

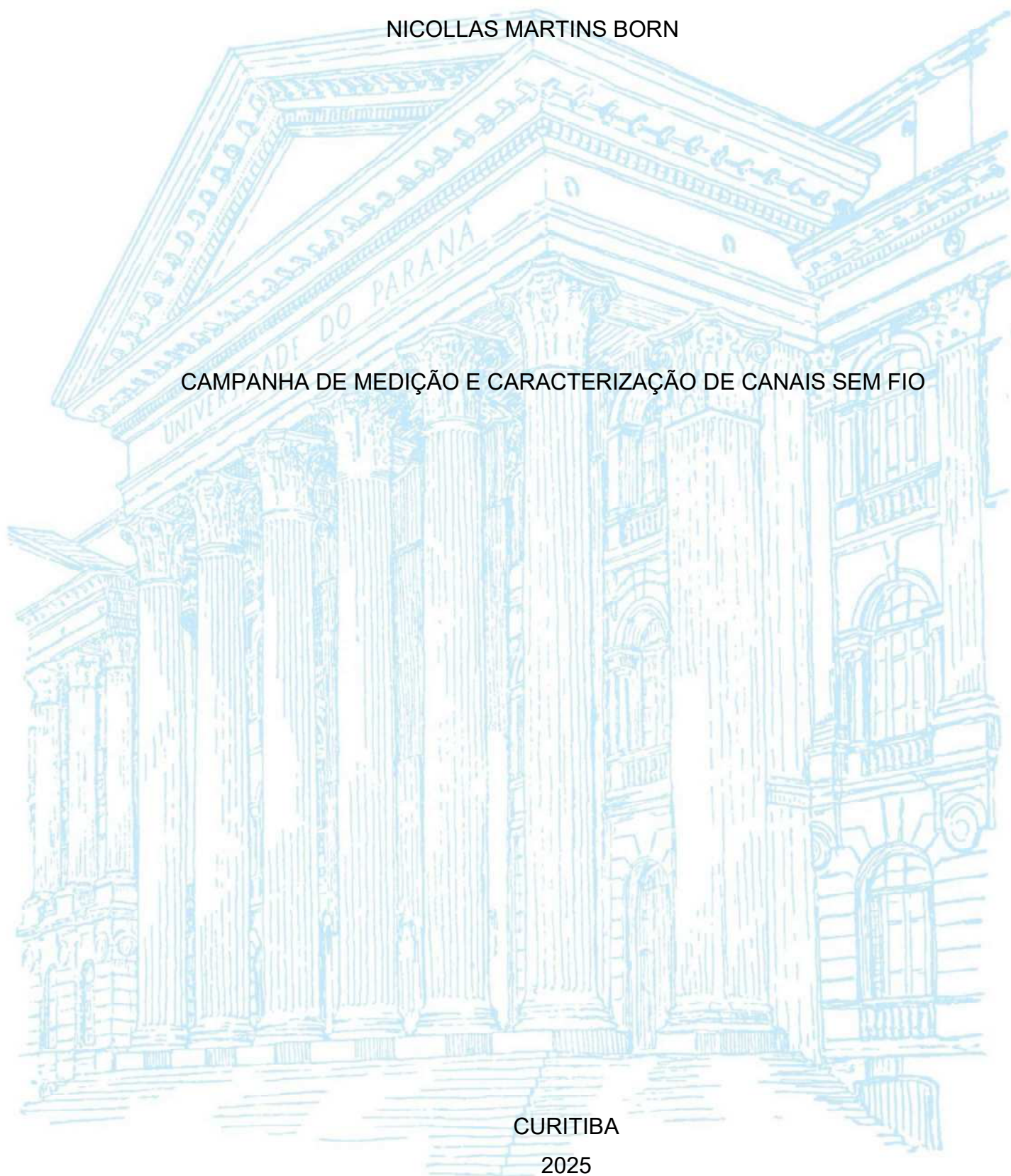
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NICOLLAS MARTINS BORN

CAMPANHA DE MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS SEM FIO

CURITIBA

2025



Nicollas Martins Born

CAMPANHA DE MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS SEM FIO

TCC apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica Enf. Sistemas Embarcados, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Ândrei Camponogara

CURITIBA

2025

TERMO DE APROVAÇÃO

NICOLLAS MARTINS BORN

CAMPANHA DE MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE CANAIS SEM FIO

TCC apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Elétrica Enf. Sistemas Embarcados, Setor de tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Ândrei Camponogara

