



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

**Centro de Tecnologia e Ciências**

**Faculdade de Engenharia**

**Thiago Cezar de Souza Carneiro**

**Deteccão e estimação da posição de pessoas em ambientes  
internos a partir da análise espectral de sinais PLC**

**Rio de Janeiro**

**2024**

Thiago Cezar de Souza Carneiro

**Detecção e estimação da posição de pessoas em ambientes internos a partir  
da análise espectral de sinais PLC**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Orientadores: Prof. Dr. Lisandro Lovisolo e Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C289 Carneiro, Thiago Cezar de Souza.  
Detecção e estimação da posição de pessoas em ambientes  
internos a partir da análise spectral de sinais PLC / Thiago Cezar de  
Souza Carneiro. – 2024.  
74 f.

Orientadores: Lisandro Lovisolo, Michel Pompeu Tcheou.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Detectores - Teses. 3. Análise  
espectral - Teses. 4. Linhas de telecomunicação - Teses. I. Lovisolo,  
Lisandro. II. Tcheou, Michel Pompeu. III. Universidade do Estado do  
Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 543.42

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou  
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Thiago Cezar de Souza Carneiro

**Detecção e estimação da posição de pessoas em ambientes internos a partir  
da análise espectral de sinais PLC**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Redes de Telecomunicações. Linha de pesquisa: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Lisandro Lovisolo, D.Sc. (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou, D.Sc. (Orientador)

Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Luis Fernando Corrêa Monteiro

Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Moisés Vidal Ribeiro

Faculdade de Engenharia - UFJF

Rio de Janeiro

2024

## AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus por me guiar nessa jornada fantástica. Aos meu pais José Jorge e Elizabeth Carneiro pelo exemplo e pelo amor ao longo de minha vida. À minha esposa Carla Rogério por me amar incondicionalmente e ser minha companheira em todos os momentos. Aos orientadores, prof. Dr. Lisandro Lovisolo e prof. Dr. Michel Tcheou por acreditar no meu trabalho me dando a oportunidade de fazer parte desse grande projeto.

*Se pedir a Deus para ser grande, Ele o tornará grande?  
Ou dará a oportunidade para fazer-se grande?*

## RESUMO

**CARNEIRO**, Thiago C. S., *Detecção e estimação da posição de pessoas em ambientes internos a partir da análise espectral de sinais PLC*. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, 2024.

Esta dissertação investiga a possibilidade de detectar a presença de pessoas em ambientes internos, bem como determinar suas posições relativas por meio do acoplamento magnético entre essas pessoas e a rede elétrica. O estudo baseia-se na análise espectral do sinal PLC e alterações provocadas pela presença de pessoas na resposta do canal quando a rede elétrica é utilizada como meio de transmissão. A metodologia deste estudo consiste em medir e analisar o comportamento das portadoras OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) em transmissões de dados realizadas via sistemas de comunicação por linha de energia (PLC-*Power Line Communication*) com e sem a presença de pessoas (alvos) no ambiente. Dessa forma, é possível avaliar os impactos da interação entre as linhas de energia e os corpos presentes no ambiente que, neste caso, corresponde a uma sala. Os efeitos observados dessa interação podem ser empregados como indicadores para a detecção passiva de pessoas em ambientes internos, sem a necessidade de qualquer ação ativa por parte do alvo. A infraestrutura experimental foi idealizada e montada dentro de uma sala, possibilitando a coleta de dados em condições controladas. A análise das medições coletadas permite concluir que a detecção passiva da presença de pessoas, a partir das alterações no canal PLC, é viável. Além disso, os resultados indicam o potencial de estimar a posição relativa dos ocupantes do ambiente.

Palavras-chave: Detecção; Posicionamento; PLC; HPAV.

## ABSTRACT

**CARNEIRO**, Thiago C. S., *Detection and estimation of the position of people indoors from spectral analysis of PLC signals*. 2024. 74 f. Dissertation (Master's Degree in Electronic Engineering) - Faculty of Engineering, State University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

This dissertation investigates the possibility of detecting the presence of people in indoor environments and determining their relative positions through the magnetic coupling between these individuals and power lines. The study is based on analyzing the alterations caused by the presence of people in the channel response when these lines are used as a transmission medium. The proposed approach involves measuring and analyzing the behavior of OFDM carriers in data transmissions conducted via Power Line Communication (PLC) systems, with and without people present in the environment. This enables the assessment of the impact of the interaction between the power lines and the bodies in the space, which, in this case, corresponds to a classroom. The observed effects of this interaction can be used as indicators for the passive detection of people in indoor environments, without requiring any active participation from the target. The experimental infrastructure was designed and set up in a classroom, allowing for data collection under controlled conditions. The analysis of the collected measurements shows that the passive detection of people, based on changes in the PLC channel, is feasible. Moreover, the results indicate the potential for estimating the relative positions of the occupants within the environment.

Keywords: Detection; Positioning; PLC; HPAV.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ilustração de Presença de Alvo e Acoplamento Magnético. ....	19
Figura 2	Ilustração de um sistema ILTB (Adaptado de [1]). ....	26
Figura 3	Ilustração de um sistema IBTB (Adaptado de [1]). ....	27
Figura 4	Ilustração de um sistema IBTO (Adaptado de [1]). ....	28
Figura 5	Bandas de frequência para os padrões IEEE PLC e separação das subportadoras OFDM. As notações NB, MB e BB referem-se a banda estreita, banda média e banda larga, respectivamente. Observe que a faixa de frequência BB também inclui a banda MB. (Adaptado de [1]). ....	30
Figura 6	Bandas de frequência para as versões HPAV (azul) e HPAV2 (verde) e separação das subportadoras OFDM. Observe que a faixa de frequência do HPAV2 também inclui a banda do HPAV. ....	31
Figura 7	Diagrama dos componentes utilizados para o experimento. ....	32
Figura 8	Instalação Física do ambiente de teste. Destaques para a fita elétrica instalada na parede, modem PLC conectado à fita elétrica e conjunto de sonda usada para captura espectral. ....	34
Figura 9	Planta da sala de aula utilizada no experimento e a representação da divisão em 16 regiões. ....	35
Figura 10	Par de Modems PLC AV600 utilizados no experimento. ....	36
Figura 11	Banda inferior do espectro PLC. Faixa de 1,8- 30 MHz. ....	37
Figura 12	Banda superior do espectro PLC. Faixa de 30- 70 MHz. ....	38
Figura 13	Log do tráfego entre modems PLC, registrando velocidades de conexão próximo dos 100Mbps. Extraído do iPerf Cliente. ....	39
Figura 14	Conjunto de Sonda: Filtro passa-altas, Computador com Software SignalVU e analisador de espectro RSA306 da Tektronix. ....	40
Figura 15	Filtro Passa-Altas desmontado. ....	41
Figura 16	Resposta em frequência do Filtro Passa-Altas. Ponto de corte (-3 dB) em 700 kHz, aproximadamente. ....	42
Figura 17	Esquema elétrico do filtro Passa-Altas. ....	43
Figura 18	Analisador de Espectro RSA306 utilizado no experimento. ....	43

Figura 19	Porta "Trigger/ Sync" do Analisador de Espectro RSA306. ....	44
Figura 20	Montagem Física do Circuito de Trigger Utilizando-se Arduino. ....	44
Figura 21	Composição da Média de Amostras, o "Espectro Médio", ou "Média das Raias Espectrais".....	46
Figura 22	Diagrama em blocos do processamento de amostras. A primeira parte do diagrama (lado esquerdo da figura) mostra o processamento do banco de capturas de sala vazia acumuladas. A segunda parte, lado direito, mostra o processamento de capturas com alvo presente na sala. ....	48
Figura 23	Representação gráfica exemplificando a obtenção do espectro médio e dos limites superior e inferior. Os limites calculados são utilizados para codificação das capturas .....	49
Figura 24	Representação gráfica dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas de Sala Vazia. ....	50
Figura 25	Representação dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas de Sala Vazia sem <i>outliers</i> .....	51
Figura 26	Sobreposição de cada uma das capturas com com presença do alvo (150 por região onde o alvo pode estar). ....	51
Figura 27	Representação gráfica dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas com a presença do alvo. ....	52
Figura 28	Representação gráfica dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas com presença do alvo, sem <i>outliers</i> . ....	52
Figura 29	Exemplo de representação gráfica para comparação entre espectro médio de sala vazia e espectro médio com presença do alvo. ....	53
Figura 30	Diagrama em blocos do processamento de amostras. A primeira parte do diagrama (lado esquerdo da figura) mostra o processamento do banco de capturas de sala vazia acumuladas. A segunda parte, lado direito, mostra o processamento de capturas com sala vazia referenciada ao alvo. ....	58
Figura 31	Espectros de potências média com o alvo nas 16 regiões e com a sala vazia (em preto), referentes às sondas 1, 2 e 3, respectivamente.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Categorias, características e cenários de aplicação ampla de sistemas de posicionamento usando a rede elétrica. A categoria indica se o PLPS emprega infraestrutura específica para produzir e injetar sinais de referência ou não ( <i>based</i> × <i>less</i> ) e se o alvo está envolvido no processo de posicionamento ou não ( <i>based</i> × <i>obtuse</i> ). As características especificam se e onde os sinais de referência são produzidos, se eles podem vir do PLC, qual parte do sistema coleta os recursos de posicionamento e onde a posição é resolvida. Os cenários de aplicação: posicionamento autônomo, discreto e transparente. ....	23
Tabela 2	Especificações principais das PHYs FFT OFDM e Wavelet OFDM do padrão IEEE BB-PLC 1901. ....	30
Tabela 3	Perfis de transmissão MIMO e SISO para HPAV2 .....	31
Tabela 4	Parâmetros de configuração do RSA306, utilizado na captura espectral realizada pelas sondas. ....	40
Tabela 5	Características corporais dos alvos. ....	46
Tabela 6	Vetor de Comparação e sua composição de código Binário - Exemplo retirado do Vetores de Comparação do Alvo #3 na sonda 1, nas 16 regiões. ....	53
Tabela 7	Resultado das somas dos códigos (resultado( <i>r</i> )) obtidos em cada sonda, relacionando cada alvo com a região da sala onde estava localizado, no momento da captura do espectro dos pulsos OFDM).....	54
Tabela 8	Número de regiões em que cada alvo é detectado corretamente em cada sonda variando o limiar de decisão. ....	55
Tabela 9	Tabela com os limiares de decisão escolhido para cada sonda e seus respectivos valores calculados. Escolha hipotética de limiares. A detecção dos alvos deve ocorrer em 8 ou mais regiões. ....	56
Tabela 10	Regiões nas quais o alvo é corretamente detectado aplicando o limiar ao somatório dos elementos do código binário. Resultado da Tabela 9 aplicado à Tabela 7. ....	56

Tabela 11	Resultado da soma das raias espectrais do vetor de comparação resultante entre Banco de Sala Vazia e Sala Vazia referente a alvos .....	58
Tabela 12	Resultado das somas obtidas na comparação entre média do banco de sala vazia e média com presença de alvo - com destaque em vermelho para detecção exitosa na comparação com a Tabela 7. ....	59
Tabela 13	Reinterpretação da Tabela 10 agora organizada por Alvos. Regiões nas quais o alvo é corretamente detectado considerando cada uma das sondas – o destaque em vermelho significa uma detecção exitosa – a cor azul indica regiões onde o alvo foi detectado por no mínimo duas sondas. ....	63
Tabela 14	Reinterpretação da Tabela 12 agora organizada por Alvos. Regiões nas quais o alvo é corretamente detectado considerando cada uma das sondas – o destaque em vermelho significa uma detecção exitosa – a cor azul destaca regiões onde o alvo foi detectado por no mínimo duas sondas. ....	64

## LISTA DE SIGLAS

AP	<i>Access Point</i>
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
AT	Alta Tensão
BB	<i>Broad Band</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Alternada
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMF	<i>Electromagnetic Field</i>
EMR	<i>Electromagnetic Radiation</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
GPS	<i>Global Position System</i>
HPAV	<i>Home Plug AV</i>
IDW	<i>Inverse Distance Weight</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IBTB	<i>Infra-Based Target-Based</i>
IBTO	<i>Infra-Based Target-Obtuse</i>
ILTB	<i>Infra-Less Target-Based</i>
IPS	<i>Indoor Positioning System</i>
ITU-T	<i>Intl. Telecom. Union - Telecom. Standardization Sector</i>
KNN	<i>K-Nearest Neighbor</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>

MB	<i>Medium Band</i>
MIMO	<i>Multiple-in Multiple-out</i>
MT	<i>Média Tensão</i>
NB	<i>Narrow Band</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PLA	<i>Polilatic Acid</i>
PLC	<i>Powe Line Communication</i>
PLPS	<i>Power Line Positioning System</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RF	<i>Radiofrequência</i>
RSA	<i>Real-Time Spectrum Analyzer</i>
RSS	<i>Received Sinal Strength</i>
SISO	<i>Single-in Single-out</i>
SVM	<i>Support Vector Machine</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TTL	<i>Transitor-Transistor Logic</i>
UHF	<i>Ultra-High Frequency</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
VHF	<i>Very-High Frequency</i>

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1	<b>DETECÇÃO E POSICIONAMENTO POR LINHAS DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	22
1.1	<b>Tipos de Sistemas de Detecção e Posicionamento</b> .....	24
1.2	<b>Arquiteturas de Sistemas de Detecção e Posicionamento</b> .....	25
1.2.1	<i>ILTB - Infra-Less Target Based</i> .....	26
1.2.2	<i>IBTB - Infra-Based Target-Based</i> .....	27
1.2.3	<i>IBTO - Infra-Based Target-Obtuse</i> .....	28
1.2.4	Determinação da Posição .....	29
1.3	<b>Categorias e Padrões PLC</b> .....	29
2	<b>METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	32
2.1	<b>Ambiente Experimental</b> .....	33
2.2	<b>Instalação Elétrica</b> .....	34
2.3	<b>Modem PLC</b> .....	35
2.4	<b>Ocupação do Canal</b> .....	37
2.5	<b>Sondas de Captura</b> .....	38
2.5.1	Filtro Passa-Altas .....	38
2.5.2	Analisador de Espectro .....	39
2.5.3	Trigger .....	41
2.6	<b>Metodologia de Análise das Capturas</b> .....	42
2.6.1	Análise Preliminar no Tratamento de Amostras para Determinação de Presença com Alvo Único .....	45
2.6.2	Tratamento de Amostras para Determinação de Presença com Diversidade de Alvos .....	46
2.6.2.1	Tratamento Direto .....	47
2.6.2.2	Tratamento Direto com Limiar de Decisão .....	55
2.6.2.3	Tratamento Referenciado a Alvos .....	57

3	<b>RESULTADOS</b> .....	60
3.1	Resultado da Análise Preliminar no Tratamento de Amostras para Determinação de Presença com Alvo Único .....	60
3.2	Resultado da Análise de Múltiplos Alvos - Tratamento Direto .....	61
3.2.1	Resultados Utilizando Limiar de Decisão .....	62
3.2.2	Resultados Utilizando Tratamento Referenciado a Alvos .....	64
	<b>CONCLUSÃO</b> .....	66
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	68

## INTRODUÇÃO

Um sistema de detecção de presença tem como objetivo identificar a presença ou ausência de um alvo em um local ou ambiente. Por outro lado, um sistema de posicionamento tem como finalidade estimar a posição de um alvo através de suas coordenadas em um espaço de duas ou três dimensões [1–5].

Ao longo do tempo, a evolução tecnológica permitiu o desenvolvimento de diferentes técnicas de posicionamento usando ondas eletromagnéticas/sinais de radiofrequência [5]. Desde os primeiros sistemas de orientação naval auxiliados por rádio, como o patenteado em 1902 [6], houve avanços significativos no uso de uma ampla gama de frequências, modulações, pulsos e códigos sofisticados para resolver o problema do posicionamento. Com o suporte de técnicas avançadas de processamento de sinais, computação de alto desempenho e, mais recentemente, inteligência artificial, é possível estimar com elevada precisão a posição de objetos e pessoas em diferentes cenários.

A demanda e objetivo por recursos de posicionamento vêm aumentando e se modificando ao longo dos anos. As primeiras ideias visavam, por exemplo, a detecção naval, como a presente no sistema de detecção naval patenteado em 1906 por Christian Huelsmeyer [7–9]; nos dias atuais, *smartphones* e *gadgets* fornecem constante e periodicamente a localização de seus usuários como o objetivo de promover melhores experiências no uso de alguns aplicativos.

Ao menos duas vertentes importantes estão presentes no campo de pesquisa de localização e posicionamento: militar e civil. Por décadas o refino da detecção e do posicionamento de diferentes objetos tem sido pauta da indústria militar e civil. Do ponto de vista militar, no qual fazem-se necessários a detecção e o rastreamento de possíveis ataques inimigos e a localização de tropas, armamentos e veículos, por exemplo, o desenvolvimento visou aperfeiçoar a confiabilidade e a precisão, sendo o custo e complexidade fatores secundários nesta área. Já no desenvolvimento para a indústria civil, há uma grande preocupação com o custo e complexidade dos sistemas de posicionamento, assim, o principal objetivo tem sido o de minimizar os requisitos básicos para que o sistema retorne uma posição, isto é, tenha maior disponibilidade a menor custo, em detrimento de uma degradação aceitável da precisão.

Ainda no campo Civil, podemos considerar dois cenários principais de posiciona-

mento: com cobertura global ou interna (*indoor*) [2,4,5]. O posicionamento global possui um representante bem conhecido do público em geral, o GPS (*Global Positioning System*) ou Sistema de Posicionamento Global. Analogamente, quando em ambientes confinados, define-se o termo Sistema de Posicionamento Interno ou, do inglês, *Indoor Positioning System* (IPS).

Sistemas de detecção e posicionamento de pessoas em ambientes internos são essenciais em muitos casos, permitindo por exemplo:

- Emergência - Saber onde há pessoas em um edifício em uma situação de emergência;
- Segurança - Detectar acessos não autorizados;
- Eficiência de recursos - Saber se salas estão sendo utilizadas para ativar ou desativar climatização, luz ou até mesmo trancar ou destrancar portas de acesso.

O uso da infraestrutura da rede elétrica para fins de posicionamento pode ser considerado uma abordagem inovadora na localização de dispositivos ou alvos, e são conhecidos como PLPS (*Power Line Positioning Systems*) ou Sistemas de Posicionamento em Linhas de Energia. Essa abordagem se mostra promissora devido à onipresença das linhas de energia, que oferecem uma infraestrutura pré-existente e, em muitos casos, estável, em diversos ambientes.

O PLPS explora as propriedades físicas das linhas de energia e os sinais que elas conduzem para obter informações sobre a posição do alvo. Essa área de pesquisa tem suas raízes em trabalhos anteriores que exploraram a irradiação de sinais específicos para fins de posicionamento através das linhas de energia [10,11]. Uma das principais vantagens dos PLPS é a sua capacidade de fornecer uma solução de posicionamento discreta e de baixo custo, aproveitando a infraestrutura existente.

O PLPS pode ser categorizado em três tipos principais [1]:

- **Sistemas sem infraestrutura e baseados no alvo (ILTB – *Infra-less Target-based*):** Nestes sistemas, o dispositivo utiliza a rede elétrica para se posicionar, sem a necessidade de infraestrutura adicional. Um exemplo disso são os robôs que usam a detecção do campo elétrico para se conectar autonomamente a tomadas [12].
- **Sistemas baseados em infraestrutura e insensíveis ao alvo (IBTO – *Infra-based Target-obtuse*):** A infraestrutura PLPS injeta sinais rede elétrica e monitora as distorções causadas pela presença do alvo, permitindo sua detecção e sua

localização. O alvo não participa ativamente do processo de posicionamento. O estudo realizado em [13, 14] demonstrou a viabilidade desse método, utilizando um sinal de referência de 70 MHz, injetado no fio neutro da rede elétrica, para detectar e localizar pessoas com base nas alterações na amplitude desse sinal.

- **Sistemas baseados em infraestrutura e no alvo (IBTB – *Infra-based Target-based*):** A infraestrutura do PLPS, nesse caso, também injeta um sinal de referência na rede elétrica. Esse sinal é agora detectado pelo alvo, que o utiliza para estimar sua posição. Os sinais podem ser irradiados diretamente pela linha de energia ou por meio de tecnologias híbridas, como RF ou luz visível [15–20].

A viabilidade da utilização da Comunicação por Linha de Energia (PLC) para implementar PLPS baseados em infraestrutura tem sido explorada [21]. Os primeiros sistemas PLC datam do início do Século XX, conforme descreve [22]. Inicialmente, eram utilizados para a transmissão de dados simples por linhas de alta tensão. Com o passar das décadas e com a evolução tecnológica, surgiram as tecnologias atuais que são capazes de empregar grandes larguras de banda e assim oferecer altas taxas de transferência [22].

A rede elétrica em geral não apresenta impedância característica casada, como observado em linhas de RF (radiofrequência) pura. Essa característica gera uma irradiação incomum devido ao desbalanceamento elétrico da rede [23]. Nas linhas residenciais, por exemplo, ocorrem diversas anomalias [24] devido à inserção e remoção de eletrodomésticos e eletrônicos na rede. Conforme isso acontece, o descasamento limita a faixa de frequência máxima que poderia trafegar por essa rede elétrica e, como há uma mudança constante no tipo e quantidade de equipamentos conectados à rede, isso torna a faixa de frequência disponível para transmissão de dados altamente variável.

O uso de OFDM pela tecnologia PLC permite acomodar essa variabilidade ao subdividir a banda em subportadoras e empregá-las para comunicação (transmissão e recepção) de forma dinâmica e configurável a partir do sensoriamento do canal. Esse dinamismo auxilia o PLC a decidir priorizar regiões do espectro onde seja possível receber uma maior quantidade de informações, mitigando as perdas seletivas em frequência.

