos futuros para o treinamento de algoritmos de classificação, e seguinte comparação dos resultados obtidos com os da pesquisa original. É recomendada a investigação de algoritmos de classificação mais avançados, tais como *deep learning*, para comparação da acurácia na identificação dos objetos com o da pesquisa original.

## Referências

COHN, G. et al. Humantenna: Using the body as an antenna for real-time whole-body interaction. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2012. (CHI '12), p. 1901–1910. ISBN 978-1-4503-1015-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2207676.2208330>>. Citado na página [10].

COHN, G. et al. Your noise is my command: Sensing gestures using the body as an antenna. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2011. (CHI '11), p. 791–800. ISBN 978-1-4503-0228-9. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1978942.1979058>>. Citado na página [10].

COILCRAFT. *WB1010-PC*. 2023. Disponível em: <<https://www.coilcraft.com/en-us/products/transformers/wideband-rf-transformers/smt/wb/wb1010-pc/>>. Acesso em: 6 nov. 2023. Citado na página [24].

GGTOSHI. *Schematic RTL2832U R820T*. 2014. Disponível em: <[https://web.archive.org/web/20180419203850/https://ggtoshi.at.webry.info/201406/article\\_6.html](https://web.archive.org/web/20180419203850/https://ggtoshi.at.webry.info/201406/article_6.html)>. Acesso em: 18 nov. 2023. Citado (2) vezes nas páginas [19 e 26].

GUPTA, S.; REYNOLDS, M. S.; PATEL, S. N. Electrisense: Single-point sensing using emi for electrical event detection and classification in the home. In: *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing*. New York, NY, USA:

ACM, 2010. (UbiComp '10), p. 139–148. ISBN 978-1-60558-843-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1864349.1864375>>. Citado (2) vezes nas páginas [14 e 29].

HALL, M. et al. The weka data mining software: An update. *SIGKDD Explor. Newsl.*, ACM, New York, NY, USA, v. 11, n. 1, p. 10–18, nov. 2009. ISSN 1931-0145. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1656274.1656278>>. Citado na página [12].

IEEE. IEEE standard definitions and concepts for dynamic spectrum access: Terminology relating to emerging wireless networks, system functionality, and spectrum management. *IEEE Std 1900.1-2008*, p. 1–62, Oct 2008. Citado na página [15].

JONDRAL, F. K. Software-defined radio: Basics and evolution to cognitive radio. *EU-RASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, Hindawi Publishing Corp., New York, NY, United States, v. 2005, n. 3, p. 275–283, ago. 2005. ISSN 1687-1472. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/WCN.2005.275>>. Citado na página [15].

LAPUT, G. et al. EM-Sense: Touch recognition of uninstrumented, electrical and electromechanical objects. In: *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*. New York, NY, USA: ACM, 2015. (UIST '15), p. 157–166. ISBN 978-1-4503-3779-3. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2807442.2807481>>. Citado (11) vezes nas páginas [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 18, 24, 25 e 31].

LATHI, B. Amostragem: A ponte entre contínuo e discreto. In: *Sinais e sistemas lineares*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. cap. 8, p. 678–729. ISBN 9788560031139. Citado na página [18].

LAUFER, C. *The Hobbyist's Guide to the RTL-SDR: Really Cheap Software Defined Radio*. [S.l.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. ISBN 9781514716694. Citado (3) vezes nas páginas [18, 19 e 24].

LYONS, R. Quadrature Signals: Complex, But Not Complicated. *dspGuru.Com*, n. November, p. 1–17, 2008. Disponível em: <<http://dspguru.com/dsp/tutorials/quadrature-signals>>. Citado (2) vezes nas páginas [16 e 17].

National Instruments. *What is I/Q data*. 2016. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20161005153429/http://www.ni.com/tutorial/4805/en/>>. Acesso em: 3 nov. 2023. Citado na página [16].

PERAL-ROSADO, J. A. del et al. Comparative results analysis on positioning with real LTE signals and low-cost hardware platforms. In: *2014 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–8. ISSN 2325-5439. Citado (2) vezes nas páginas [18 e 19].

RTL-SDR.COM. *QUICK START GUIDE*. 2016. Disponível em: <<http://www.rtl-sdr.com/rtl-sdr-quick-start-guide/>>. Acesso em: 20 jul. 2016. Citado na página [20].

RTL-SDR.COM. *ABOUT RTL-SDR*. 2023. Disponível em: <<http://www.rtl-sdr.com/about-rtl-sdr/>>. Acesso em: 3 nov. 2023. Citado (3) vezes nas páginas [16, 18 e 19].

RTL-SDR.COM. *BUY RTL-SDR DONGLES (RTL2832U)*. 2023. Disponível em: <<https://www.rtl-sdr.com/buy-rtl-sdr-dvb-t-dongles/>>. Acesso em: 20 nov. 2023. Citado na página [30].



RTLSDR.ORG. *History and Discovery of RTLSDR*. 2016. Disponível em: <[http://rtlsdr.org/#history\\_and\\_discovery\\_of\\_rtlsdr](http://rtlsdr.org/#history_and_discovery_of_rtlsdr)>. Acesso em: 3 nov. 2023. Citado na página [18].

SCHER, A. *How to capture raw IQ data from a RTL-SDR dongle and FM demodulate with MATLAB*. 2015. Disponível em: <[https://www.aaronscher.com/wireless\\_com\\_SDR/RTL\\_SDR\\_AM\\_spectrum\\_demod.html](https://www.aaronscher.com/wireless_com_SDR/RTL_SDR_AM_spectrum_demod.html)>. Acesso em: 3 nov. 2023. Citado (2) vezes nas páginas [21 e 23].

SRUTHI, M. B. et al. Low cost digital transceiver design for Software Defined Radio using RTL-SDR. In: *Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), 2013 International Multi-Conference on*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 852–855. Citado na página [19].

SUPERKUH. *RTL-SDR and GNU Radio with Realtek RTL2832U [Elonics E4000/Raphael Micro R820T] software defined radio receivers*. 2016. Disponível em: <<http://superkuh.com/rtlsdr.html>>. Acesso em: 3 nov. 2023. Citado (2) vezes nas páginas [18 e 19].

VACHHANI, K.; MALLARI, R. A. Experimental study on wide band FM receiver using GNURadio and RTL-SDR. In: *Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), 2015 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1810–1814. Citado na página [15].

Wireless Innovation Forum. *What is Software Defined Radio?* 2016. 1–6 p. Disponível em: <<http://www.wirelessinnovation.org/assets/documents/SoftwareDefinedRadio.pdf>>. Acesso em: 3 nov. 2023. Citado na página [15].

YOUNGBLOOD, G. A Software-Defined Radio for the Masses , Part 1. *QEX*, p. 13–21, jul/aug 2002. Citado (2) vezes nas páginas [15 e 17].

ZIMMERMAN, T. G. Personal area networks: Near-field intrabody communication. *IBM Syst. J.*, IBM Corp., Riverton, NJ, USA, v. 35, n. 3-4, p. 609–617, set. 1996. ISSN 0018-8670. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1147/sj.353.0609>>. Citado na página [15].