Orientador – Departamento Engenharia Elétrica, UFPR

Profa. Dra. Ana Flávia dos Reis

Avaliadora – Departamento Engenharia Elétrica, UFPR

Msc. Mariani Sfredo da Luz

Avaliadora – Departamento Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 03 de julho de 2025.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo caracterizar a propagação do sinal Wi-Fi em ambientes internos utilizando estimativas de CSI obtidas por meio de uma campanha de medição com microcontroladores ESP32. As medições foram realizadas em cenários LOS e NLOS, em três frequências na banda de 2,4 GHz. Foram analisados os parâmetros de ganho médio do canal, RMS-DS, banda de coerência, densidade PSD e capacidade do canal. Os resultados demonstram que o cenário NLOS apresenta maior atenuação e dispersão temporal, com menor banda de coerência. Entretanto, observa-se que, em determinadas condições, o NLOS pode apresentar capacidade de canal ligeiramente superior, o que foi atribuído a efeitos de reflexão construtiva. O uso do microcontrolador ESP32 mostra-se eficaz para coleta de CSI, validando seu emprego como ferramenta de baixo custo para avaliação de canais sem fio.

Palavras-chave: Wi-Fi; Channel State Information; ESP32; Qualidade do Sinal; Redes Sem Fio.

ABSTRACT

This work aims to characterize Wi-Fi signal propagation in indoor environments using CSI estimates obtained through a measurement campaign with ESP32 microcontrollers. The measurements are conducted in LOS and NLOS scenarios across three frequencies within the 2.4 GHz band. The analyzed parameters included average channel gain, RMS-DS, coherence bandwidth, PSD density, and channel capacity. The results shows that the NLOS scenario presents greater attenuation and temporal dispersion, with reduced coherence bandwidth. However, it is observed that, under certain conditions, the NLOS scenario could exhibit slightly higher channel capacity, attributed to constructive reflection effects. The use of the ESP32 microcontroller proved effective for CSI acquisition, validating its use as a low-cost tool for wireless channel assessment.

Keywords: Wi-Fi; Channel State Information; ESP32; Signal Quality; Wireless Networks.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Diagrama de blocos que representa o arranjo de medição	16
FIGURA 2 - Componentes do Arranjo de Medição	18
FIGURA 3 - Menu de Configuração ESP-32	20
FIGURA 4 - Exemplo Seleção Menu ESP-32.....	21
FIGURA 5 - Exemplo de Seleção Numérica Menu ESP-32	21
FIGURA 6 – Esboço ambiente residencial onde foi realizada a campanha de medição	25
FIGURA 7 – Magnitude da resposta em frequência do canal sem fio para cenários LOS e NLOS	27
FIGURA 8 - Comparação Cenário LOS e NLOS para CFR	28
FIGURA 9 - Comparação Cenário LOS e NLOS para CFR	34

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Estatísticas do Ganho Médio do Canal (dB) por Cenário	36
TABELA 2 - Estatísticas do RMS Delay Spread (μ s) por Cenário.....	37
TABELA 3 - Estatísticas da PSD (dBm/Hz) por Cenário	39
TABELA 4 - Banda de coerência para $\beta = 0,9$ E $\beta = 0,5$	41
TABELA 5 - Capacidade	41