Analogamente ao PLPS, as portadoras OFDM podem ser utilizadas como sinais de referência injetados na rede elétrica e, por conseguinte, como mecanismo de detecção e posicionamento dos alvos. Os modems PLC, já disponíveis no mercado, podem ser utilizados para injetar esses sinais de referência na rede elétrica, proporcionando uma

infraestrutura pronta para os sistemas IBTO e IBTB.

Há diferentes padrões de sistemas PLC publicados pelo ITU-T (*International Telecommunications Union - Telecommunications Standardization Sector*) [10], IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* [10, 24] e pela *HomePlug Alliance* [11]. Para este estudo, um PLC padrão *HomePlug* foi utilizado, mais especificamente, a versão *HomePlug AV2* (HPAV2) de 2012.

O PLC pode ser classificado em três grupos principais, de acordo com a largura de banda: *Ultra Narrow Band* (UNB) (125 - 3000 Hz), *Narrow Band* (NB) (3 - 500 kHz) e *Broad Band* (BB) (1, 8 - 100 MHz) [22]. O BB- PLC é a escolha natural para este estudo, considerando o comprimento de onda. O padrão HPAV2 opera na faixa teórica compreendida entre 1, 8 e 86, 13 MHz, contudo apenas uma parte de sua faixa estendida será analisada (30 MHz a 70 MHz). Estima-se biotipos considerados como possíveis alvos com alturas entre 1,5 e 2 metros. Calculando  $\frac{1}{4}$  de comprimento de onda para a faixa de 40- 50 MHz, o resultado indica comprimentos de onda que estão entre 1, 50 e 1, 90 metros, aproximando-se dos biotipos estimados.

O BB-PLC apresenta um potencial considerável para ser utilizado na detecção de alvos humanos, pois opera em frequências onde o possível acoplamento entre o corpo humano e a rede elétrica, com o uso do BB-PLC, pode ser significativo. Esse potencial é principalmente observado nas alterações do canal PLC devido à interação com os alvos e podem ser utilizadas, essas alterações, como modo de mensurar e definir se uma detecção é exitosa.

Embora o PLPS apresentem um grande potencial, alguns desafios precisam ser superados. A largura de banda limitada da rede elétrica pode restringir a precisão e a confiabilidade do posicionamento. Além disso, a propagação dos sinais nessas redes é afetada pelo ambiente, incluindo a fiação do edifício, os dispositivos conectados e a presença de pessoas. A compatibilidade eletromagnética (EMC, *Electromagnetic Compatibility*) também é uma preocupação, pois as emissões eletromagnéticas dos PLPS devem estar em conformidade com as normas de EMC e regulamentações vigentes. [21, 25–28].

No geral, os PLPS representam uma área de pesquisa promissora com diversas aplicações potenciais. A pesquisa e desenvolvimento contínuos são essenciais para superar os desafios e permitir a implementação em larga escala dos PLPS. O desenvolvimento de novas tecnologias e estratégias para melhorar a precisão, confiabilidade e robustez dos

PLPS é fundamental para a sua ampla adoção. A integração com outras tecnologias de posicionamento, como RF, ultrassom e luz visível, também pode ser uma abordagem interessante para superar as limitações dos PLPS e criar sistemas de posicionamento mais robustos e precisos [18, 29–34].

Neste estudo objetiva-se avaliar um sistema de sensoriamento espectral visando constatar se alterações de potências de portadoras OFDM em redes PLC permitem detectar a presença de uma pessoa e ainda determinar sua posição, de forma passiva.

A estrutura para os testes da metodologia proposta consiste em uma sala de 40 m<sup>2</sup>, uma instalação elétrica utilizando fita elétrica fixada por toda a extensão horizontal da parede interna da sala e tomadas, nas quais são conectados modems PLC e sondas. Três conjuntos de sonda são utilizadas para captura e análise do sinal PLC. Estas sondas estão conectadas à rede elétrica (fita elétrica), capturando em tempo real os símbolos PLC e obtendo as amplitudes de suas componentes espectrais (as portadoras OFDM) usadas na comunicação entre os modems PLC (Figura 1).

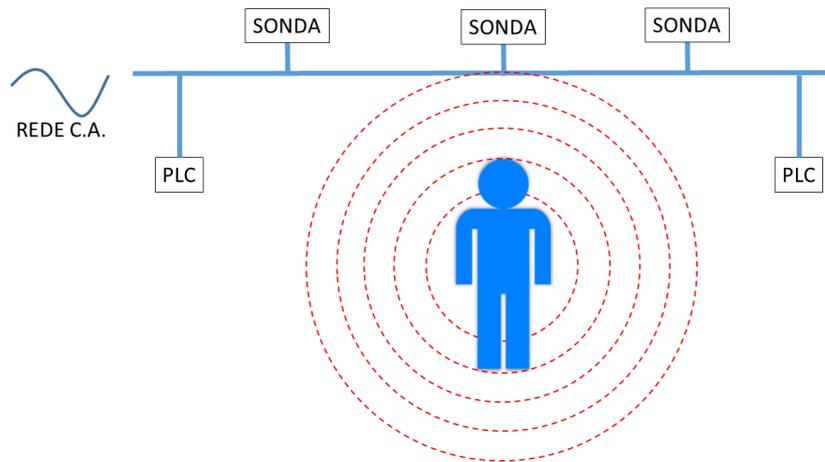


Figura 1: Ilustração de Presença de Alvo e Acoplamento Magnético.

Após uma captura de controle, ou seja, o registro do perfil do espectro com as portadoras OFDM com a sala vazia, é introduzido no ambiente o corpo humano, o alvo a detectar. O alvo é posicionado em diferentes regiões da sala e são feitas capturas em cada uma dessas regiões, totalizando 16. Em cada região, são realizadas 150 capturas únicas em cada uma das sondas sincronizadamente, com espaçamento de 300 ms entre as capturas. Cada captura possui 2294 amostras, distribuídas ao longo da largura de banda de 40 MHz (30-70 MHz). Ao final, comparamos os sinais medidos com sala vazia aos

resultados obtidos com a captura em cada uma das regiões. A partir desses resultados poderemos avaliar a possibilidade de detecção de presença do indivíduo no ambiente. Para a estimativa de posição, a depender dos resultados de detecção, métodos mais sofisticados de classificação e algoritmos necessitam ser usados.

## Objetivos

Esta dissertação visa propor e avaliar uma solução para detectar alvos (pessoas) em ambientes internos com um mínimo de rastreabilidade, com baixo custo, usando sistemas de comunicação e rede elétrica já existentes. Para isso, foca-se na utilização da tecnologia PLC para detectar a presença desses alvos num ambiente interno. Pressupõe-se que o acoplamento magnético entre as pessoas e a rede elétrica muda conforme a pessoa se move. Isso produz uma leve alteração na resposta do canal de comunicação através dessa rede elétrica e, conseqüentemente, altera o funcionamento do sistema PLC.

O sistema PLC é utilizado para o desenvolvimento deste experimento por empregarem portadoras OFDM em sua comunicação bidirecional através da rede elétrica. O comportamento e as variações de amplitude dessas portadoras são investigados, analisando-os tanto na presença do alvo em diferentes pontos, quanto na sua ausência, nesse ambiente. O objetivo de tal análise é determinar a possibilidade de detectar a presença de alvos em um ambiente comum a partir de seus efeitos de acoplamento magnético no canal PLC.

A interação de um corpo, estático ou em movimento, ocasiona alterações no canal PLC devido ao acoplamento magnético (Figura 1) e, portanto, nas portadoras empregadas por sistemas PLC de banda larga que utilizam OFDM. Se essas alterações forem suficientemente grandes, suas detecções podem permitir identificar a presença de uma pessoa no ambiente onde o sistema PLC está em funcionamento. Uma vez detectada a presença da pessoa, o próximo passo é obter uma estimativa do posicionamento do alvo dentro do ambiente a partir dessas alterações nas portadoras OFDM.

Um sistema de posicionamento como o acima descrito não prescinde do auxílio do alvo para a obtenção e resolução da estimativa de posição. Ele é baseado somente na infraestrutura, portanto pertence à categoria *Infra-based Target-Obtuse* (IBTO), na qual a infraestrutura é responsável pela detecção e resolução da posição do alvo, sem suporte do alvo cuja posição se deseja estimar.

## **Estrutura do Trabalho**

O primeiro capítulo traz os fundamentos do Posicionamento por Linhas de Energia Elétrica (PLPS), elencando trabalhos anteriores onde as ideias aqui propostas foram baseadas ou serviram de inspiração. Tipos de sistemas de Localização e Posicionamento, ainda dentro do primeiro capítulo, discute sobre os tipos de localização, física, simbólica e relativa. A seguir, esse assunto é complementado pelas Topologias de Sistemas de Localização e Posicionamento, onde termos como ILTB, IBTB e o mais importante para esse trabalho, o IBTO são introduzidos ao assunto. Para finalizar o primeiro capítulo, os Padrões e Tecnologias são enumerados, dando base ao experimento descrito no capítulo seguinte.

O capítulo 2 fala sobre a metodologia experimental. Desde a construção dos hardwares e montagem da infraestrutura até os softwares e procedimentos utilizados para a captura dos sinais de comunicação PLC, a partir dos quais se obtém as distorções causadas pelo acoplamento magnético entre o alvo e a rede elétrica.

O capítulo 3 descreve os resultados obtidos e as interações usadas para os cálculos. Os resultados dos cálculos são dispostos em tabelas com indicativo das interações, apresentando os resultados da forma mais simples e intuitiva possível. Por fim, são apresentadas as conclusões sobre a detecção e posicionamento baseados no experimento e nos seus resultados.

## 1 DETECÇÃO E POSICIONAMENTO POR LINHAS DE ENERGIA ELÉTRICA

*Power Line Positioning Systems* (PLPS) é o termo, em inglês, para Posicionamento por Linha de Energia Elétrica, inicialmente utilizado por [3] e revisitado em [1] onde foi expandido, incluindo qualquer sistema que dependa da rede elétrica, dos efeitos ambientais da energia e dos sinais que ela pode conduzir, ou ainda, dos efeitos dos alvos nos sinais que fluem nessa rede, para obter estimativas de posição. O PLPS deve ser fácil de implementar. Sua instalação, mais discreta, se comparada aos seus equivalentes baseados em RF. Ainda em RF, transmissões por cabeamento, por si só, proporciona mais estabilidade ao longo do tempo do que sistemas baseados em pontos de acesso (AP - *Access Point*). Isso beneficia a longevidade do banco de dados acumulado ao longo do tempo, fazendo com que permaneça efetivo por períodos mais longos se comparado aos obtidos através de sistemas baseados transmissões pelo ar [1].

O uso das redes elétricas como meio de comunicação não é uma prática nova [10, 21, 35, 36]. Além da vasta documentação com foco em sistemas de posicionamento [5, 37–43], a utilização da rede elétrica para obtenção desse posicionamento não é explorada. Já trabalhos como [3, 23, 44] abordam a obtenção de posicionamento, injetando sinais de referência na rede elétrica e observando suas interações com o ambiente, utilizando sensores móveis. Em [3], por exemplo, um gerador de tons na faixa de 10 - 500 kHz é acoplado na rede elétrica, como sinal de referência. Uma antena *loop* é usada como sensor, medindo a intensidade do espectro, dentro dessa faixa referencial, em diferentes cômodos. Em [44], o mesmo processo é seguido. Um conjunto de até 44 frequências, na faixa compreendida entre 447 kHz e 20 MHz, é injetada na rede. O sensoriamento é feito através de uma antena *loop*. Em [23] é proposta a utilização da linha de energia como um sistema irradiante. Um sinal PLC é injetado na rede e é irradiado como sinal para sincronização de tempo entre os componentes do sistema. A resolução desse sistema proposto depende do mecanismo utilizado para varredura, seja ele por RF, onde é medida a intensidade de um sinal (RSS, *Received Signal Strength*) ou através da medição do tempo que um sinal acústico ultrassônico leva da sua fonte até o sensor. Dessa forma, com a utilização do sinal de RF gerado por um AP, é possível obter uma maior resolução. A resolução do posicionamento é feita com o auxílio do alvo em questão, que possui uma

Tabela 1: Categorias, características e cenários de aplicação ampla de sistemas de posicionamento usando a rede elétrica. A categoria indica se o PLPS emprega infraestrutura específica para produzir e injetar sinais de referência ou não (*based*×*less*) e se o alvo está envolvido no processo de posicionamento ou não (*based*×*obtuse*). As características especificam se e onde os sinais de referência são produzidos, se eles podem vir do PLC, qual parte do sistema coleta os recursos de posicionamento e onde a posição é resolvida. Os cenários de aplicação: posicionamento autônomo, discreto e transparente.

Categoria	Características					Cenários		
	Sinais de referência		Localização do Sensor	Cálculo da Posição		Posicionamento Autônomo	Discreto ( <i>Unobtrusive</i> )	Transparente
	Existe	PLC-natural		Onde	Cooperação			
<i>Infra-less Target-based (ILTB)</i>	Não	Não	Alvo	Alvo	Não	Sim	Não Aplicável	Não Aplicável
<i>Infra-based Target-obtuse (IBTO)</i>	Sim	Possível	Infra	Infra	Não	Não	Sim	Possível
<i>Infra-based Target-based (IBTB)</i>	Sim	Possível	Alvo	Infra ou Alvo	Possível	Não	Não	Sim

sonda para captação dos sinais acústicos e sinais de RF.

Até o momento, são descritos sistemas de posicionamento e detecção onde o alvo tem papel importante nas resoluções, onde artifícios como injeção de sinais externos ou pontos de transmissão adjacentes, são adicionados à infraestrutura.

A proposição apresentada neste trabalho é da capacidade de detectar e calcular o posicionamento a partir de perturbações no sinal OFDM utilizado na comunicação entre modems PLC. Estas perturbações são causadas pelo acoplamento magnético entre o corpo humano, ou melhor, o alvo e a rede elétrica por onde o sinal de comunicação PLC trafega. Toda detecção e cálculo de posição é totalmente independente do alvo. O alvo não possui conhecimento ou contribui em nenhuma parte do processo. Nenhum sinal adicional é injetado na rede elétrica, o sinal capturado pelas sondas são nativos das transmissões entre modems PLC. Para as resoluções de posicionamento e detecção são avaliados os graus de perturbação que esses sinais sofrem com o acoplamento entre alvo e infraestrutura. Podemos então classificar essa detecção como discreta e totalmente transparente ao alvo.

Neste capítulo, serão discutidos os tipo e as arquiteturas dos sistemas de detecção e posicionamento mais relevantes para o desenvolvimento do estudo apresentado nesta dissertação. Para analisar as diferentes características e possibilidades do PLPS, é necessário elencar as características mais relevantes do sistema: i) Introdução de pontos de transmissão PLC e sua infraestrutura, que tornam o PLPS operacional; ii) Como serão

feitas as medições e qual componente responsável por elas; iii) Como a resolução da detecção e/ou posicionamento é feita: pelo alvo, pela infraestrutura ou há colaboração entre alvo e infraestrutura.

Embora algumas dessas características não sejam exclusivas, elas podem ser usadas para definir as três categorias de PLPS como observado na Tabela 1. Na seção 1.1 são apresentados os de sistemas de detecção e posicionamento, que são Localização Física, Simbólica, Absoluta e Relativa. Em seguida, os sistemas de detecção e posicionamento são classificados em relação à arquitetura de maneira mais detalhada, complementando as informações apresentadas na introdução. São eles: ILTB, IBTO e IBTB, relativamente ao papel da infraestrutura e do alvo na obtenção da posição do alvo.

### 1.1 Tipos de Sistemas de Detecção e Posicionamento

Diferentes aplicações baseadas em localização e posicionamento apresentam necessidades distintas, sendo assim, diferentes requisitos sistêmicos na forma de obtenção e de desempenho (acurácia e tempo de resposta para estimar a posição) da posição do alvo. Em [45], são discutidos alguns tipos: Localização Física, Localização Simbólica, Localização Absoluta e Localização Relativa.

A localização física retorna estimativas da posição física do alvo (o objeto a posicionar), como, por exemplo, coordenadas, como em dispositivos baseados em GPS, que fornecem o posicionamento físico em 3 dimensões, através da técnica de de multilateração circular [4]. Já a localização simbólica fornece uma estimativa do local em si, descartando o uso explícito de coordenadas, informando, por exemplo, que o alvo está em um quarto ou sala específica. A localização simbólica pode ainda retornar/indicar a proximidade a outro alvo conhecido e, não necessariamente, fornecer uma localização espacial.

A localização absoluta traz como principal característica o emprego de uma grade de localização compartilhada, dividindo a área em pontos pré-determinados que são usados como estimativas da posição do alvo. Os receptores de GPS, por exemplo, utilizam latitude, longitude e altitude como coordenadas de posicionamento e essas coordenadas representam pontos pré-determinados. Dois receptores presentes em um mesmo local, apresentam posicionamentos equivalentes, compartilhando o mesmo ponto no mapa.

Na localização relativa, o posicionamento do alvo deixa de fazer parte de uma grade e passa a ser referido ao ponto de acesso (AP, *access point*), ou a outro dispositivo.

O sistemas de radar é um bom exemplo de localização relativa já que, em sua definição mais básica, é um sensor eletromagnético para a detecção e localização de objetos reflexivos [46]. O radar irradia energia eletromagnética que se propaga no espaço, atinge o alvo que o reflete em diferentes direções. Uma pequena parcela do sinal refletido pelo alvo, chamada de “eco”, que retorna ao sensor do radar, será então utilizado para estimar o posicionamento relativo entre o alvo e o sensor eletromagnético.

A posição do alvo retornada usando o sistema proposto e testado nesse trabalho, pode ser considerada uma interseção entre a Localização Simbólica e a Localização Absoluta. Em um primeiro momento, definimos a Localização Simbólica, que pode ser interpretada como a detecção do alvo em uma sala, definido sua presença ou não. E a Localização Absoluta na sala dada pela estimativa da posição como uma região dentro da sala.

## 1.2 Arquiteturas de Sistemas de Detecção e Posicionamento

Em [47], são sugeridas quatro arquiteturas diferentes para sistemas de posicionamento. Baseado em [48], [47] indica que as arquiteturas são: posicionamento autônomo, posicionamento remoto, posicionamento indireto e posicionamento autônomo indireto.

Em sistemas de posicionamento autônomo, o alvo recebe o sinal de um ou mais transmissores, utilizados como referência, geograficamente distribuídos, e através da medição de parâmetros desses sinais determina a sua posição. Um exemplo de posicionamento autônomo bem conhecido é a localização via GPS. No posicionamento remoto, o alvo transmite um sinal e receptores geograficamente distribuídos o recebem. A partir de medidas obtidas baseadas na recepção do sinal, o posicionamento do alvo é definido. Note-se que além da possibilidade do alvo atuar como transmissor, também há a possibilidade de a localização ser obtida a partir de medidas de sinais refletidos pelo alvo.

As próximas duas arquiteturas são similares e dependem da existência de uma conexão de dados entre o alvo móvel e uma central. No posicionamento indireto, o alvo recebe sinais de estações de referência, resolve o posicionamento a partir desses sinais e a seguir, através de uma conexão, o alvo então envia à uma central o seu posicionamento. Por isso, denomina-se um sistema de posicionamento indireto. Na quarta arquitetura refere-se a casos onde o resultado do posicionamento é calculado pela central e enviado, também através da conexão de dados, para o alvo móvel. Por isso, é chamado de posici-

onamento autônomo indireto.

Até o momento foram apresentadas arquiteturas descritas em [47] que baseiam sua resolução na participação direta do alvo e não consideram sistemas onde o alvo não participa da detecção ou do cálculo do posicionamento. Em contrapartida, [1] descreve arquiteturas de sistemas de posicionamento que trazem três (3) formas de interação entre o alvo e a infraestrutura, para a obtenção resolução de detecção e de posicionamento do alvo. São elas: ILTB, IBTB e IBTO, as quais são descritas a seguir.

### 1.2.1 ILTB - *Infra-Less Target Based*

O ILTB, em uma interpretação livre, descreve sistemas de posicionamento totalmente baseados no alvo, sem infraestrutura especificamente projetada para injetar sinais de referência na rede elétrica, que calcule ou que auxilie na resolução da posição do alvo, conforme ilustra a Figura 2. O dispositivo alvo tem a capacidade de analisar o ambiente em busca de referências a partir da rede elétrica, o que pode ocorrer através de sensores de campo eletromagnético (EMF, *Eletromagnetic Field*) que detectam a radiação eletromagnética (EMR, *Electromagnetic Radiation*) gerados pela instalação elétrica ou mesmo sensores de imagem para identificação de tomadas [49–51].

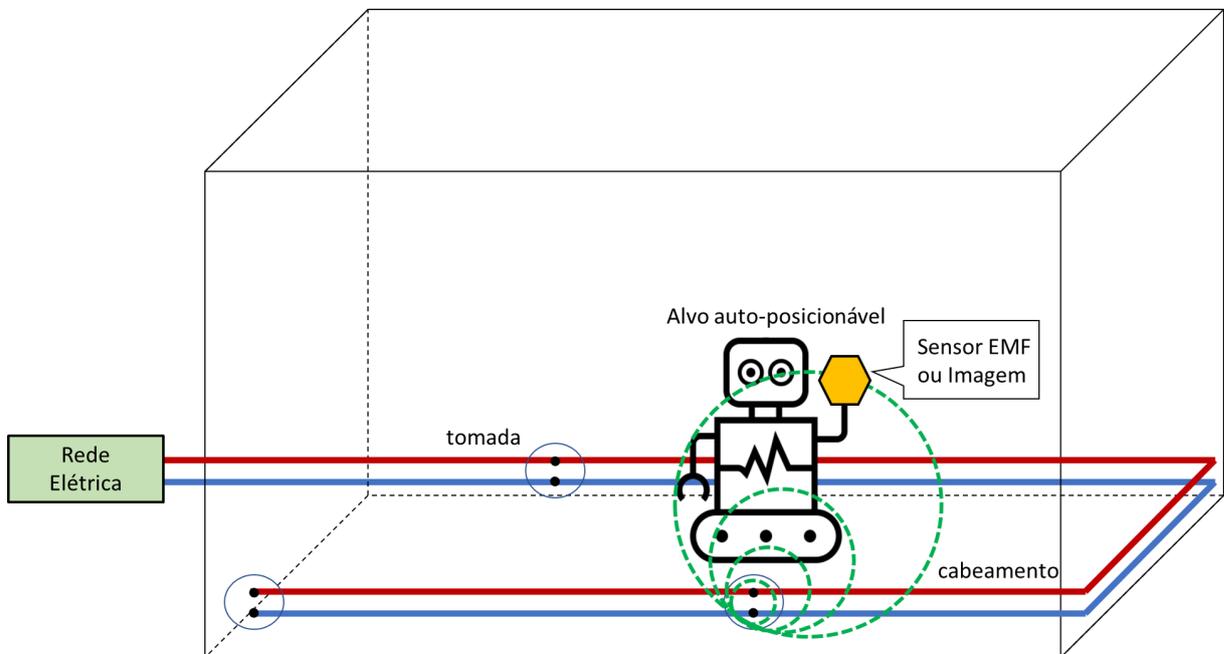


Figura 2: Ilustração de um sistema ILTB (Adaptado de [1]).

### 1.2.2 IBTB - *Infra-Based Target-Based*

Esta arquitetura, ilustrada na Figura 3, refere-se a sistemas de posicionamento em que a detecção e o posicionamento do alvo são resolvidos através da colaboração entre o alvo e a infraestrutura. A resolução pode ser feita tanto pela infraestrutura quanto pelo próprio alvo. Em [3,44], temos exemplos de IBTB com resolução feita pelo alvo. Em [3] a resolução é feita em pequeno computador portátil em conjunto com uma sonda que usa os campos eletromagnéticos para detectar instalações elétricas. Em [44], um computador em conjunto com antena *loop* é utilizado para a resolução de posicionamento em ambientes fechados.

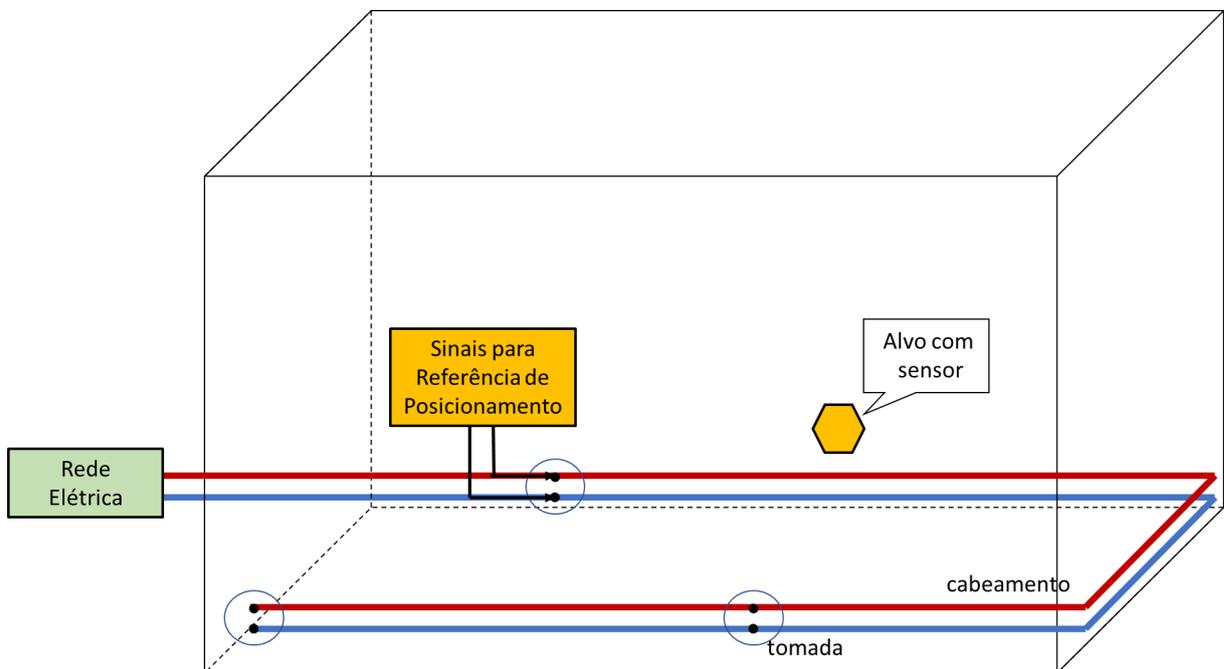


Figura 3: Ilustração de um sistema IBTB (Adaptado de [1]).

Diferentemente do sistema ILTB, onde a infraestrutura é utilizada apenas como âncora para a resolução realizada pelo alvo, no sistema IBTB a infraestrutura desempenha um papel ativo na determinação da posição. Nesse caso, a rede elétrica e o alvo sensorado continuam presentes, mas um sinal de referência para posicionamento é injetado na rede, permitindo que o alvo o utilize como recurso para obter as medidas dos sinais necessárias para o cálculo de sua posição.

### 1.2.3 IBTO - *Infra-Based Target-Obtuse*

Na arquitetura IBTO, o alvo não participa ativamente da resolução de sua posição ou mesmo tem ciência de que sua posição pode estar sendo computada. Nesta arquitetura, a infraestrutura acomoda tanto os recursos e as medidas a serem utilizados para a resolução da posição como o cálculo da posição em si. Num sistema de posicionamento IBTO, os sinais para referência de posição são injetados na rede elétrica e mudanças nas suas características decorrentes do alvo são medidas para computar a posição do alvo. Essas mudanças são ocasionadas essencialmente pelo acoplamento magnético entre o alvo (corpo humano) e as linhas de transmissão da rede elétrica, ocasionando mudanças na resposta do canal e, conseqüentemente, os sinais medidos diferem dos sinais injetados na rede. Os sensores captam essas mudanças e, através de técnicas adequadas, detectam o alvo e calculam a sua posição.

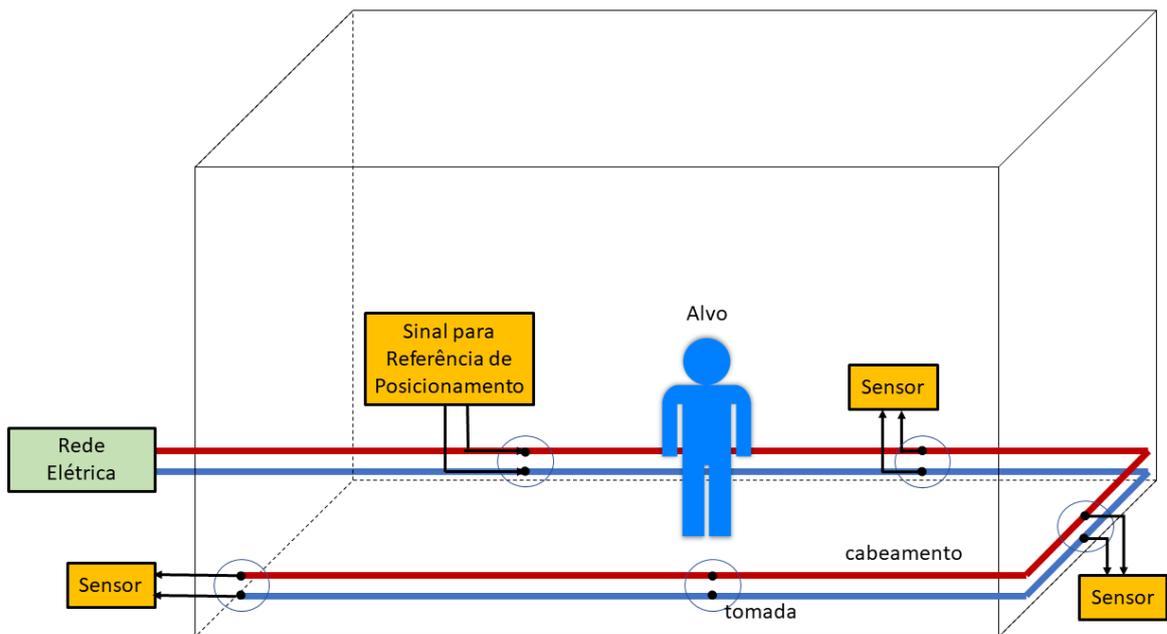


Figura 4: Ilustração de um sistema IBTO (Adaptado de [1]).

As arquiteturas ILTB e IBTB correspondem às apresentadas por [47]; o alvo tem um papel ativo na resolução do posicionamento. A Arquitetura IBTO é a que mais se alinha aos objetivos deste estudo apresentando-se como, dentre as três, a que melhor o interpreta; sistemas de detecção e determinação de posicionamento onde alvos não participam da resolução.

#### 1.2.4 Determinação da Posição

Pode-se aplicar técnicas de detecção de anomalias ou alterações às características para sinalizar a presença ou o movimento de uma pessoa. Se forem necessárias informações mais detalhadas sobre a localização, talvez seja necessário adquirir informações prévias sobre o ambiente operacional e os efeitos das pessoas nele, ou seja, utilizar *fingerprinting*. Uma fase de preparação *offline* deve ocorrer para aprender as características dos sinais com e sem os efeitos de acoplamento das pessoas em diferentes posições. Assim, posteriormente, durante a operação, essas características podem ser associadas às posições correspondentes.

### 1.3 Categorias e Padrões PLC

Os sistemas elétricos de potência apresentam diferentes características [21, 52–55] nos segmentos de transmissão (Alta Tensão – AT), distribuição (Média Tensão – MT) e (Baixa Tensão – BT). Conseqüentemente, o canal varia de acordo com o segmento, podendo ser seletivo em frequência e variar ao longo do tempo. Essa variação é influenciada por alguns fatores, por exemplo, o número de linhas conectadas a um determinado nó da rede elétrica, o comprimento do segmento de cada linha e a quantidade e tipos de dispositivos conectados a essas linhas, para citar alguns.

Para mitigar os efeitos das variações da rede elétrica na comunicação, o PLC faz uso de multiportadoras em todas as suas bandas de trabalho [21, 24, 56–60]. Existem quatro categorias de PLC dependendo de suas larguras de banda (e do cenário de aplicação): Ultra Banda Estreita (UNB), Banda Estreita (NB), Banda Média (MB) e Banda Larga (BB), sendo NB e BB as categorias mais exploradas pelos padrões de mercado. Cada uma das categorias possui uma quantidade específica de portadoras, adaptando-se melhor às condições do canal, como a necessidade de taxas de transmissão maiores mantendo a robustez do sinal, por exemplo. Alguns dos principais padrões de PLC já estabelecidos no mercado são o IEEE e *HomePlug*, sendo este último, o padrão PLC utilizado no experimento deste estudo.

A largura de banda utilizada pelo padrão PLC IEEE é ilustrada na Figura 5. Utilizando OFDM na camada física (PHY), a largura de banda disponível é dividida em vários subcanais com espaçamento entre as subportadoras OFDM. No caso de acesso

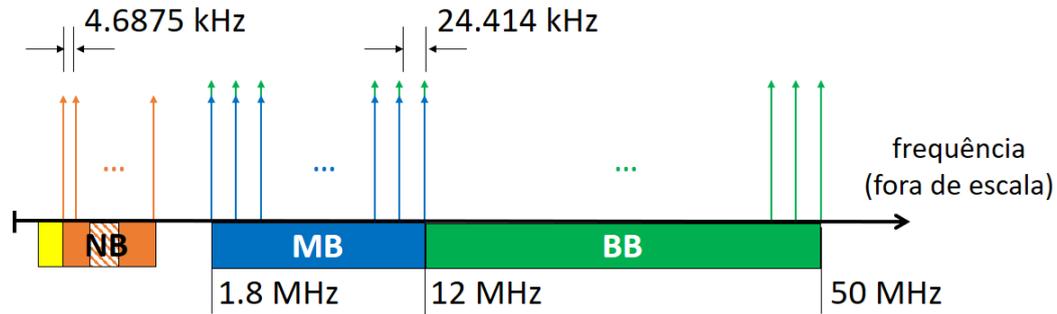


Figura 5: Bandas de frequência para os padrões IEEE PLC e separação das subportadoras OFDM. As notações NB, MB e BB referem-se a banda estreita, banda média e banda larga, respectivamente. Observe que a faixa de frequência BB também inclui a banda MB. (Adaptado de [1]).

concorrente ao canal e o compartilhamento do meio de transmissão por vários hosts, faz-se uso mais frequentemente do acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA, Time Division Multiple Access). Os sistemas UNB-PLC utilizam uma largura de banda mais estreita do que os NB-PLC, sendo, em geral, proprietários. A seguir, na Tabela 2, são apresentados os padrões PLC IEEE com suas especificações principais na PHY, embora outros fóruns [59, 60] proponham perfis de PLC semelhantes.

Tabela 2: Especificações principais das PHYs FFT OFDM e Wavelet OFDM do padrão IEEE BB-PLC 1901.

	PHY FFT OFDM	PHY Wavelet OFDM
Correção de Erros	Codificação turbo-convolucional	Codificação Reed-Solomon Codificação convolucional Codificação concatenada Codificação convolucional LDPC (opcional)
Modulação Principal	BPSK, QPSK, 8-QAM até 1024-QAM, 4096-QAM (opcional)	2-PAM até 16-PAM, 32-PAM (opcional)
Subcanais ( $C$ )	4096 (917 ativos)	512, 1024, 2048
Comprimento do Filtro Protótipo ( $2qC$ )	–	$q = 2, 3, 4$
Faixa de Frequência	1,8 MHz - 50 MHz	1,8 MHz - 28 MHz, 1,8 MHz - 50 MHz (opcional)
Duração do Símbolo ( $\mu s$ )	40,96	8,192, 16,384 (opcional), 32,768 (opcional)

O *HomePlug* possui características muito semelhantes ao IEEE, de forma geral. Sua primeira versão, o *HomePlug* 1.0, liberado em 2001 [10] é um BB-PLC, com o espectro de trabalho compreendido entre 1,8 e 30 MHz (Figura 6), operando em taxas de até 200 Mbps. Sua PHY utiliza-se de símbolos OFDM com 917 portadoras com intervalo de guarda flexível, com uma FFT de 4096 pontos. Suas portadoras podem ser moduladas em BPSK até 1024-QAM [24, 61]. Mais tarde, no ano de 2012, a segunda versão foi liberada. O *HomePlug* AV2 (HPAV2) estende o espectro já existente no *HomePlug* AV

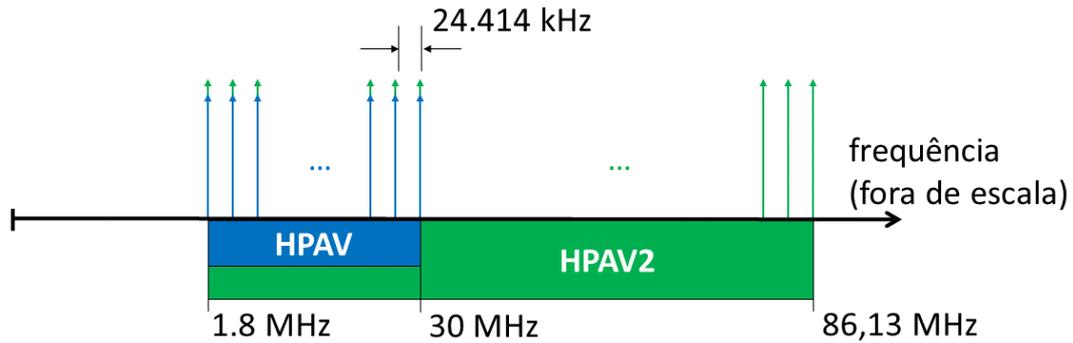


Figura 6: Bandas de frequência para as versões HPAV (azul) e HPAV2 (verde) e separação das subportadoras OFDM. Observe que a faixa de frequência do HPAV2 também inclui a banda do HPAV.

atingindo 86,13 MHz de limite superior de banda e mantém muitas das características herdadas da sua primeira versão, com suas portadoras podendo ser moduladas em BPSK, 8- QAM, 16- QAM, 64- QAM, 256- QAM, 1024- QAM e 4096- QAM, a depender do estado do canal [60].

Os parâmetros OFDM do BB-PLC correspondem a um sistema com 4096 portadoras em 100 MHz. Contudo, o HPAV2 possui um espectro que compreende a faixa de 1,8 a 86,13 MHz, com 3455 portadoras espaçadas em 24,414 kHz (Figura 6). O HPAV2 incorpora ainda a capacidade de transmissão MIMO (*Multiple-in Multiple-out*) e SISO (*Single-in Single-out*). A Tabela 3 traz cinco diferentes perfis que envolvem características de MIMO e SISO para o HPAV2 [60].

Tabela 3: Perfis de transmissão MIMO e SISO para HPAV2

Perfil HPAV2	Largura de banda máxima
SIS0500	1,8- 65 MHz
SIS0750	1,8- 86,13 MHz
MIMO500	1,8- 30 MHz
MIMO1000	1,8- 65 MHz
MIMO1500	1,8- 86,13 MHz

Para MIMO é necessária a utilização dos 3 (três) condutores da rede elétrica: fase, neutro e terra. Para SISO, apenas dois dos três condutores são necessários. É de interesse ressaltar, que o experimento realizado neste estudo faz uso de modems PLC que utilizam apenas dois condutores da rede elétrica, portanto, utilizando-se apenas de perfis de transmissão SISO.

## 2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo tem como objetivo detalhar a metodologia aplicada ao experimento realizado neste estudo. O experimento consiste na observação dos efeitos do acoplamento magnético entre o corpo humano, aqui definido como alvo, e a rede elétrica e se esses efeitos são suficientes para detectar sua presença, ou até mesmo, seu posicionamento em ambientes internos. A observação destes efeitos é feita pelo sensoriamento das alterações de nível das portadoras OFDM injetadas na rede elétrica através da comunicação de 2 (dois) modems PLC. Para o experimento, é de interesse que instalação física de rede elétrica seja controlada, visando mitigar interferências ou variações causadas por equipamentos conectados a ela.

Seguindo a ordem das disposições do conjunto de teste indicada na Figura 7 é possível observar os dois modems, PLC 1 e PLC 2, conectados à fita elétrica por meio de tomadas. Para possibilitar o sensoriamento, eliminando a frequência de rede de 60 Hz e sua tensão de 127 Volts, foram utilizados filtros passa-alta, conectados em 3 (três) pontos distintos da fita, também através de tomadas. Os filtros foram projetados para eliminar frequências abaixo dos 700 kHz e entregar o sinal já filtrado a cada um dos três analisadores de espectro (RSA, *Real-Time Signal Analyzer*).

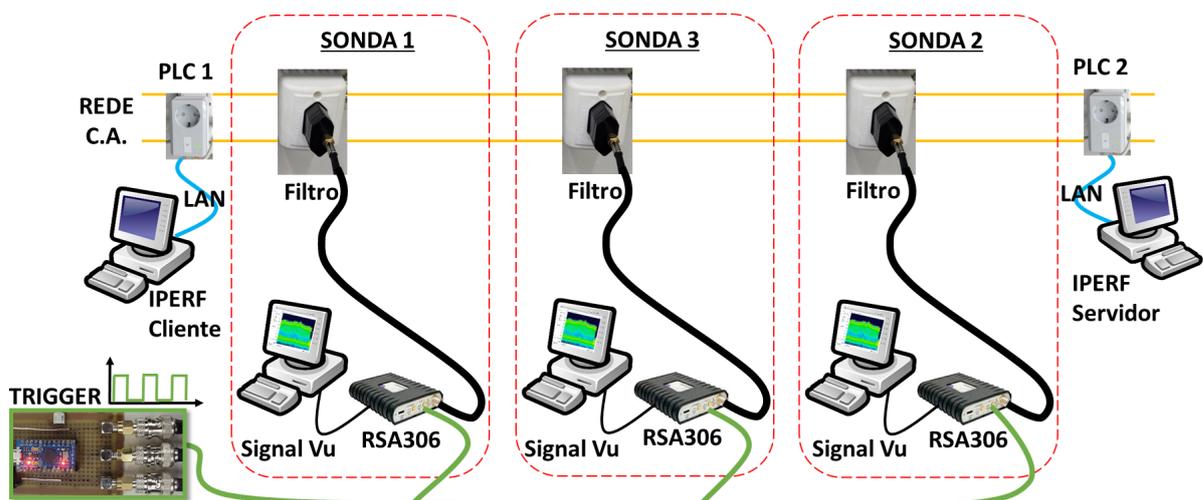


Figura 7: Diagrama dos componentes utilizados para o experimento.

Cada analisador de espectro, no momento de cada sensoriamento, ou captura, é acionado por um pulso TTL gerado por um microcontrolador Arduino. As capturas

realizadas pelo analisador de espectro são feitas com o auxílio do software SignalVu e são armazenadas em formato .MAT, para posterior tratamento no MATLAB®. Cada conjunto de filtro e analisador de espectro é chamado de sonda. No total, três sondas foram utilizadas para medições simultâneas em três pontos distintos ao longo da fita elétrica. Essa metodologia será detalhada, a seguir, nas seções deste capítulo.

Em primeiro lugar, a seção descreve as características do ambiente experimental, seguido pela instalação elétrica e os componentes do experimento: modem PLC, ocupação do canal e as sondas de captura. A seção sobre o Modem PLC descreve as características do equipamento PLC utilizado no experimento. A seção sobre Ocupação do Canal descreve a forma de obter-se capturas úteis, mantendo sua ocupação próxima de 100%. A seção Sondas de Captura descreve seu funcionamento e cada um de seus componentes.

O capítulo termina com a apresentação da Metodologia de Análise de Capturas. Esta seção é dividida em duas subseções: Análise Preliminar no Tratamento de Capturas para Determinação de Presença com Alvo Único e Tratamento de Capturas para Determinação de Presença com Diversidade de Alvos. A primeira traz uma metodologia de análise das capturas em um cenário onde apenas um único alvo é testado. Na segunda subseção, são descritas três metodologias para tratamento de capturas com diversidade de alvos: Tratamento Direto, Tratamento Direto com Limiar de Decisão e Tratamento Referenciado a Alvos.

O Tratamento Direto traz um comparativo entre o resultado do tratamento de um "banco" de capturas de sala vazia (acumuladas ao longo do tempo) e o tratamento de capturas com presença do alvo. O Tratamento Direto com Limiar de Decisão aplica um limiar calculado aos resultados para decidir se há uma detecção exitosa. O Tratamento Referenciado a Alvos, diferentemente, compara as capturas com presença de alvo com as capturas de sala vazia referenciadas a esses alvos, isto é, capturas de sala vazia imediatamente anteriores às executadas com a presença desses alvos.

## 2.1 Ambiente Experimental

O experimento foi realizado nas dependências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, em uma sala do Laboratório de Engenharia Elétrica, ilustrada na Figura 8, com dimensões aproximadas de 7 m × 5,5 m, em formato retangular, com móveis e computadores. A sala utilizada para o estudo está subdividida em 16 regiões. Essas

regiões são delimitadas por marcações no piso, que são utilizadas para posicionamento do alvo, como apresentado na Figura 9.

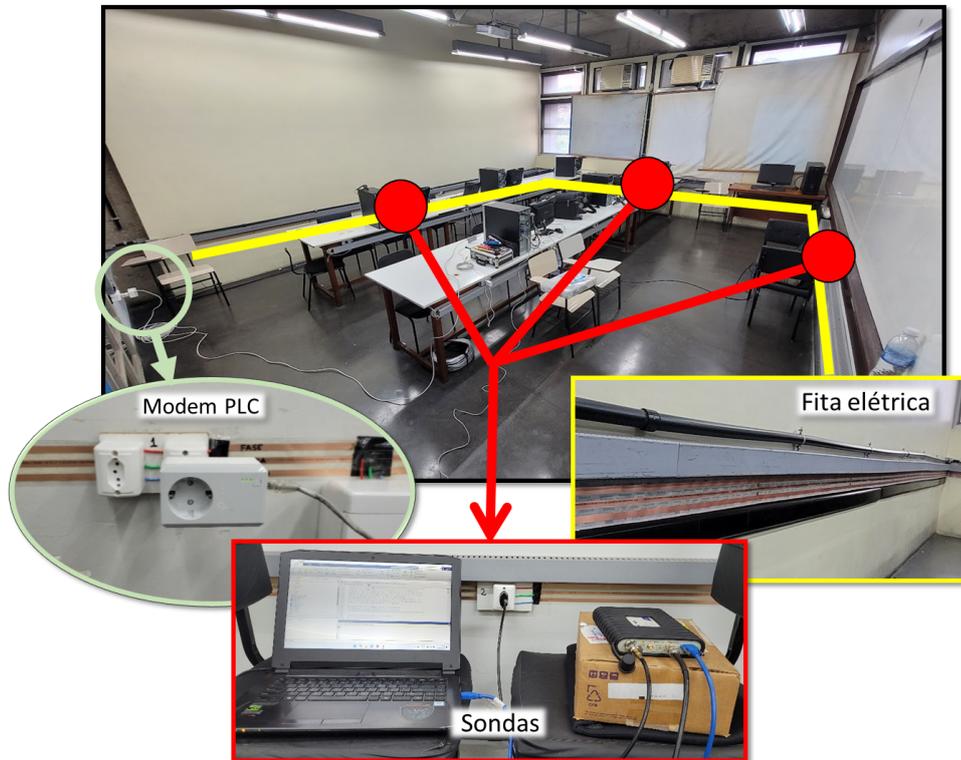


Figura 8: Instalação Física do ambiente de teste. Destaques para a fita elétrica instalada na parede, modem PLC conectado à fita elétrica e conjunto de sonda usada para captura espectral.

## 2.2 Instalação Elétrica

A instalação elétrica para o ambiente foi executada utilizando-se aproximadamente 25 metros de fita elétrica com três condutores, contornando toda a extensão sala. A escolha da fita elétrica como meio de transmissão PLC faz um paralelo ao sistema de posicionamento executado por veículos aéreos autônomos, que utilizam-se do campo magnético gerado pela rede elétrica para cálculo de distância a fim de efetuar acoplamento e recarga [1, 50]. O paralelismo dos condutores desta fita é mantido por toda a sua extensão, mitigando alguns dos efeitos sobre o canal, que podem advir de uma disposição irregular dos condutores.

A instalação com fita elétrica não visa reproduzir as condições reais de instalação normalmente encontradas em edificações. Como parte do experimento, sua função é

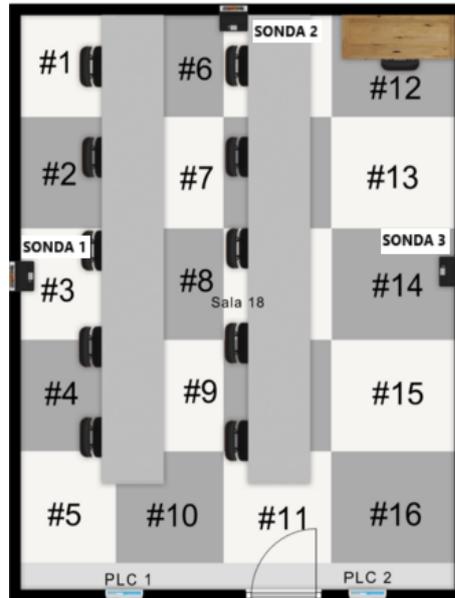


Figura 9: Planta da sala de aula utilizada no experimento e a representação da divisão em 16 regiões.

fornecer condições mais próximas do ideal, quanto for possível, mitigando alterações no canal na comunicação entre os modems PLC.

A energização da fita elétrica foi obtida através da própria rede elétrica da sala. Observou-se através de testes preliminares que as portadoras OFDM da comunicação PLC não apresentavam alterações significativas ao longo do tempo, sendo possível utilizá-las como fonte de energia para o experimento, sem a necessidade de filtragem ou tratamento adicional.

Na instalação, há cinco tomadas; os dois modems PLC são conectados às tomadas, nas extremidades opostas da fita elétrica e as três tomadas restantes são usadas para conexão das sondas de sensoriamento (captura), como visto na Figura 8.

### 2.3 Modem PLC

O modem PLC utilizado no experimento foi o TP-Link modelo AV600 (Figura 10), que utiliza HPAV2. Através de testes e medições preliminares, foi possível concluir que sua faixa de frequência de trabalho está entre 1,8 e 70 MHz (Figura 11 e Figura 12), ligeiramente abaixo do HPAV2 padrão, mas ainda sendo classificado como um BB-PLC. Baseando-se na faixa de frequência de trabalho medida e utilizando apenas dois condutores como canal de comunicação PLC, portanto um SISO, através da Tabela 3

podemos deduzir que seu perfil de transmissão é SISO500. Nesse caso, a primeira faixa, equivalente ao padrão HPAV1, possui largura banda de 1,8-30 MHz (Figura 11), e a segunda faixa, estendida do padrão HPAV2, possui largura de banda de 30-70 MHz (Figura 12).



Figura 10: Par de Modems PLC AV600 utilizados no experimento.

A porção superior da largura de banda do HPAV2 (Figura 12) foi escolhida como objeto de estudo. Considerando os modems utilizados, o BB-PLC HPAV2 terá sua faixa compreendida entre 1,8 e 70 MHz, contudo apenas sua faixa estendida é analisada (30 MHz a 70 MHz). Em valores de frequência que vão de 40 MHz a 50 MHz, dentro da faixa estendida, encontramos comprimentos de onda entre 1,40 e 1,90 cm, aumentando a probabilidade do acoplamento magnético acontecer entre o corpo humano (alvo) e o sinal transmitido pelos PLCs através da fita elétrica. E, obviamente, considerando que as alturas dos alvos utilizados no experimento estão, igualmente, dentro dessa faixa.

Construído com duas portas *Fast-Ethernet*, o conjunto formado por dois ou mais modems AV600 podem atingir taxas teóricas, segundo especificações do fabricante, de até 600 Mbps. Contudo, para a realização deste estudo, a taxa máxima pretendida é de 100 Mbps entre os modems, com a máxima taxa de ocupação do canal possível.

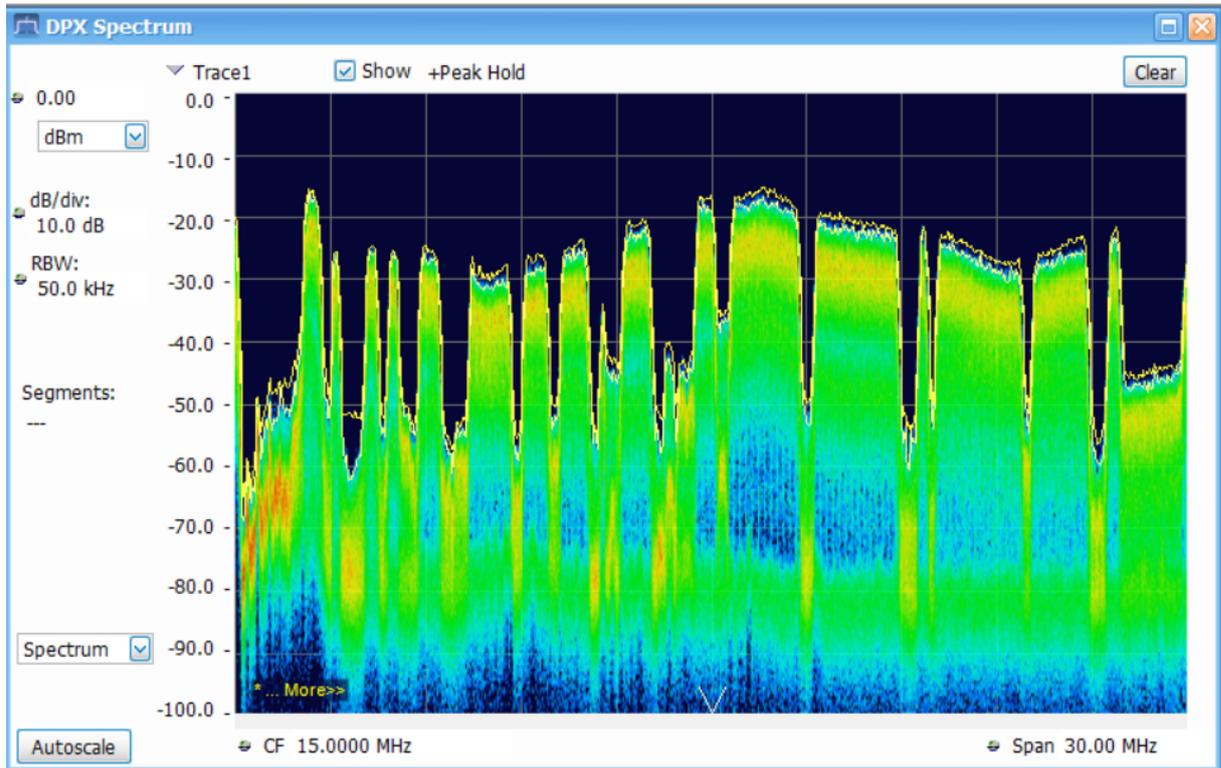


Figura 11: Banda inferior do espectro PLC. Faixa de 1,8- 30 MHz.

## 2.4 Ocupação do Canal

Para que a taxa de ocupação do canal fique mais próxima possível dos 100%, utilizou-se uma ferramenta chamada iPerf [62], na sua terceira versão. O iPerf é uma ferramenta que mede o tráfego máximo suportado pela rede que está sob análise, gerando tráfego ininterrupto através de uma topologia cliente-servidor. O cliente envia pacotes para o servidor, que por sua vez, está em modo de “escuta”. Através da comunicação e negociação entre esses dois nós, o tráfego é ajustado para o máximo suportado pela rede, fazendo com que a taxa de ocupação seja próxima de 100%. Isso pode ser verificado através de uma amostra do arquivo de *log* (Figura 13) extraído no cliente, após um dos testes.

A presença do sinal de comunicação entre os modems PLC na fita elétrica precisa ser constante. Dessa forma, é possível mitigar o aparecimento de períodos de “silêncio”, ou ausência de sinal, que são tratados como *outliers*. Portanto, a obtenção de um grande número de amostras úteis durante a captura e baixa incidência de *outliers* torna os resultados mais confiáveis.

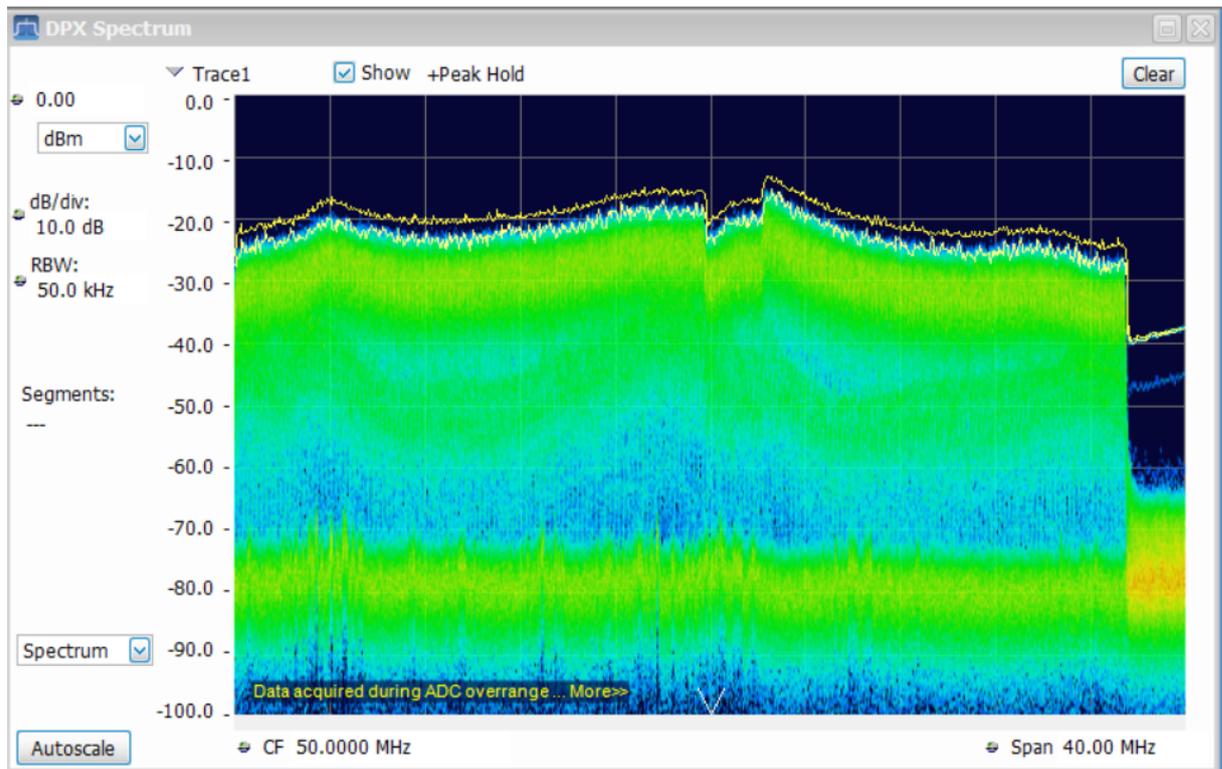


Figura 12: Banda superior do espectro PLC. Faixa de 30- 70 MHz.

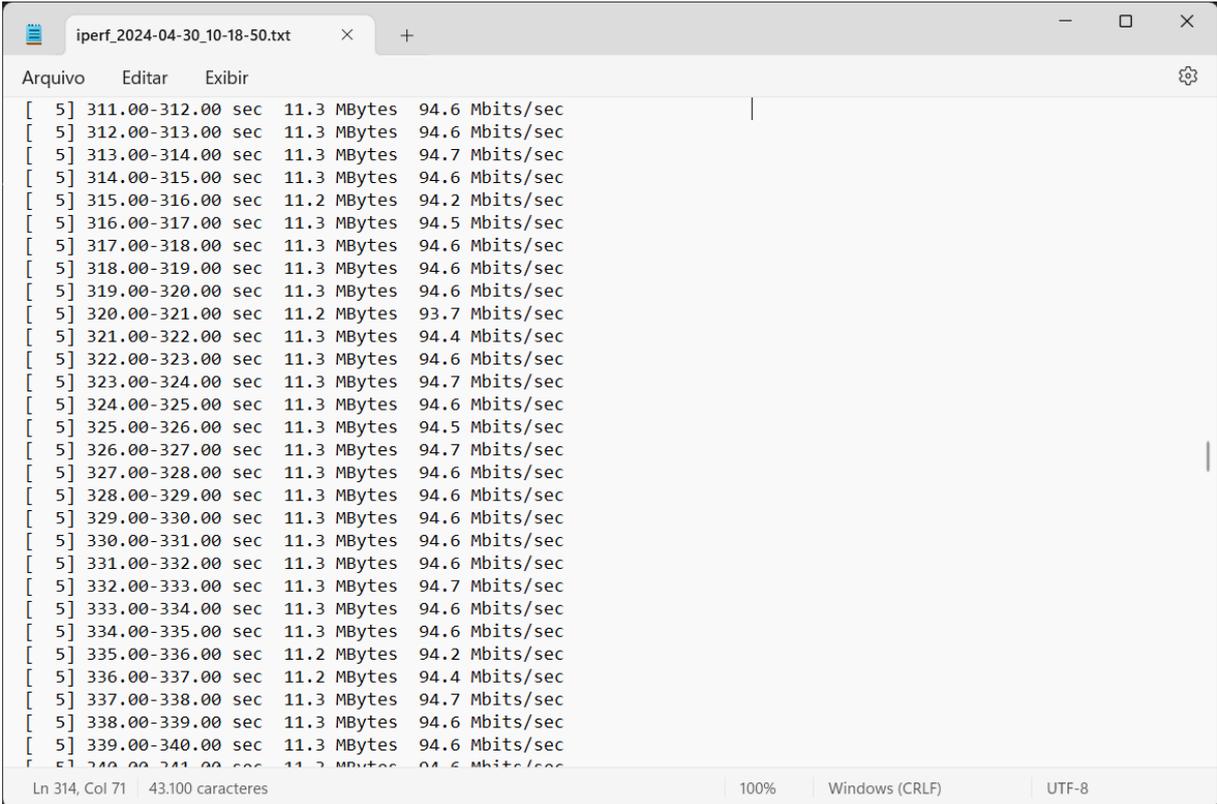
## 2.5 Sondas de Captura

O experimento foi realizado com o uso de três conjuntos de captura, ou sondas, para sensoriamento do espectro PLC (Figura 14). As sondas são compostas de um filtro passa-altas, um analisador de espectro RSA306 da Tektronix e um PC com o software SignalVU, também da Tektronix. Estas sondas foram dispostas em três pontos de coleta, conforme o diagrama da sala na Figura 9, numerados de 1 a 3. Cada um dos componentes das sondas será descrito a seguir.

### 2.5.1 Filtro Passa-Altas

O filtro passa-altas (Figura 15) suprime a frequência da rede e outras componentes abaixo da frequência de corte de 700 kHz, ilustrado pelo gráfico da Figura 16. Mantendo a faixa passante mais próxima possível dos 1,8 MHz iniciais do espectro PLC HPAV2, é construído na configuração LC e seu diagrama elétrico está ilustrado na Figura 17.

O acoplamento com a rede é isolado galvanicamente através de um transformador; modelo TC1-1T+ da fabricante MiniCircuits [63]. Este componente é um transformador



```

iperf_2024-04-30_10-18-50.txt
Arquivo  Editar  Exibir
[ 5] 311.00-312.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 312.00-313.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 313.00-314.00 sec 11.3 MBytes 94.7 Mbits/sec
[ 5] 314.00-315.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 315.00-316.00 sec 11.2 MBytes 94.2 Mbits/sec
[ 5] 316.00-317.00 sec 11.3 MBytes 94.5 Mbits/sec
[ 5] 317.00-318.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 318.00-319.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 319.00-320.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 320.00-321.00 sec 11.2 MBytes 93.7 Mbits/sec
[ 5] 321.00-322.00 sec 11.3 MBytes 94.4 Mbits/sec
[ 5] 322.00-323.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 323.00-324.00 sec 11.3 MBytes 94.7 Mbits/sec
[ 5] 324.00-325.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 325.00-326.00 sec 11.3 MBytes 94.5 Mbits/sec
[ 5] 326.00-327.00 sec 11.3 MBytes 94.7 Mbits/sec
[ 5] 327.00-328.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 328.00-329.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 329.00-330.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 330.00-331.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 331.00-332.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 332.00-333.00 sec 11.3 MBytes 94.7 Mbits/sec
[ 5] 333.00-334.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 334.00-335.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 335.00-336.00 sec 11.2 MBytes 94.2 Mbits/sec
[ 5] 336.00-337.00 sec 11.2 MBytes 94.4 Mbits/sec
[ 5] 337.00-338.00 sec 11.3 MBytes 94.7 Mbits/sec
[ 5] 338.00-339.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
[ 5] 339.00-340.00 sec 11.3 MBytes 94.6 Mbits/sec
Ln 314, Col 71 | 43.100 caracteres | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8

```

Figura 13: Log do tráfego entre modems PLC, registrando velocidades de conexão próximo dos 100Mbps. Extraído do iPerf Cliente.

isolador, próprio para aplicações em amplificadores e transceptores VHF e UHF. Seu secundário possui impedância de 50 Ohms, propriamente casado com a entrada de RF do analisador de espectro RSA306. Sua faixa de frequência de trabalho está compreendida entre 0,4 e 500 MHz, atendendo às especificações necessárias para o HPAV2. O filtro de cada sonda é disposto em uma caixa impressa em 3D com material plástico PLA (Ácido Poliláctico) usando a técnica de FDM (Modelagem por Deposição Fundida). O circuito é personalizado em uma placa de fibra de vidro e construído a fim de permitir seu acoplamento à fita elétrica através de uma tomada comum, como visto na Figura 15. Além disso, utiliza-se de uma conexão do tipo SMA, para ligação de RF com o RSA.

## 2.5.2 Analisador de Espectro

O analisador RSA306 da Tektronix (Figura 18) é conectado ao filtro passa-alta e através dele, o software SignalVu captura e representa visualmente o espectro de pulsos OFDM do PLC. É no SignalVu que os parâmetros escolhidos para a captura são configurados, sendo a mesma para todos os analisadores. A Tabela 4 mostra os parâmetros



Figura 14: Conjunto de Sonda: Filtro passa-altas, Computador com Software SignalVU e analisador de espectro RSA306 da Tektronix.

utilizados no RSA306 para realização da análise espectral. O tempo de aquisição de  $40,96 \mu s$  é baseado em uma solução de compromisso, proporcionando uma janela temporal suficientemente grande para a medição do comprimento dos símbolos nos pulsos OFDM e maximizando a quantidade de amostras por unidade de tempo. O símbolo OFDM capturado pelo RSA306 é amostrado em fase e quadratura à taxa de 56 MHz, com comprimento de 2294 amostras em  $40,96 \mu s$ . A frequência inicial de análise é igual a 30 MHz. Com uma largura de banda de 40 MHz, chegamos a 70 MHz, o limite superior do HPAV2 utilizado pelos modems AV600. O nível de referência de 0 dBm foi escolhido após uma análise prévia, para evitar a saturação do conversor analógico-digital de entrada.

Tabela 4: Parâmetros de configuração do RSA306, utilizado na captura espectral realizada pelas sondas.

freq.inicial	larg.banda	tempo aquisição	nível de ref.
30 MHz	40 MHz	$40,96 \mu s$	0,00 dBm

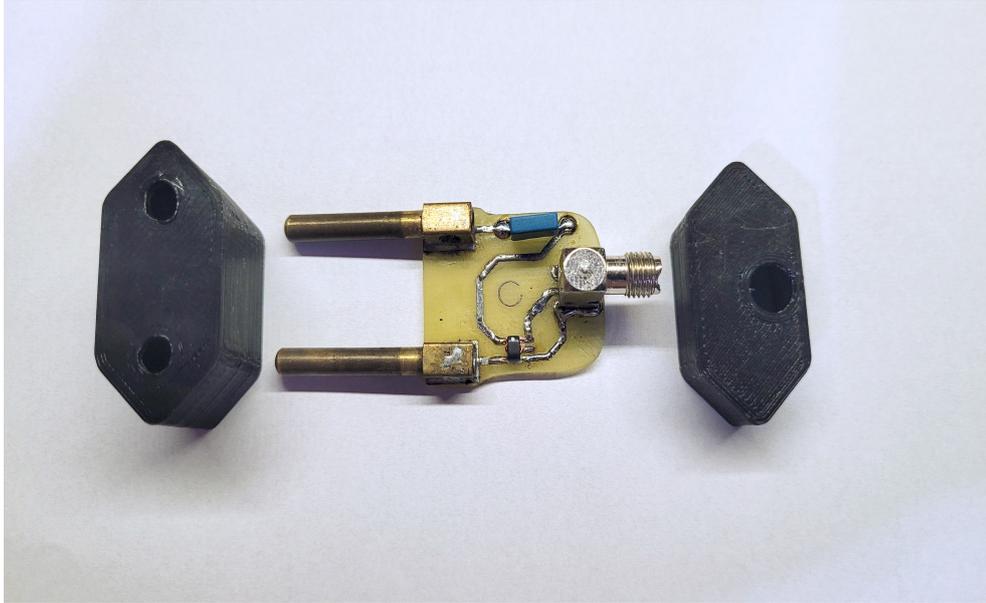


Figura 15: Filtro Passa-Altas desmontado.

### 2.5.3 Trigger

Mesmo não compondo diretamente a sonda, o *trigger* é indispensável para seu funcionamento. Ele é o responsável pelo sincronismo entre as três sondas utilizadas no experimento. Através da geração de pulsos TTL, que são recebidos pelos RSA em sua porta de "*Trigger/ Sync*" (Figura 19), o *trigger* garante que as três sondas capturem as amostras das portadoras que compõem o espectro OFDM, no mesmo instante de tempo.

Um microcontrolador *Arduino Pro Micro* [64] é responsável por gerar os pulsos TTL para o sincronismo (Figura 20). O sinal gerado é distribuído, de forma paralela, em três saídas com cabos coaxiais de mesmo comprimento, para serem entregues aos três analisadores simultaneamente. Dessa forma, os sinais TTL são recebidos pelos três RSA no mesmo instante de tempo. Os sinais TTL, por definição, possuem 5 V de amplitude; contudo, é necessário definir o período entre os pulsos. Com uma análise experimental prática, testando diversos valores de períodos para os pulsos TTL, desejando-se a captura mais rápida com a maior quantidade de capturas úteis, chegou-se ao valor de período igual a 300 ms entre pulsos. Esse valor possibilitou um melhor sincronismo, com amostras consistentes, entre os RSA.

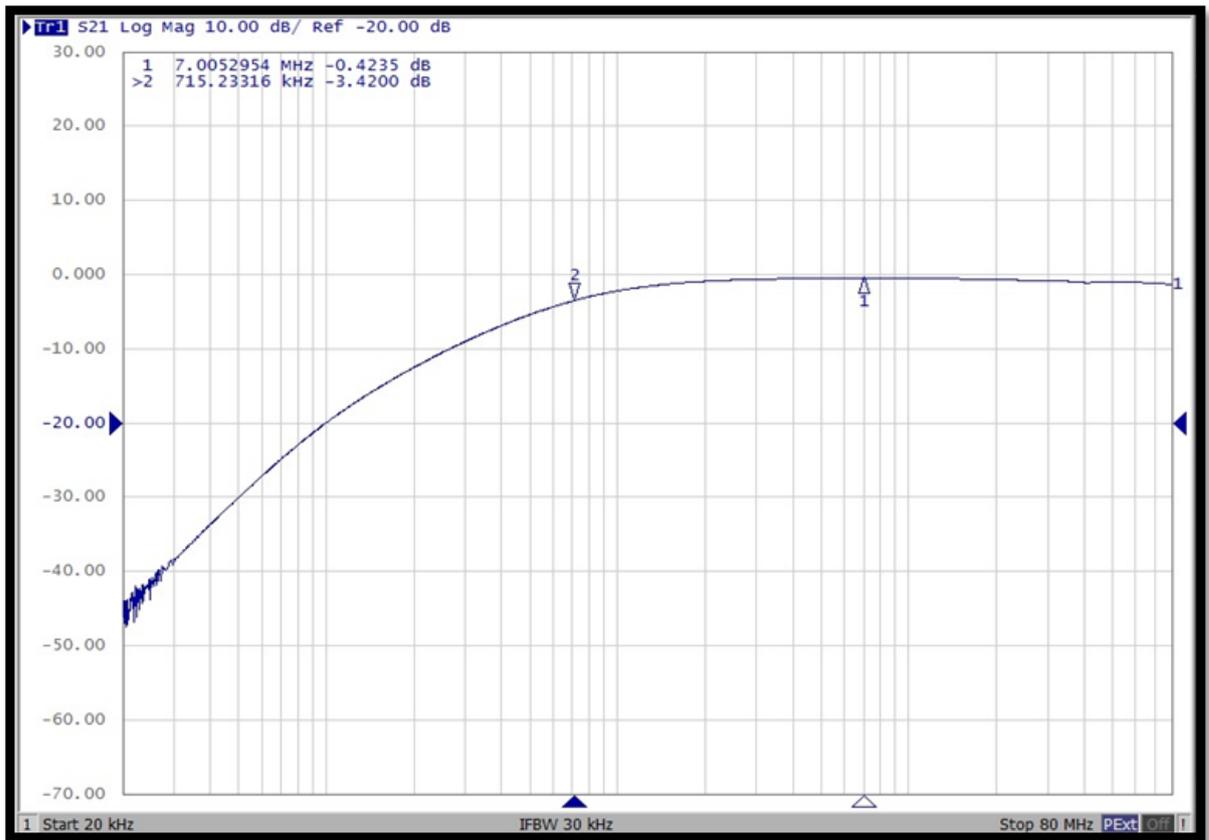


Figura 16: Resposta em frequência do Filtro Passa-Altas. Ponto de corte (-3 dB) em 700 kHz, aproximadamente.

## 2.6 Metodologia de Análise das Capturas

Alguns termos merecem destaque para o melhor entendimento do texto que se seguirá. O termo "captura" indica cada aquisição única executada pelo RSA. O termo "amostra", também chamado de "raias espectrais", refere-se a cada ponto amostrado dentro de cada captura. Dessa forma, cada captura possui 2294 amostras, ou 2294 raias espectrais. O espaço entre cada captura é de 300 ms. Em termos simples, o RSA "fotografa" o conjunto de portadoras do espectro OFDM gerado na comunicação entre os modems PLC, subdividindo 2294 raias espectrais. Isto acontece, simultaneamente, em cada uma das três sondas e em intervalos de 300 ms.

As capturas são armazenadas em arquivos de formato .MAT através do software SignalVU. A quantidade de capturas, por cada rodada de testes, pode ser ajustada de acordo com o tipo de análise. Durante o experimento, foram abordados dois tipos de análise: a de sala vazia e também com a presença de alvos.

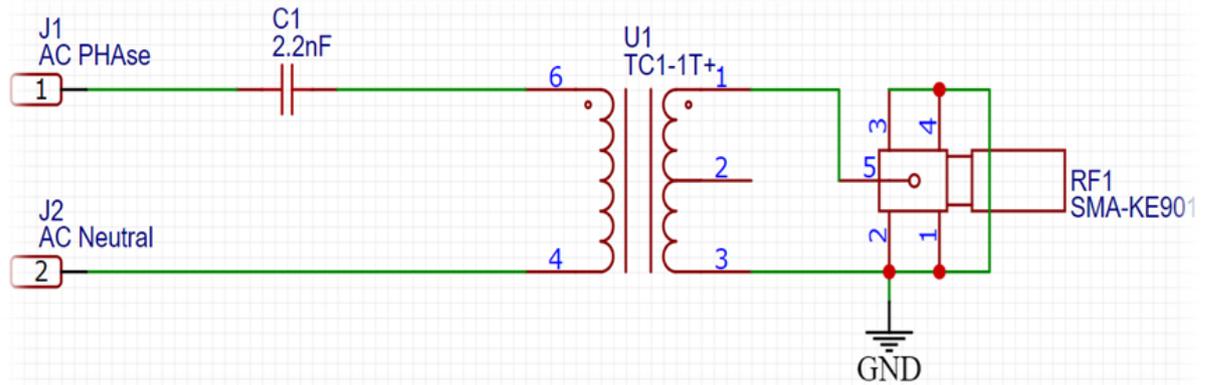


Figura 17: Esquema elétrico do filtro Passa-Altas.



Figura 18: Analisador de Espectro RSA306 utilizado no experimento.

A análise de sala vazia baseia-se em capturas com o ambiente completamente ausente de alvos. Na análise preliminar foram armazenadas 150 capturas únicas em cada rodada de testes com sala vazia. Na segunda parte do experimento, passou-se a acumular 300 capturas únicas com o cenário de sala vazia. Esse conjunto de capturas de sala vazia forma um "banco de capturas de sala vazia", ou apenas "banco", e é utilizado como controle para comparação com capturas executadas com presença de alvos na sala. As capturas obtidas com a presença de alvos, por sua vez, possuem o total de 150 capturas em cada execução, nas duas fases do experimento.

Estudar a presença de alvo estático e como ele interage com o espectro OFDM do PLC é o objetivo principal. Neste cenário, o alvo está presente na sala, posicionado em uma das 16 regiões de escolha, conforme Figura 9. Então, 150 capturas espectrais



Figura 19: Porta "Trigger/ Sync" do Analisador de Espectro RSA306.

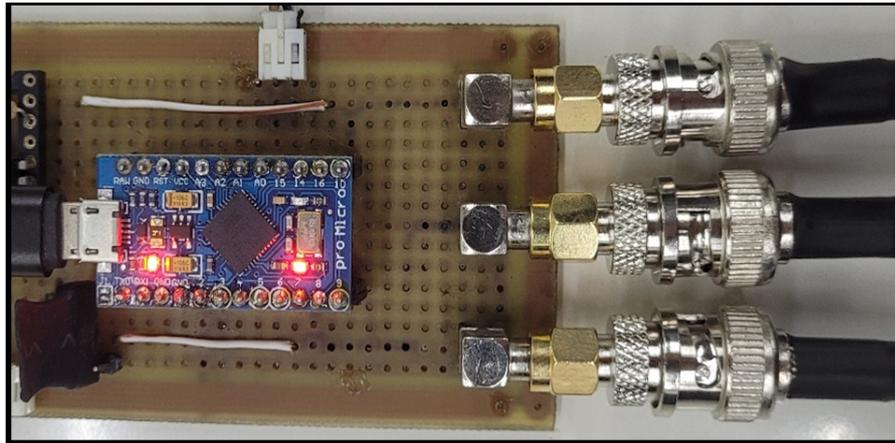


Figura 20: Montagem Física do Circuito de *Trigger* Utilizando-se Arduino.

são executadas, funcionando da seguinte forma: o alvo é posicionado na primeira região #1 e as 150 capturas do espectro OFDM são obtidas, com tempo entre elas de 300 ms. Em seguida, o alvo é posicionado na região #2 e novamente, 150 capturas são obtidas, também com espaçamento de 300ms. Esse processo se repete até que tais capturas sejam realizadas nas 16 regiões da sala.

A análise do acoplamento magnético entre o alvo e o espectro PLC precisa que as capturas sejam tratadas para fornecer valores comparáveis, entre as obtidas com a sala vazia e as obtidas em cada posicionamento do alvo. Dessa forma, os resultados obtidos com a sala vazia podem desempenhar o papel de "controle" a ser comparado com os resultados na presença do alvo. Para que as análises dessas comparações sejam possíveis, nas seções a seguir, são apresentadas metodologias de tratamento das capturas obtidas no experimento.

### 2.6.1 Análise Preliminar no Tratamento de Amostras para Determinação de Presença com Alvo Único

Esta análise foi feita preliminarmente, com apenas um alvo. O principal objetivo estava em obter informações sobre o grau de acoplamento magnético entre esse alvo e a rede elétrica, utilizada como meio de transmissão da comunicação PLC. Esses resultados aqui descritos foram anteriormente publicados em [65].

Para analisar os resultados obtidos um único alvo e determinar sua presença, são utilizadas comparações simples entre os espectros médios (valores médios das raias espectrais) obtidos com sala vazia e com a presença do alvo. Cada uma das capturas é formada por um vetor de  $2294 \times 1$  e cada valor contido no vetor representa uma raia do espectro OFDM capturado. Supondo-se que em cada sequência sejam obtidas 150 capturas. Concatenando-se as 150 capturas, isto é, os 150 vetores, obtemos uma matriz de  $2294 \times 150$ . Após a concatenação, é feita a média de cada raia espectral, que referem-se às linhas da matriz. Resolvendo a média de cada raia espectral, ao longo de cada uma das 2294 linhas, um novo vetor de  $2294 \times 1$  é obtido, sendo composto pelas médias de cada raia espectral. Essa resolução é alcançada através da relação 1 e equação 2:

$$\forall j, 1 \leq j \leq 2294, \quad (1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{i,j} \quad (2)$$

e ilustrado pela Figura 21, em que  $j$  representa cada uma das raias espectrais e  $x_{i,j}$  é o valor de cada raia espectral  $j$  em cada captura  $i$ . O termo  $n_i$  se refere a cada captura, onde o índice  $i$  indica o total de capturas feitas. Portanto,  $x_{i,j}$  é o valor de  $x$  na raia espectral  $j$  e da captura  $i$ .

O cálculo de média foi aplicado nas capturas com sala vazia e com a presença do alvo. Com esses valores calculados, é possível verificar o comportamento das portadoras no espectro OFDM e deduzir se há presença do alvo ou não. O resultado que indica uma detecção exitosa, pode ser deduzido em situações onde o espectro médio das capturas com alvo presente possui uma amplitude inferior, ou seja, está abaixo da amplitude das capturas executadas com sala vazia. Maiores detalhes são discutidos no capítulo de

resultados.

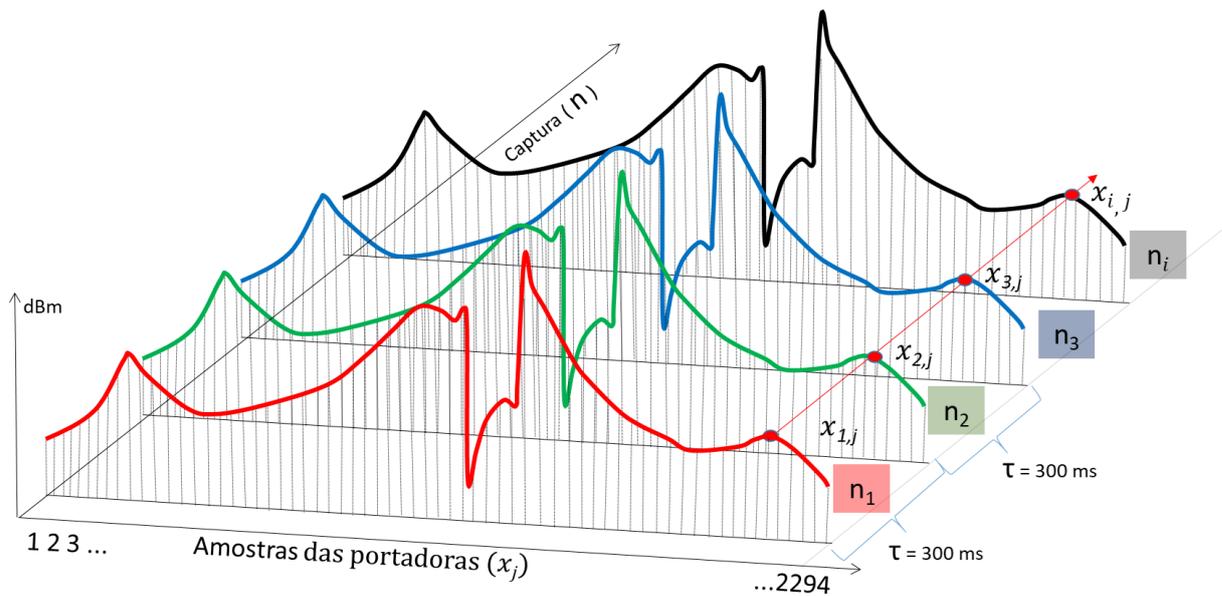


Figura 21: Composição da Média de Amostras, o “Espectro Médio”, ou “Média das Raias Espectrais”.

### 2.6.2 Tratamento de Amostras para Determinação de Presença com Diversidade de Alvos

Na segunda etapa de testes, consideramos 5 alvos com biotipos diferentes – a Tabela 5 indica as características corporais de cada alvo participante nas rodadas de capturas. As capturas dos espectros dos pulsos OFDM obtidas com tais alvos foram realizadas em dias diferentes, na mesma sala e com a mesma configuração e disposições de equipamentos das obtidas anteriormente com apenas um alvo.

Tabela 5: Características corporais dos alvos.

	Altura (m)	Peso (kg)
Alvo #1	1, 67	60
Alvo #2	1, 60	57
Alvo #3	1, 70	100
Alvo #4	1, 80	83
Alvo #5	1, 72	100

Para cada alvo, foram realizadas 150 capturas em cada região da sala; resultando em 2400 capturas por alvo (16 regiões). Além das medições realizadas com a presença do

alvo, também foram realizadas 300 capturas com a sala vazia, sempre antes da rodada de capturas com a presença dos alvos. Obtidas também, capturas de sala vazia em intervalos de tempo aleatórios e em dias distintos. O acúmulo das capturas com sala vazia compõe um banco de dados de capturas, ou apenas "banco", com aproximadamente 2500 capturas, sob as condições descritas.

Processamento, ou tratamento, dessas amostras para obtenção da detecção, seguem três abordagens: tratamento direto, Tratamento Direto com Limiar de Decisão e Tratamento Referenciado a Alvos, conforme descrito a seguir.

### 2.6.2.1 Tratamento Direto

O tratamento direto utiliza-se do resultado do tratamento do conjunto de capturas do banco de sala vazia e do conjunto de capturas com presença de alvos. Dessa forma, após o tratamento dos conjuntos de capturas, o resultado de ambos é comparado; observando-se quais raias espectrais das capturas com presença de alvos apresentarem valores menores do que as obtidos nas raias espectrais do banco de sala vazia.

Os arquivos de captura com presença de alvos são tratados conforme o fluxo apresentado na Figura 22 (direita). Os resultados desse tratamento são usado para comparação entre o espectro médio da presença de alvos e o espectro médio obtido à partir do banco ( Figura 22, esquerda). Esses resultados permite-nos analisar a densidade espectral dos pulsos OFDM, comparando ambas as situações: seu comportamento com a sala vazia e seu comportamento com a presença do alvo. Essa informação indicará se houve mudanças na densidade espectral dos pulsos OFDM, sob a influência desses dois cenários. O processo é repetido em cada uma das sondas, de forma isolada e independente.

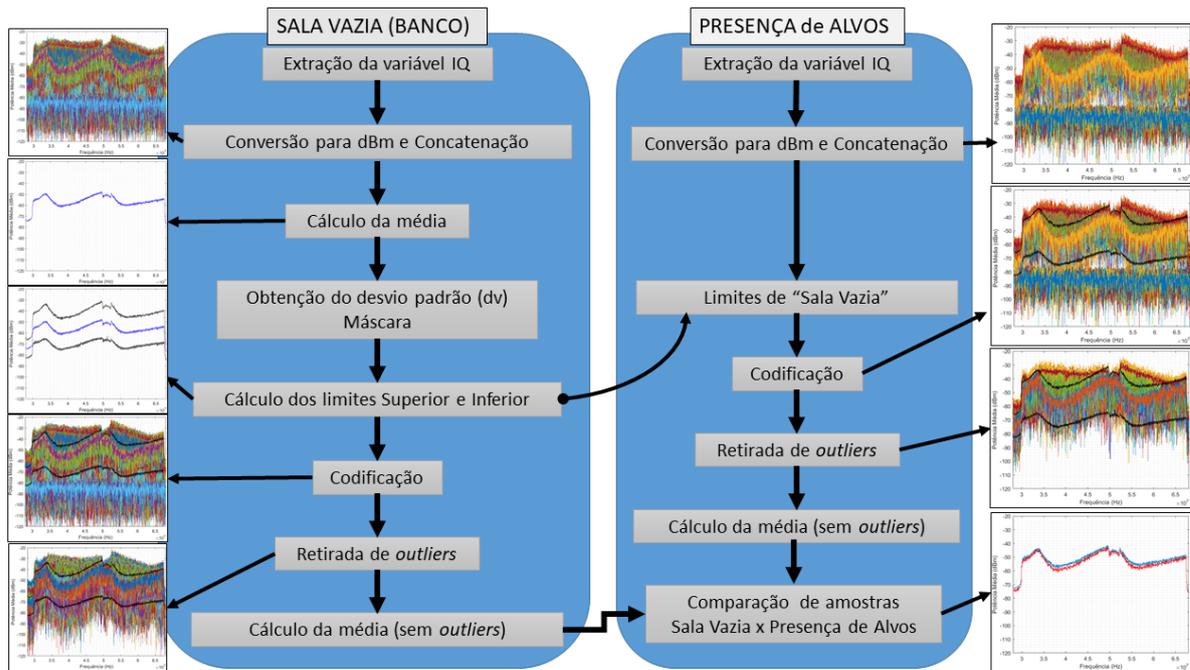


Figura 22: Diagrama em blocos do processamento de amostras. A primeira parte do diagrama (lado esquerdo da figura) mostra o processamento do banco de capturas de sala vazia acumuladas. A segunda parte, lado direito, mostra o processamento de capturas com alvo presente na sala.

No tratamento das capturas com a sala vazia, representado pelo primeiro diagrama em blocos da Figura 22 (esquerda), cada novo conjunto de capturas de sala vazia executado foi incorporado de maneira incremental a esse banco. Após a captura através de cada conjunto de sonda, os registros foram convertidos para dBm e agrupados. Em seguida, obtemos a média de cada raia espectral, conforme descrito na equação 2, e o correspondente desvio padrão ( $dv$ ). De posse da média e do  $dv$ , são definidos dois limites: limite superior e limite inferior, conforme a seguir:

$$\text{limiteSuperior} = \bar{x} + dv, \quad (3)$$

$$\text{limiteInferior} = \bar{x} - dv, \quad (4)$$

em que  $\bar{x}$  é a média de cada raia espectral, compondo o espectro médio, e ( $dv$ ), seu respectivo desvio padrão. Cumpre observar que os limites, superior e inferior, são calculados para cada uma das raias espectrais, separadamente.

A Figura 23 indica, em azul, o espectro médio como a sala vazia e em preto, os limites superior e inferior, calculados conforme as equações (3) e (4), respectivamente.

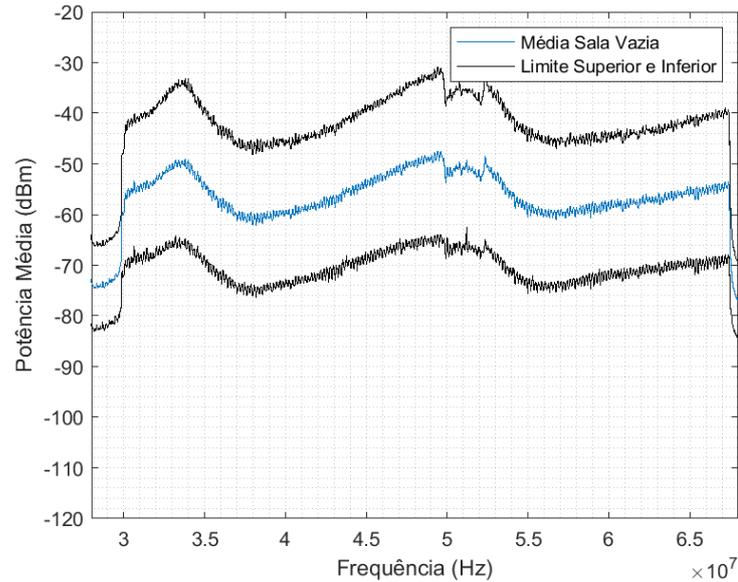


Figura 23: Representação gráfica exemplificando a obtenção do espectro médio e dos limites superior e inferior. Os limites calculados são utilizados para codificação das capturas

O bloco seguinte, na Figura 22 (esquerda), é o de codificação. Neste estágio, utiliza-se uma regra para atribuir valores, ou códigos, às raias espectrais de cada captura, resultado da comparação com os limites superior e inferior. A Figura 24 ilustra a sobreposição dos limites superior e inferior ao conjunto de capturas do banco de sala vazia. Realizando a comparação entre valores de cada raia e os limites, atribui-se o valor 0, 1 ou -1 a cada uma dessas raias espectrais de cada captura, da seguinte forma:

$$\text{Código da raia} = \begin{cases} 1 & \text{se valor\_da raia} > \text{limiteSuperior\_da\_raia} \\ -1 & \text{se valor\_da raia} < \text{limiteInferior\_da\_raia} \\ 0 & \text{se } \text{limiteInferior\_da\_raia} \leq \text{valor\_da raia} \leq \text{limiteSuperior\_da\_raia}. \end{cases} \quad (5)$$

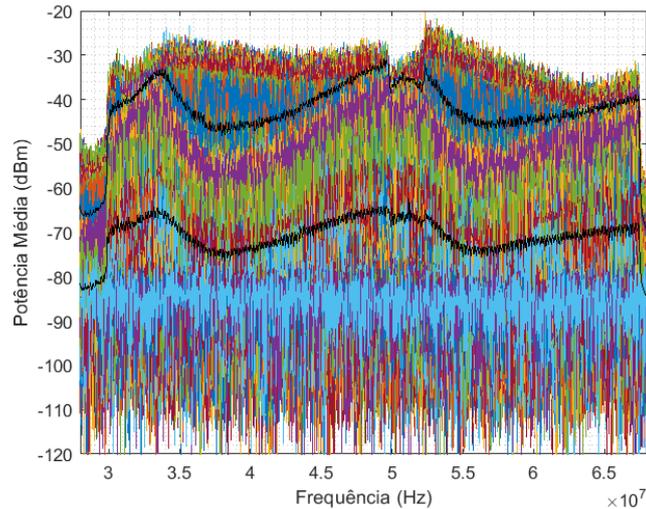


Figura 24: Representação gráfica dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas de Sala Vazia.

Os códigos resultantes gerados para cada captura são analisados e as que possuem 50% ou mais de valores  $-1$ , são descartados, considerados *outliers* por apresentarem um conteúdo espectral inferior ao esperado. Dessa forma, as capturas (ou ao menos grande parte delas) que ocorreram em períodos nos quais não havia comunicação (pulsos OFDM presentes no canal) entre os modems PLC são descartadas. A representação gráfica das capturas que sobram após o descarte de *outliers* é apresentada na Figura 25.

Após retirada dos *outliers*, o processo de cômputo da média espectral é reaplicado para obter a representação das raias espectrais médias, as quais são usadas como caracterização da sala vazia; serão usadas para realizar as comparações finais, isto é, serão aplicados como gabaritos.

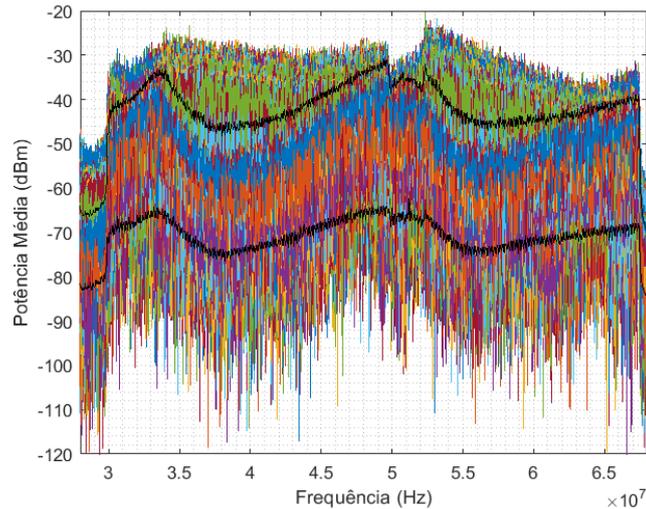


Figura 25: Representação dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas de Sala Vazia sem *outliers*

O segundo diagrama em blocos da Figura 22 (direita) descreve o processamento das capturas realizadas com a presença do alvo em qualquer uma das 16 regiões da sala. As capturas com presença de alvo, representada pela Figura 26, seguem os mesmos passos realizados para o tratamento das capturas da sala vazia. No entanto, ao aplicar a codificação às amostras com a presença do alvo, são utilizados os mesmos limites superior e inferior definidos no tratamento das capturas com a sala vazia. A sobreposição desses limites aos registros com alvo é mostrada na Figura 27. Feito isso, o mesmo processo de descarte de *outliers* é executado, resultando no registro apresentado na Figura 28.

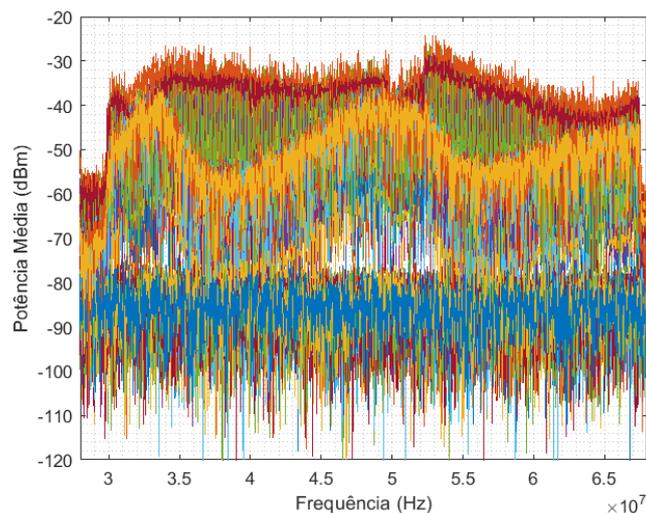


Figura 26: Sobreposição de cada uma das capturas com com presença do alvo (150 por região onde o alvo pode estar).

Da mesma forma, aplicando o código às capturas com alvo, descartamos todas com 50% ou mais de valores  $-1$ , eliminando os *outliers*. O conjunto de capturas com presença do alvo, sem *outliers*, está representado na Figura 28. A partir do conjunto de capturas sem *outliers*, calculamos a média para cada uma das raias espectrais (amostras).

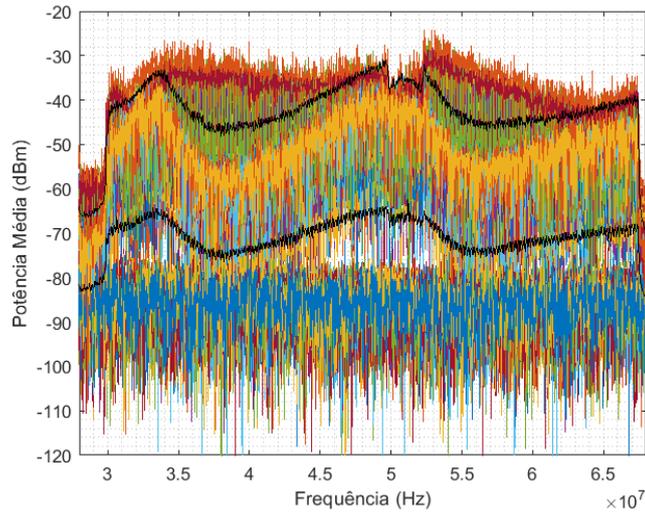


Figura 27: Representação gráfica dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas com a presença do alvo.

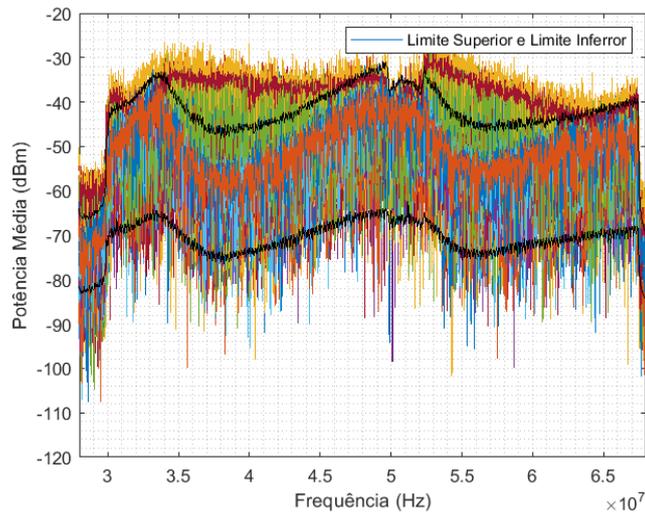


Figura 28: Representação gráfica dos Limites Superior e Inferior sobrepostos às capturas com presença do alvo, sem *outliers*.

A divisão da sala em regiões cria uma grade que pode ser empregada para determinar a posição do alvo. Diferentemente, a detecção do alvo não faz distinção entre as

regiões, apenas considera sua presença na sala. Contudo, o teste de detecção é feito separadamente em cada uma das regiões. Dessa forma, permite-se considerar uma detecção de sucesso obter um resultado positivo em apenas uma das regiões.

Seguindo a premissa apresentada na seção 2.6.1 deseja-se reproduzir as condições de detecção, isto é, verificar se os valores médios com a presença do alvo em cada região são inferiores aos valores médios obtidos com a sala vazia. A Figura 29 traz a representação dos espectros médios para a sala vazia e para a presença do alvo. A comparação entre eles resulta em um vetor de comparação com 2294 colunas, onde são armazenados os valores 0 ou 1. O valor 0 indica que a raia espectral com a presença de alvo é igual ou menor que a raia do espectro médio com sala vazia, e o valor 1, o contrário. Isso resulta em vetores de código binário, aqui chamados de vetor de comparação, como exemplifica a Tabela 6.

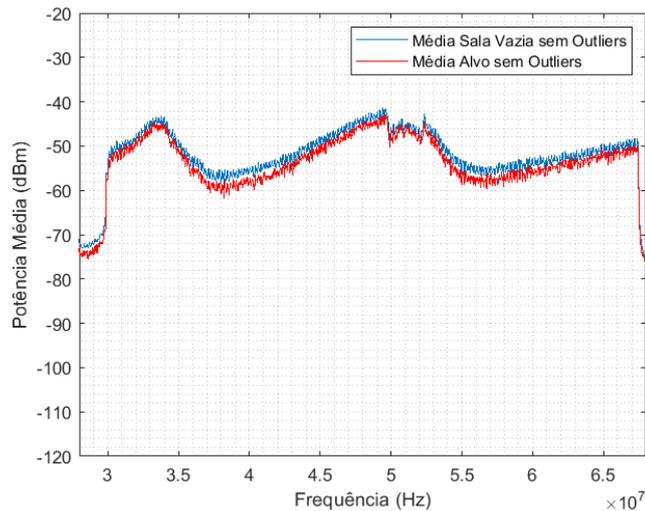


Figura 29: Exemplo de representação gráfica para comparação entre espectro médio de sala vazia e espectro médio com presença do alvo.

Tabela 6: Vetor de Comparação e sua composição de código Binário - Exemplo retirado do Vetores de Comparação do Alvo #3 na sonda 1, nas 16 regiões.

Vetores de Comparação na Região #r							
<b>Amostra/ Raia Espectral (a)</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>...</b>	<b>2293</b>	<b>2294</b>
Valores (v) na região (r) #1	0	0	0	0	...	0	0
Valores (v) na região (r) #2	1	1	1	1	...	1	1
...	...	...	...	...	...	...	...
Valores (v) na região (r) #16	1	1	1	1	...	1	1

Somam-se então os valores contidos no vetor de comparação, fazendo:

$$\text{resultado}(r) = \sum_{a=1}^{2294} v_{a,r}, \quad (6)$$

em que resultado( $r$ ) indica a soma dos valores de todas as raias espectrais, representadas por cada valor no vetor de comparação, na região de localização do alvo. Cada região é representada por ( $r$ ) e  $r \in [1 \dots 16]$ , que é a região onde está o alvo. O termo  $v_{a,r}$  indica valor de cada Amostra ou Raia Espectral. O resultado dessa soma de zeros e uns é um número inteiro positivo, que é utilizado como base, em uma primeira abordagem, para determinar se a detecção do alvo é ou não é possível. Os valores de resultado( $r$ ) em cada sonda estão indicados na Tabela 7, correlacionando alvo e região. Essa tabela será a base para tratamento e proceso de decisões, que indicarão se uma detecção positiva ou não.

Tabela 7: Resultado das somas dos códigos (resultado( $r$ )) obtidos em cada sonda, relacionando cada alvo com a região da sala onde estava localizado, no momento da captura do espectro dos pulsos OFDM)

SONDA 1																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	2294	1248	2146	2291	1676	387	1738	1193	1694	631	1766	2105	2139	409	1680	1576
Alvo#2	0	74	526	40	466	729	4	369	1436	93	346	2	79	19	82	109
Alvo#3	0	2097	1211	1206	333	770	2294	2241	1157	280	1742	518	1960	1180	2276	2181
Alvo#4	1411	2275	10	2221	2260	1483	347	2294	2063	2020	2275	110	367	740	730	2279
Alvo#5	928	0	1086	107	9	17	11	1919	0	2160	2059	2172	2121	346	1934	1416

SONDA 2																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	1976	1595	2158	983	257	973	1506	1359	1610	251	1225	1103	1398	1803	1774	910
Alvo#2	400	647	510	10	107	816	17	413	100	146	128	581	5	40	611	18
Alvo#3	396	1939	1137	7	149	938	1340	1020	1698	185	331	1488	1822	544	433	1758
Alvo#4	2021	1250	713	1208	1588	2017	1030	2237	975	1860	18	2112	1907	1609	1389	2289
Alvo#5	1512	100	158	320	254	177	1849	1373	127	1408	984	1836	830	1634	1954	1503

SONDA 3																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	1950	1595	850	1157	57	216	1014	100	1137	1334	1890	350	315	1258	1300	477
Alvo#2	1448	48	24	34	389	28	1183	997	1296	96	8	39	75	220	333	50
Alvo#3	2034	597	1300	138	152	77	964	598	1902	1655	1286	1094	459	2097	216	611
Alvo#4	1001	1354	579	686	659	2145	2223	1784	1181	578	901	1530	2174	610	394	516
Alvo#5	1968	1655	392	1613	860	1622	2061	696	728	159	1319	2045	646	1309	1005	561

### 2.6.2.2 Tratamento Direto com Limiar de Decisão

A fim de decidir quais resultados da soma do vetor de comparação presentes na Tabela 7 são detecções, os correlacionamos a um limiar de decisão. O limiar de decisão é uma porcentagem do valor máximo que o resultado da soma do vetor de comparação pode assumir, ou seja, uma porcentagem do valor máximo de 2294. Essas porcentagens são distribuídas entre 10 e 90 %, de 2294, com passos de 10%. A cada passo calculamos o valor do limiar e comparamos o resultado com os valores da Tabela 7. Se o valor correspondente da Tabela 7 for menor que do limiar calculado, conta-se então como uma detecção positiva. O número de regiões detectadas corretamente para cada alvo está na Tabela 8.

Em um cenário hipotético, no intuito de definir qual limiar será usado e arbitrando a seguinte condição: deseja-se considerar uma detecção correta quando 8 ou mais regiões da sala tenham uma detecção exitosa. Definida a condição, as colunas da Tabela 8 são analisadas a fim de verificar quais valores correspondem ao cenário. A coluna que possuir exatamente 8 regiões, ou mais, em que um alvo fora detectado, será escolhida como limiar. Os valores da Tabela 8, correspondentes ao cenário hipotético, estão listados na Tabela 9.

Tabela 8: Número de regiões em que cada alvo é detectado corretamente em cada sonda variando o limiar de decisão.

Sonda 1									
Limiar	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Valores Calculados de Limiar	229	458	688	917	1147	1376	1605	1835	2064
Num. de Regiões em que o Alvo#1 é Detectado	0	2	3	3	3	5	6	11	11
Num. de Regiões em que o Alvo#2 é Detectado	10	12	14	15	15	15	16	16	16
Num. de Regiões em que o Alvo#3 é Detectado	1	3	4	5	5	9	9	11	11
Num. de Regiões em que o Alvo#4 é Detectado	2	4	4	6	6	6	8	8	10
Num. de Regiões em que o Alvo#5 é Detectado)	6	7	7	7	7	9	10	10	13
Sonda 2									
Limiar	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Valores Calculados de Limiar #	229	458	688	917	1147	1376	1605	1835	2064
Num. de Regiões em que o Alvo#1 é Detectado	0	2	2	3	6	8	11	14	15
Num. de Regiões em que o Alvo#2 é Detectado	9	11	15	16	16	16	16	16	16
Num. de Regiões em que o Alvo#3 é Detectado	3	6	7	7	11	12	12	15	16
Num. de Regiões em que o Alvo#4 é Detectado	1	1	1	2	4	6	8	9	13
Num. de Regiões em que o Alvo#5 é Detectado	4	6	6	7	8	9	12	13	16
Sonda 3									
Limiar	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Valores Calculados de Limiar#	229	458	688	917	1147	1376	1605	1835	2064
Num. de Regiões em que o Alvo#1 é Detectado	3	5	6	7	9	13	14	14	16
Num. de Regiões em que o Alvo#2 é Detectado)	10	12	12	12	13	15	16	16	16
Num. de Regiões em que o Alvo#3 é Detectado	4	4	8	8	10	12	12	13	15
Num. de Regiões em que o Alvo#4 é Detectado	0	1	7	8	9	11	12	13	13
Num. de Regiões em que o Alvo#5 é Detectado	1	2	4	7	8	10	10	13	16

Tabela 9: Tabela com os limiares de decisão escolhido para cada sonda e seus respectivos valores calculados. Escolha hipotética de limiares. A detecção dos alvos deve ocorrer em 8 ou mais regiões.

Sonda	Limiar	Valor calculado
1	80%	1835
2	70%	1605
3	50%	1147

Aplicando os valores calculados de limiar à Tabela 7, chegamos ao resultado apresentado na Tabela 10, onde as detecções bem sucedidas são destacadas em vermelho, considerando:

Se  $(\text{resultado}(r) < \text{valor\_limiar})$  então Destacar\_célula(r),

em cada uma das sondas.

Tabela 10: Regiões nas quais o alvo é corretamente detectado aplicando o limiar ao somatório dos elementos do código binário. Resultado da Tabela 9 aplicado à Tabela 7.

SONDA 1																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	2294	1248	2146	2291	1676	387	1738	1193	1694	631	1766	2105	2139	409	1680	1576
Alvo#2	0	74	526	40	466	729	4	369	1436	93	346	2	79	19	82	109
Alvo#3	0	2097	1211	1206	333	770	2294	2241	1157	280	1742	518	1960	1180	2276	2181
Alvo#4	1411	2275	10	2221	2260	1483	347	2294	2063	2020	2275	110	367	740	730	2279
Alvo#5	928	0	1086	107	9	17	11	1919	0	2160	2059	2172	2121	346	1934	1416

SONDA 2																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	1976	1595	2158	983	257	973	1506	1359	1610	251	1225	1103	1398	1803	1774	910
Alvo#2	400	647	510	10	107	816	17	413	100	146	128	581	5	40	611	18
Alvo#3	396	1939	1137	7	149	938	1340	1020	1698	185	331	1488	1822	544	433	1758
Alvo#4	2021	1250	713	1208	1588	2017	1030	2237	975	1860	18	2112	1907	1609	1389	2289
Alvo#5	1512	100	158	320	254	177	1849	1373	127	1408	984	1836	830	1634	1954	1503

SONDA 3																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	1950	1595	850	1157	57	216	1014	100	1137	1334	1890	350	315	1258	1300	477
Alvo#2	1448	48	24	34	389	28	1183	997	1296	96	8	39	75	220	333	50
Alvo#3	2034	597	1300	138	152	77	964	598	1902	1655	1286	1094	459	2097	216	611
Alvo#4	1001	1354	579	686	659	2145	2223	1784	1181	578	901	1530	2174	610	394	516
Alvo#5	1968	1655	392	1613	860	1622	2061	696	728	159	1319	2045	646	1309	1005	561

Note-se que uma detecção do alvo exitosa pode decorrer do sucesso em algumas regiões da sala e não em todas as regiões. A utilização de limiares comparativos para detecção da entrada de pessoas em uma sala pode ser viável na prática. É preciso ressaltar que o método descrito oferece um limiar mais rígido, não adaptável às condições

ambientais. Uma vez selecionado não se altera, até que um novo limiar seja calculado e escolhido.

### 2.6.2.3 Tratamento Referenciado a Alvos

Durante a captura de presença de alvo o ambiente pode mudar, isto é, ele é dinâmico. Como o sistema PLC é suscetível a variações de impedância na rede e não é possível prever até onde o acoplamento magnético influencia a resposta do canal. É desejável obter capturas de sala vazia continuamente, gerando um padrão que muda dinamicamente; realizando a detecção a partir da comparação entre as capturas com a presença do alvo e um padrão/gabarito dinâmico, composto pelo banco de capturas de sala vazia.

A possibilidade de detecção dinâmica é avaliada utilizando-se de capturas espectrais de sala vazia, realizadas imediatamente antes do protocolo de captura com alvos. Nesta fase do experimento, dispõe-se de 300 capturas em sala vazia por coleta por alvo; anteriormente, compunham o banco de sala vazia. Desta forma, pode-se acomodar no teste de detecção possíveis variações das características ambientais além das condições do canal em função do tempo, clima, rede, etc. Essa estratégia adequaria dinamicamente o gabarito de sala vazia, o que provavelmente permitirá um detector adaptativo para o qual espera-se um desempenho melhor [66].

Para realizarmos o processo ilustrado na Figura 30(esquerda), as fases de tratamento do banco de capturas espectrais com sala vazia permanece inalterado, seguindo o que foi demonstrado na Figura 22 (esquerda). Para as capturas de sala vazia, realizadas antes de cada protocolo de captura com presença do alvo Figura 30(direita), o tratamento é o mesmo ao realizado nas capturas executadas com a presença de alvos, como pode ser visto na Figura 30 (direita). Com isso, obtêm-se os espectros médios para a sala vazia, referenciados a um determinado alvo, isto é, obtidos antes do protocolo de captura desse alvo. Esses espectros médios resultantes referenciados ao alvo, podem ser comparados então, ao espectro médio do banco de sala vazia.

O resultado do tratamento demonstrado na Figura 30 é a comparação entre o espectro médio do banco de sala vazia e o espectro médio de sala vazia referenciado ao alvo. Este resultado, conforme visto na seção 2.6.2.1, é um vetor de códigos, com valores 0 e 1. A soma dos códigos desse vetor, onde cada valor é referente a uma raia espectral,

é realizada conforme descrito na mesma seção 2.6.2.1, obtidas através da equação 6 e seu resultado pode ser visto na Tabela 11. Cabe ressaltar que, para capturas de sala vazia, a equação 6 não considera as regiões independentemente, sendo assim, o índice ( $r$ ) não é aplicado.

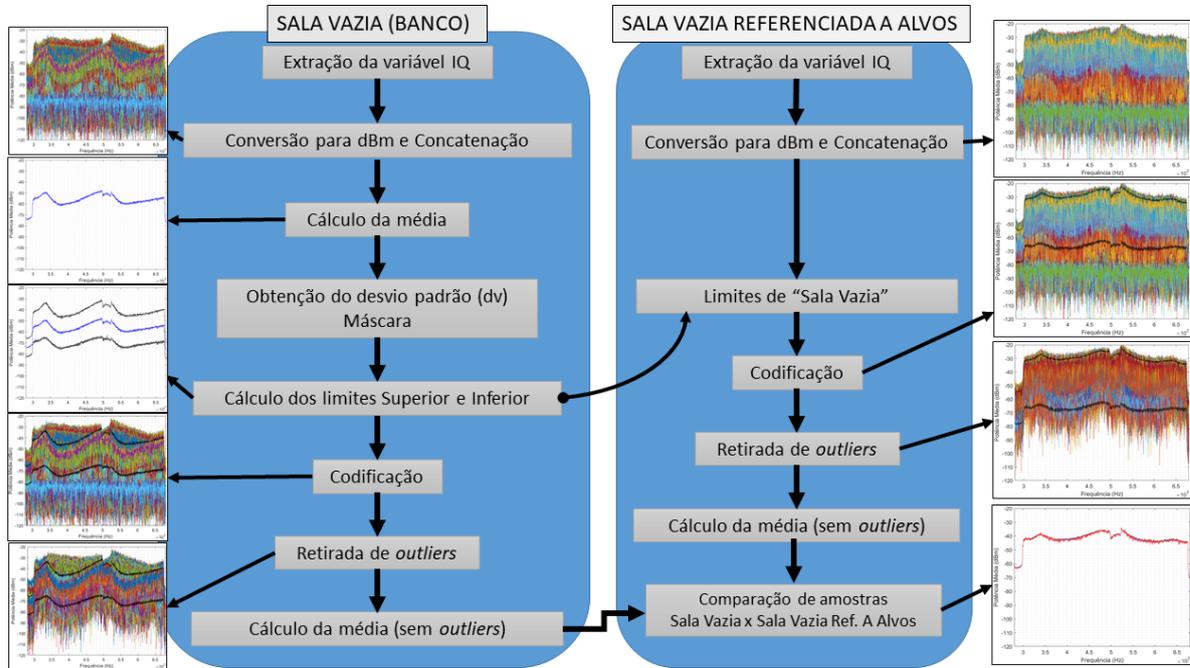


Figura 30: Diagrama em blocos do processamento de amostras. A primeira parte do diagrama (lado esquerdo da figura) mostra o processamento do banco de capturas de sala vazia acumuladas. A segunda parte, lado direito, mostra o processamento de capturas com sala vazia referenciada ao alvo.

Tabela 11: Resultado da soma das raias espectrais do vetor de comparação resultante entre Banco de Sala Vazia e Sala Vazia referente a alvos

Sonda 1					
Referência	Alvo #1	Alvo #2	Alvo #3	Alvo #4	Alvo #5
Resultado Soma	366	1149	1528	676	1882

Sonda 2					
Referência	Alvo #1	Alvo #2	Alvo #3	Alvo #4	Alvo #5
Resultado Soma	1822	775	1511	614	1796

Sonda 3					
Referência	Alvo #1	Alvo #2	Alvo #3	Alvo #4	Alvo #5
Resultado Soma	2184	2290	2293	2252	2293

Pode-se, então, utilizar os “Resultado Soma” contidos na Tabela 11 como referência e compará-los aos valores anteriormente obtidos pelo Tratamento Direto (2.6.2.1), apresentados pela Tabela 7, para cada alvo em cada região. Isto é, o valor da Tabela 11 de Resultado Soma do Alvo #1 na sonda 1, por exemplo, será comparado com os valores de todas as regiões referentes ao Alvo #1 da Tabela 7, na respectiva sonda. Sendo os valores da Tabela 11 menores que o valor referente à Tabela 7, estes são então considerados uma detecção de sucesso, como destacado na Tabela 12.

Tabela 12: Resultado das somas obtidas na comparação entre média do banco de sala vazia e média com presença de alvo - com destaque em vermelho para detecção exitosa na comparação com a Tabela 7.

SONDA 1																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	2294	1248	2146	2291	1676	387	1738	1193	1694	631	1766	2105	2139	409	1680	1576
Alvo#2	0	74	526	40	466	729	4	369	1436	93	346	2	79	19	82	109
Alvo#3	0	2097	1211	1206	333	770	2294	2241	1157	280	1742	518	1960	1180	2276	2181
Alvo#4	1411	2275	10	2221	2260	1483	347	2294	2063	2020	2275	110	367	740	730	2279
Alvo#5	928	0	1086	107	9	17	11	1919	0	2160	2059	2172	2121	346	1934	1416

SONDA 2																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	1976	1595	2158	983	257	973	1506	1359	1610	251	1225	1103	1398	1803	1774	910
Alvo#2	400	647	510	10	107	816	17	413	100	146	128	581	5	40	611	18
Alvo#3	396	1939	1137	7	149	938	1340	1020	1698	185	331	1488	1822	544	433	1758
Alvo#4	2021	1250	713	1208	1588	2017	1030	2237	975	1860	18	2112	1907	1609	1389	2289
Alvo#5	1512	100	158	320	254	177	1849	1373	127	1408	984	1836	830	1634	1954	1503

SONDA 3																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Alvo#1	1950	1595	850	1157	57	216	1014	100	1137	1334	1890	350	315	1258	1300	477
Alvo#2	1448	48	24	34	389	28	1183	997	1296	96	8	39	75	220	333	50
Alvo#3	2034	597	1300	138	152	77	964	598	1902	1655	1286	1094	459	2097	216	611
Alvo#4	1001	1354	579	686	659	2145	2223	1784	1181	578	901	1530	2174	610	394	516
Alvo#5	1968	1655	392	1613	860	1622	2061	696	728	159	1319	2045	646	1309	1005	561

Os resultados apresentados na Tabela 10 e na Tabela 12 serão descritos mais detalhadamente no capítulo a seguir.

### 3 RESULTADOS

Este capítulo traz os resultados obtidos com a metodologia experimental descrita no capítulo anterior. São descritos os resultados das 3 metodologias adotadas para a resolução da detecção.

Em primeiro lugar, os resultados para alvo único são descritos e como isso implica em uma detecção exitosa. Após os resultados experimentais com alvo único, múltiplos alvos com biotipos diferentes foram testados. Os resultados das metodologias de limiar de decisão e capturas de sala vazia referenciadas aos alvos são apresentados; deseja-se analisar em quais cenários há possibilidade de ocorrência de detecções.

Dessa forma, a seguir, a seção 3.1 deste capítulo traz os resultados do experimento utilizando um único alvo. Em seguida, na seção 3.2 são apresentados os resultados utilizando-se múltiplos alvos com biotipos variados. Esta última, sendo dividida em duas subseções. A primeira descreve o resultado da aplicação do limiar de decisão e em seguida, são apresentados os resultados para a utilização das capturas de sala vazia referenciada a alvos.

#### 3.1 Resultado da Análise Preliminar no Tratamento de Amostras para Determinação de Presença com Alvo Único

As capturas dos espectros dos pulsos OFDM foram realizadas nas três sondas. Primeiramente, o experimento restringiu-se a apenas um alvo, mas em diferentes regiões da sala, com o objetivo de verificar se é possível observar mudanças nos pulsos OFDM (seus espectros) devidas à presença do alvo. Exemplos das medições coletadas nesse caso são apresentados na Figura 31, onde tem-se ainda os resultados de capturas realizadas na condição de sala vazia.

Os gráficos na Figura 31 trazem os espectros médios OFDM considerando as múltiplas coletas do alvo para cada uma das regiões da sala. Em preto, temos o espectro médio quando a sala está vazia. As demais cores representam os espectros médios quando o alvo está posicionado nas diferentes regiões, de 1 a 16. Isto é, fez-se capturas do espectro dos pulsos OFDM empregados pelos modems PLC com a sala vazia e também, com a presença do alvo em cada uma das 16 regiões. O espectro médio (a média de cada raia espectral) é computado para cada região. Os espectros médios apresentados resultam

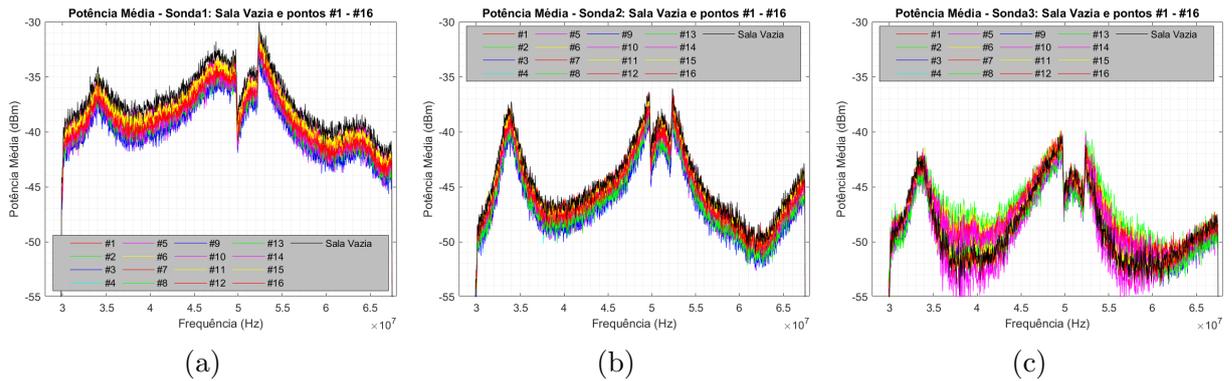


Figura 31: Espectros de potências média com o alvo nas 16 regiões e com a sala vazia (em preto), referentes às sondas 1, 2 e 3, respectivamente.

de 150 capturas sequenciais em cada uma das 17 situações (sala vazia e 16 regiões); em total, temos 2550 capturas.

Pode-se observar que os espectros médios dos pulsos capturados na sonda 2 apresentam comportamento muito semelhante ao obtido com a sonda 1. O espectro médio, considerando a presença do alvo em qualquer região, nunca é maior do que o obtido com a sala vazia. No entanto, as médias das raias espectrais não excursionam na mesma faixa de valores; neste caso, está mais próxima dos valores obtidos para as medições realizadas com a sonda 3, variando de -56 dBm a -54 dBm. A diferença de valores dos espectros médios entre as sondas refletem seu posicionamento ao longo da fita elétrica. Na sonda 3 (Figura 31(c)), as médias das raias espectrais têm valores abaixo e acima das médias com a sala vazia, variando ao longo da banda. Esse comportamento não traz benefício para a tarefa de detecção do alvo, porém, diferentemente, para as sondas 1 e 2 observamos valores mais baixos no espectro médio com a sala ocupada em comparação com sala vazia, sendo possível detectar o alvo.

### 3.2 Resultado da Análise de Múltiplos Alvos - Tratamento Direto

Os resultados acumulados com 1 (um) conjunto de testes experimentais e 1 (um) alvo, mencionados no início deste capítulo, indicam que na sua presença, as somas dos códigos (resultado( $r$ )) para mais alvos, devem apresentar valores próximos de zero. Com a continuidade do experimento, obtendo mais capturas com novos alvos e em momentos diferentes, as somas dos códigos (resultado( $r$ )) gerados ao final do tratamento descrito pela seção 2.6.2.1, demonstraram um comportamento divergente, aparentemente.

A Tabela 7 apresenta os somatórios dos códigos obtidos para os espectros médios

(a média dos registros que sobram após a filtragem de *outlier*) em cada região para cada sonda. É possível verificar ainda que os resultados das somas mais próximos de zero não ocorrem sempre. Isso contraria a observação do primeiro experimento, ilustrado graficamente na Figura 31, pois indica que a média espectral com a presença de alvo está acima da média espectral do banco de capturas de sala vazia. De qualquer forma, é necessário analisar os valores obtidos na Tabela 7 e buscar encontrar valores que tendem a se aproximar de zero ou ainda, padrões que possam caracterizar uma detecção exitosa.

Para o Alvo #2, observa-se um comportamento distinto, com somas significativamente mais baixas que as observadas para os outros alvos. Essa discrepância pode estar associada ao biotipo do alvo, que é o menor entre os testados, apresentando menor altura e massa corporal.

### 3.2.1 Resultados Utilizando Limiar de Decisão

Analisando os resultados da Tabela 10, excetuando-se os obtidos para o Alvo #1 na Sonda 1 e para o Alvo #4 na Sonda 2, o método apresentou sucesso consistente na detecção de alvos utilizando o limiar de decisão da Tabela 11. É conveniente lembrar que os resultados baseiam-se em um exemplo, ou melhor, uma escolha de limiar arbitrária, que pode ser ajustada de forma a melhorar o desempenho da detecção.

A Tabela 13 rearranja os resultados obtidos com a aplicação do limiar de decisão, a fim de mostrar os resultados organizados por alvos. Dessa forma, é possível verificar se os alvos, devido à sua constituição física, têm a capacidade de influir nos resultados obtidos em cada uma das sondas. Também busca-se observar se as detecções apresentam-se consistentes e identificar possíveis anormalidades nos resultados. A Tabela 13 separa, para cada alvo, os resultados obtidos em cada uma das sondas, após o tratamento das capturas e a aplicação do limiar de decisão. As células marcadas em vermelho indicam que o alvo foi detectado por uma sonda em uma determinada região da sala. As células referentes às regiões, marcadas em azul, indicam uma detecção considerada exitosa quando duas ou mais sondas conseguem detectar o alvo, na referida região.

Analisando sob as condições propostas é possível observar que os resultados são diferentes, conforme alvos diferentes são testados. Cabe destacar os resultados obtidos com o Alvo #2 em que sua detecção foi possível em quase todas as combinações de sonda e regiões. Este alvo em particular possui um biotipo menor, com menor estatura e peso.

Os resultados de soma (resultado( $r$ )) apresentam os valores mais baixos dentre os alvos testados, reforçando a ideia de um maior acoplamento nas frequências utilizadas pelos pulsos OFDM, em comprimentos de onda que equivalem-se à altura do alvo.

Os Alvos #3 e #5 possuem biotipos próximos e apresentam detecções também similares. O Alvo #1 poderia ser incluído no grupo de biotipos próximos, mas o fato de não ter sido detectado pela sonda 1 evidencia alguma anormalidade. Contudo, é importante considerar que a massa corporal do Alvo #1 é 40% inferior à dos Alvos #3 e #5, podendo ser a causa da anormalidade nos resultados. Esses três alvos, em todo caso, apresentaram a mesma quantidade de regiões com detecção exitosa, evidenciando detecções consistentes para biotipos com alturas similares.

O Alvo #4 se mostrou em posição diametralmente oposta à do Alvo #2 no espectro de decisão. Sua detecção falhou em quase todas as regiões. Contudo, a sonda 3 foi capaz de detectá-lo em todas essas regiões, independentemente. Analisando o biotipo do Alvo #4, é possível verificar que, de todos os alvos testados, este apresentava a maior estatura, mesmo sua massa corporal sendo similar à dos Alvos #3 e #4.

Tabela 13: Reinterpretação da Tabela 10 agora organizada por Alvos. Regiões nas quais o alvo é corretamente detectado considerando cada uma das sondas – o destaque em vermelho significa uma detecção exitosa – a cor azul indica regiões onde o alvo foi detectado por no mínimo duas sondas.

ALVO #1																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	2294	1248	2146	2291	1676	387	1738	1193	1694	631	1766	2105	2139	409	1680	1576
SONDA 2	1976	1595	2158	983	257	973	1506	1359	1610	251	1225	1103	1398	1803	1774	910
SONDA 3	1950	1595	850	1157	57	216	1014	100	1137	1334	1890	350	315	1258	1300	477

ALVO #2																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	0	74	526	40	466	729	4	369	1436	93	346	2	79	19	82	109
SONDA 2	400	647	510	10	107	816	17	413	100	146	128	581	5	40	611	18
SONDA 3	1448	48	24	34	389	28	1183	997	1296	96	8	39	75	220	333	50

ALVO #3																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	0	2097	1211	1206	333	770	2294	2241	1157	280	1742	518	1960	1180	2276	2181
SONDA 2	396	1939	1137	7	149	938	1340	1020	1698	185	331	1488	1822	544	433	1758
SONDA 3	2034	597	1300	138	152	77	964	598	1902	1655	1286	1094	459	2097	216	611

ALVO #4																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	1411	2275	10	2221	2260	1483	347	2294	2063	2020	2275	110	367	740	730	2279
SONDA 2	2021	1250	713	1208	1588	2017	1030	2237	975	1860	18	2112	1907	1609	1389	2289
SONDA 3	1001	1354	579	686	659	2145	2223	1784	1181	578	901	1530	2174	610	394	516

ALVO #5																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	928	0	1086	107	9	17	11	1919	0	2160	2059	2172	2121	346	1934	1416
SONDA 2	1512	100	158	320	254	177	1849	1373	127	1408	984	1836	830	1634	1954	1503
SONDA 3	1968	1655	392	1613	860	1622	2061	696	728	159	1319	2045	646	1309	1005	561

### 3.2.2 Resultados Utilizando Tratamento Referenciado a Alvos

Utilizar o tratamento referenciado a alvos visa dar dinâmica na análise dos resultados obtidos. Busca-se inserir a variável ambiental no cálculo dos resultados que determinarão se houve uma detecção ou não. Dessa forma, ao utilizar-se de capturas obtidas imediatamente antes do protocolo de captura espectral com alvo presente, estima-se uma detecção mais consistente.

Assim como na Tabela 13, os resultados de tratamento referenciado a alvos foram reinterpretado em uma tabela onde os valores foram agrupados por alvo e podem ser vistos na Tabela 14. Novamente, cada alvo traz as medidas em cada sonda, para cada região. Os valores destacados em vermelho indicam, sob os critérios adotados, que a sonda fez uma detecção positiva em determinada região. As regiões marcadas em azul indicam uma detecção exitosa, onde duas ou mais sondas foram capazes de retornar um resultado positivo.

Tabela 14: Reinterpretação da Tabela 12 agora organizada por Alvos. Regiões nas quais o alvo é corretamente detectado considerando cada uma das sondas – o destaque em vermelho significa uma detecção exitosa – a cor azul destaca regiões onde o alvo foi detectado por no mínimo duas sondas.

ALVO #1																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	2294	1248	2146	2291	1676	387	1738	1193	1694	631	1766	2105	2139	409	1680	1576
SONDA 2	1976	1595	2158	983	257	973	1506	1359	1610	251	1225	1103	1398	1803	1774	910
SONDA 3	1950	1595	850	1157	57	216	1014	100	1137	1334	1890	350	315	1258	1300	477
ALVO #2																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	0	74	526	40	466	729	4	369	1436	93	346	2	79	19	82	109
SONDA 2	400	647	510	10	107	816	17	413	100	146	128	581	5	40	611	18
SONDA 3	1448	48	24	34	389	28	1183	997	1296	96	8	39	75	220	333	50
ALVO #3																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	0	2097	1211	1206	333	770	2294	2241	1157	280	1742	518	1960	1180	2276	2181
SONDA 2	396	1939	1137	7	149	938	1340	1020	1698	185	331	1488	1822	544	433	1758
SONDA 3	2034	597	1300	138	152	77	964	598	1902	1655	1286	1094	459	2097	216	611
ALVO #4																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	1411	2275	10	2221	2260	1483	347	2294	2063	2020	2275	110	367	740	730	2279
SONDA 2	2021	1250	713	1208	1588	2017	1030	2237	975	1860	18	2112	1907	1609	1389	2289
SONDA 3	1001	1354	579	686	659	2145	2223	1784	1181	578	901	1530	2174	610	394	516
ALVO #5																
	Regiões															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SONDA 1	928	0	1086	107	9	17	11	1919	0	2160	2059	2172	2121	346	1934	1416
SONDA 2	1512	100	158	320	254	177	1849	1373	127	1408	984	1836	830	1634	1954	1503
SONDA 3	1968	1655	392	1613	860	1622	2061	696	728	159	1319	2045	646	1309	1005	561

Observando a Tabela 14 é possível verificar que a detecção é consistente com a

obtida utilizando-se limiar de decisão. O Alvo #2 ainda é detectado em todas as 16 regiões, os Alvos #1, #3 e #5 são detectados em menos regiões, mas em número similar; Alvos #1 e #3 detectados em 12 regiões e Alvo #5 em 11 regiões. O Alvo #4 apresentou uma discreta melhora em número de regiões com detecção exitosa, totalizando 6 regiões em detrimento das 5 anteriormente obtidas com o limiar de decisão.

## CONCLUSÃO

Sistemas de detecção e posicionamento usualmente empregam sensores no alvo e podem, ou não, usar equipamentos e sinais específicos para esse fim. Diferentemente, este trabalho investigou se a presença de uma pessoa (alvo) numa sala pode ser detectada passivamente.

Este estudo verificou se alterações no canal PLC, ou melhor, na densidade espectral dos pulsos OFDM do PLC, fornecem informações que permitam detectar a presença de uma pessoa em um ambiente interno. Assim, observou-se como essas distorções/alterações no espectro, causadas pelo acoplamento entre o alvo (pessoa) e a rede elétrica, podem ser utilizadas na detecção de alvos.

Os resultados permitiram qualificar a influência do corpo humano nas portadoras OFDM; viu-se que alterações significativas ocorrem na potência média dos pulsos OFDM devido à presença da pessoa e que essas variações dependem ainda da posição da pessoa na sala. Logo, podemos concluir que a detecção passiva da presença é viável a partir de sistemas PLC em ambientes internos.

A comparação entre a potência dos pulsos OFDM medidos por sondas quando a sala está vazia e quando a sala está ocupada indica clara influência do corpo humano nessa potência. As mudanças nos níveis de potência média entre as diferentes sondas e entre as diferentes regiões, não apenas tornam a detecção de presença possível, mas também sugerem a possibilidade de utilizar a mudança no canal PLC para estimar a posição do alvo.

Os testes com múltiplos alvos reforçam a capacidade de detectar o alvo com essa estratégia, isto é, a análise das alterações no espectro do pulso OFDM do sistema PLC. É possível observar que alvos com menor estatura, como Alvo #2, parecem influenciar mais o espectro. Para alvos com biotipos de altura média, como os Alvos #1, #3 e #5 por exemplo, é possível constatar uma regularidade maior na detecção de suas presenças na sala, mesmo com a ocorrência de falhas. Tal relação precisa ser confirmada com mais coletas de dados com alvos diferentes e com biotipos variados. Alvos com estatura maior, como o Alvo #5, parecem acoplar de forma "mais fraca" à rede elétrica e os pulsos PLC, o oposto ocorrido com o Alvo #2, de estatura menor. Os números, por outro lado, sugerem que a altura de um alvo exerce maior influência que sua massa corpórea.

A utilização dos recursos de limiar de decisão e do tratamento referenciado a alvos, se mostrou consistente nas detecções, com resultados coerentes entre si. Contudo, com a utilização de do tratamento referenciado a alvos, os resultados apresentam-se em uma região mais limítrofe, onde alguns se mantiveram constantes mas em outros casos, uma melhora foi observada.

Salientamos que este estudo não almeja fornecer uma forma infalível de detecção. Seu objetivo foi estudar mecanismos iniciais, apresentando técnicas de captura e processamento das características dos pulsos PLC contidos no espectro OFDM, a serem futuramente aperfeiçoadas.

Métodos mais simples, como os de média e comparação, foram satisfatórios nessa análise preliminar de detecção, mas não retornaram resultados consistentes para posicionamento. Aplicar técnicas mais sofisticadas no processamento das capturas parece ser um caminho promissor. Devido ao experimento apresentar-se maior e mais trabalhoso que o esperado e o seu tempo para finalização chegando ao seu limite rapidamente, optou-se pelo adiamento no estudo sobre posicionamento, ficando para a continuidade desse estudo, no futuro.

Pelos motivos aqui citados, o estudo de determinação de posicionamento é promissor com técnicas mais sofisticadas e será visitado em trabalhos futuros. Pretende-se ainda analisar-se como implementar um sistema capaz de prover uma estimativa da posição espacial do alvo usando essa informação.

## REFERÊNCIAS

- [1] LOVISOLO, L.; CRUZ-ROLDÁN, F.; BLANCO-VELASCO, M. On Power Line Positioning System. *Sensors (MDPI)*, n. 22, oct. 2022.
- [2] ZEKAVAT, S. R. et al. An overview on position location: Past, present, future. *International Journal of Wireless Information Networks*, Springer, 2021.
- [3] PATEL, S. N.; TRUONG, K. N.; ABOWD, G. D. Powerline positioning: A practical sub-room-level indoor location system for domestic use. In: SPRINGER. *International Conference on Ubiquitous Computing*. [S.l.], 2006. p. 441–458.
- [4] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. *RF positioning: fundamentals, applications, and tools*. [S.l.]: Artech House, 2015.
- [5] ZEKAVAT, R.; BUEHRER, R. M. *Handbook of position location: theory, practice and advances*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.
- [6] STONE, J.S. *Patent US716134 – Method of determining the direction of space-telegraph signals*. Depositado em 23 de janeiro de 1901. Publicado em 16 de dezembro de 1902. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US716134A/>>. Acesso em: 6 de Janeiro de 2023.
- [7] HUESLMEYER, C. *Wireless transmitting and receiving mechanism for electric waves*. Depositado em 14 de março de 1904. Publicado em 16 de janeiro de 1906. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US810150A/en>>. Acesso em: 6 de Janeiro de 2023.
- [8] SKOLNIKM, M. I. *Radar- History of Radar*. [S.l.], 2018.
- [9] Radar World. *Christian Huelsmeyer, The inventor*. Disponível em: <<https://www.radarworld.org/huelsmeyer.html>>. Acesso em: 6 de Janeiro de 2023.
- [10] CANO, C. et al. State of the art in power line communications: from the applications to the medium. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, IEEE, v. 34, n. 7, p. 1935–1952, 2016.

- [11] ALLIANCE., H. P. *HomePlug AV2 Technology Raising the Bar for Sustained High-Throughput Performance and Interoperability for Multi-stream Networking Using Existing Powerline Wiring in the Home*. [S.l.], 2013.
- [12] BAGEPALLI, A.; ZAMORA, M.; SÁNCHEZ, D. *Autonomous Self-Guiding Wall Charging Robot*. 2005.
- [13] ZHOU, T. et al. E-loc: indoor localization through building electric wiring. In: *Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 311–312.
- [14] ZHOU, T. et al. P-Loc: a device-free indoor localization system utilizing building power-line network. In: *Adjunct Proceedings of the 2019 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 611–615.
- [15] KIEDROWSKI, P. Toward more efficient and more secure last mile smart metering and smart lighting communication systems with the use of PLC/RF hybrid technology. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications, London, England, v. 11, n. 10, p. 675926, 2015.
- [16] DIB, L. de M. et al. Hybrid PLC/wireless communication for smart grids and internet of things applications. *IEEE internet of things Journal*, IEEE, v. 5, n. 2, p. 655–667, 2017.
- [17] DING, W. et al. A hybrid power line and visible light communication system for indoor hospital applications. *Computers in industry*, Elsevier, v. 68, p. 170–178, 2015.
- [18] GHETH, W. et al. Hybrid power-line/wireless communication systems for indoor applications. In: IEEE. *2018 11th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*. [S.l.], 2018. p. 1–6.
- [19] JANI, M.; GARG, P.; GUPTA, A. Performance analysis of a co-operative PLC/VLC system with multiple access points for indoor broadcasting. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Elsevier, v. 103, p. 64–73, 2019.

- [20] NDJIONGUE, A. R. et al. Cascaded PLC-VLC channel using OFDM and CSK techniques. In: IEEE. *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. [S.l.], 2015. p. 1–6.
- [21] LAMPE, L.; TONELLO, A. M.; SWART, T. G. *Power Line Communications: principles, standards and applications from multimedia to smart grid*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.
- [22] GALLI, S.; SCAGLIONE, A.; WANG, Z. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *Proceedings of the IEEE*, n. 6, v. 99, p. 998–1027, jun 2011.
- [23] TSUZUKI, S. et al. A proposal of synchronization beacon systems over power-line for indoor fine-grained localization. In: IEEE. *2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*. [S.l.], 2006. p. 143–148.
- [24] LATCHMAN, H. A. et al. *Homeplug AV and IEEE 1901: a handbook for PLC designers and users*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.
- [25] ADEBISI, B.; HONARY, B. Comparisons of indoor PLC emissions measurement results and regulation standards. In: IEEE. *2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*. [S.l.], 2006. p. 319–324.
- [26] POTISK, L. et al. Electromagnetic compatibility of PLC adapters for in-home/domestic networks. *Journal of Electrical Engineering*, Sciendo, v. 69, n. 1, p. 79–84, 2018.
- [27] MARTHE, E. et al. Indoor radiated emission associated with power line communication systems. In: IEEE. *2001 IEEE EMC International Symposium. Symposium Record. International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Cat. No. 01CH37161)*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 517–520.
- [28] LOPES, P. A.; PINTO, J. M.; GERALD, J. B. Dealing with unknown impedance and impulsive noise in the power-line communications channel. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 28, n. 1, p. 58–66, 2012.

- [29] QIAN, Y. et al. Design of hybrid wireless and power line sensor networks with dual-interface relay in IoT. *IEEE Internet of Things Journal*, IEEE, v. 6, n. 1, p. 239–249, 2017.
- [30] LAI, S. W.; MESSIER, G. G. The wireless/power-line diversity channel. In: IEEE. *2010 IEEE International Conference on Communications*. [S.l.], 2010. p. 1–5.
- [31] ZHU, X.; ZHU, K.; HEGGO, M. *Hybrid Wireless-Power Line Communications for Indoor IoT Networks*. [S.l.]: Artech House, 2020.
- [32] KHAN, L. U. Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges. *Digital Communications and Networks*, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 78–88, 2017.
- [33] POHLMANN, C. Visible light communication. In: *Seminar Kommunikationsstandards in der Medizintechnik*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–14.
- [34] LEE, C. G.; KATZ, M. Visible light communication. *Short-Range Wireless Communications: Emerging Technologies and Applications*, v. 11, 2015.
- [35] MUDRIIEVSKYI, S. Power line communications: state of the art in research, development and application. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, Elsevier, v. 68, n. 7, p. 575–577, 2014.
- [36] LÓPEZ, G. et al. The role of power line communications in the smart grid revisited: Applications, challenges, and research initiatives. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 117346–117368, 2019.
- [37] BECKER, C.; DÜRR, F. On location models for ubiquitous computing. *Personal and Ubiquitous Computing*, Springer, v. 9, n. 1, p. 20–31, 2005.
- [38] MAUTZ, R. *Indoor positioning technologies*. [S.l.]: ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, 2012.
- [39] TARIQ, Z. B. et al. Non-GPS positioning systems: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, ACM New York, NY, USA, v. 50, n. 4, p. 1–34, 2017.

- [40] FERREIRA, A. F. G. G. et al. Localization and positioning systems for emergency responders: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 19, n. 4, p. 2836–2870, 2017.
- [41] ZAFARI, F.; GKELIAS, A.; LEUNG, K. K. A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 2568–2599, 2019.
- [42] CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. RF fingerprinting location techniques. *Handbook of position location: theory, practice, and advances*, Wiley Online Library, p. 487–520, 2011.
- [43] AL-AMMAR, M. A. et al. Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms. In: IEEE. *2014 International Conference on Cyberworlds*. [S.l.], 2014. p. 245–252.
- [44] STUNTEBECK, E. P. et al. Wideband powerline positioning for indoor localization. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Ubiquitous Computing*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 94–103.
- [45] HIGHTOWER J. ; BORRIELLO, G. Location Systems for Ubiquitous Computing. *Computer*, v. 34, n. 8, p. 57–66, Aug 2001.
- [46] SKOLNIK, M. I. *Radar Handbook*. 3rd. ed. New York: McGraw Hill, 2008.
- [47] LIU, H. et al. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, v. 37, n. 6, p. 1067–1080, 2007.
- [48] WECKSTRÖM, M.; SPIRITO, M.; RUUTU, V. Mobile Station Location. In: Timo Halonen and Javier Romero and Juan Melero (Ed.). *GSM, GPRS and EDGE Performance - Evolution towards UMTS*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2003. cap. 4, p. 119–139.
- [49] MAYTON, B.; LEGRAND, L.; SMITH, J. R. Robot, feed thyself: Plugging in to unmodified electrical outlets by sensing emitted ac electric fields. In: *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 715–722.

- [50] MOORE, J. Powerline Perching with a Fixed-Wing UAV. In: *AIAA Infotech at Aerospace Conferece*. Rhodes, Greece: [s.n.], 2009.
- [51] LU, C. et al. Simultaneous localization and mapping with power network electromagnetic field. In: *In Proceedings of the 24th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New Delhi, India.: [s.n.], 2018. p. p.607–622.
- [52] GOTZ, M.; RAPP, M.; DOSTERT, K. Power line channel characteristics and their effect on communication system design. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 42, n. 4, p. 78–86, 2004.
- [53] SANCHA, S. et al. A channel simulator for indoor power-line communications. In: IEEE. *2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications*. [S.l.], 2007. p. 104–109.
- [54] CAÑETE, F. J. et al. A channel model proposal for indoor power line communications. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 49, n. 12, p. 166–174, 2011.
- [55] BIGLIERI, E. Coding and modulation for a horrible channel. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 41, n. 5, p. 92–98, 2003.
- [56] IEEE Standards Association and others. *IEEE Std 1901: IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications*. 2010.
- [57] IEEE Standards Association and others. *IEEE Std 1901.1: IEEE Standard for Medium Frequency (less than 12 MHz) Power Line Communications for Smart Grid Applications*. 2018.
- [58] IEEE Standards Association and others. *IEEE Std 1901.2: IEEE Standard for Low-Frequency (less than 500 kHz) Narrowband Power Line Communications for Smart Grid Applications*. 2013.
- [59] SECTOR, S. G. T. S. I. T. S.; MEDIA, D. S.; NETWORKS. *ITU-T G.9960: Access networks – In premises networks Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – System architecture and physical layer specification*. 2010.
- [60] Wi-SUN Alliance. *HomePlug AV Specification Version 2.1*. 2014.

- [61] YONGE, L. et al. An overview of the homeplug av2 technology. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, v. 2013, n. 892628, p. 1–20, 2013.
- [62] iPerf. *Site*. Disponível em: <<https://iperf.fr/>>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.
- [63] Mini-Circuits. *Site*. Disponível em: <<https://www.minicircuits.com/WebStore/dashboard.html?model=TC1-1T%2B>>. Acesso em: 8 de Junho de 2023.
- [64] Sparkfun. *Site Aduino Pro Micro*. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/pro-micro-fio-v3-hookup-guide/all>>. Acesso em: 10 de Março de 2023.
- [65] CARNEIRO, T.; LOVISOLO, L.; TCHEOU, M. P. Um estudo preliminar sobre detecção de pessoas a partir de power-line communication. In: *XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2024)*. Belém, PA: [s.n.], 2024.
- [66] das Chagas, A. O. S.; LOVISOLO, L.; TCHEOU, M. P. Detecção de risco de queda no ambiente hospitalar a partir da informação do estado do canal sem-fio. In: *SBIC. Brazilian Congress on Computational Intelligence (CBIC)*. [S.l.], 2021.