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CFR	resposta em frequência do canal (do inglês, <i>channel frequency response</i>)
CSI	informação do estado do canal (do inglês, <i>channel state information</i>)
DFT	transformada de Fourier discreta (do inglês, <i>discrete Fourier transform</i>)
ESP-IDF	do inglês, <i>espressif IoT development framework</i>
IoT	internet das coisas (do inglês, <i>internet of things</i>)
LOS	linha de visada direta (do inglês, <i>line-of-sight</i>)
LTF	campo de treinamento longo (do inglês, <i>long training field</i>)
NLOS	sem linha de visada direta (do inglês, <i>non-line of sight</i>)
OFDM	multiplexação por divisão de frequência ortogonal (do inglês, <i>orthogonal frequency-division multiplexing</i>)
PCAP	arquivo de captura de pacotes (do inglês, <i>packet capture file</i>)
PSD	densidade espectral de potência (do inglês, <i>power spectral density</i>)
RMS-DS	espalhamento de atraso médio quadrático (do inglês, <i>root-mean square-delay spread</i>)
SNR	relação sinal-ruído (do inglês, <i>signal-to-noise ratio</i>)
STF	campo de treinamento curto (do inglês, <i>short training field</i>)
UART	transmissor-receptor assíncrono universal (do inglês, <i>universal asynchronous receiver-transmitter</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	17
2 ARRANJO E CAMPANHA DE MEDIÇÃO.....	16
2.1 ARRANJO DE MEDIÇÃO.....	16
2.2 AQUISIÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO CANAL SEM FIO.....	18
2.3 CAMPANHA DE MEDIÇÃO	25
3 ANÁLISE DOS DADOS	29
3.1 GANHO MÉDIO DO CANAL	29
3.2 RAIZ QUADRADA DO ESPALHAMENTO DO ATRASO MÉDIO	30
3.3 BANDA DE COERÊNCIA.....	31
3.4 CAPACIDADE DE CANAL	32
4 RESULTADOS NUMÉRICOS.....	33
4.1 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO CANAL.....	33
4.2 RAIZ QUADRADA DO ESPALHAMENTO DO ATRASO MÉDIO	37
4.3 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA.....	39
4.4 BANDA DE COERÊNCIA.....	40
4.5 CAPACIDADE	41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia e inovações decorrente da constante busca por melhores desempenhos econômicos levou a uma crescente demanda por dispositivos com conectividade sem fio em ambientes residenciais, comerciais e industriais, cada um com seu foco, o que intensificou o uso de redes Wi-Fi como principal meio de distância entre os dispositivos, podendo interferir significativamente na experiência do usuário e na precisão da aplicação, impactando diretamente a estabilidade da conexão, o que afeta negativamente o desempenho de aplicações que exigem comunicação confiável, como sistemas de automação, dispositivos IoT e serviços de transmissão em tempo real.

Neste contexto, surge a demanda de realizar estudos que aprofundem a compreensão dos fenômenos que afetam a propagação do sinal Wi-Fi. Para combater os efeitos do meio de comunicação sobre o sinal de transmissão em um sistema de comunicação sem fio, dispositivos transmissores e/ou receptores fazem o uso de estimativas de resposta em frequência do canal (do inglês, *channel frequency response*, CFR).

Com o objetivo de investigar o comportamento do canal sem fio em um ambiente residencial, neste trabalho, propõem-se a realização de uma campanha de medição para coletar estimativas da CFR sem fio e densidade espectral de potência (do inglês, *power spectral density*, PSD) do ruído aditivo em um ambiente residencial através do uso de microcontroladores ESP32. Para tanto, adota-se três faixas de frequências distintas em torno da frequência de portadora de 2,4 GHz e cenários com linha de visada direta (do inglês, *line of sight*, LOS) e sem linha de visada direta (do inglês, *non line of sight*, NLOS) entre transmissor e receptor.

Além disso, propõem-se a caracterização do banco de dados obtido na campanha de medição por meio do uso de parâmetros como: ganho médio do canal, espalhamento médio de atraso (do inglês, *root-mean-square delay spread*, RMS-DS), banda de coerência e capacidade do canal. Tais parâmetros são escolhidas por sua relevância na avaliação do desempenho de canais sem fio e na identificação de efeitos de dispersão temporal e seletividade em frequência.

1.1 OBJETIVOS

Neste trabalho, objetiva-se realizar uma campanha de medição em ambiente residencial, com o uso de microcontroladores ESP32, visando à coleta de estimativas da CFR sem fio em diferentes condições de visada e distâncias, além da PSD do ruído aditivo. A partir dos dados obtidos, propõe-se a caracterização do banco de dados obtido em termos de ganho médio do canal, RMS-DS, banda de coerência e capacidade.

Os objetivos específicos deste trabalho são apresentados a seguir:

- Projetar e implementar um arranjo de medição de estimativas de CFR sem fio utilizando microcontroladores ESP32 como transmissor e receptor de sinal.
- Realizar uma campanha de medição em ambientes residenciais considerando os cenários LOS e NLOS, e três faixas distintas de frequência com largura de banda de 40 MHz e frequências centrais de 2,412 GHz, 2,437 GHz e 2,462 GHz.
- Caracterizar o banco de dados composto pelas estimativas de CFR sem fio e medidas de PSD de ruído aditivo em termos do ganho médio do canal, da banda de coerência, do RMS-DS e da capacidade.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O restante deste documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Descreve-se o arranjo de medição, detalhando os equipamentos utilizados, os códigos embarcados nos microcontroladores ESP32 e a metodologia adotada para a coleta das CFRs sem fio. Também se detalha a campanha de medição.
- Capítulo 3: Define-se dos parâmetros extraídos a partir das estimativas de CFR sem fio, incluindo ganho médio do canal, RMS-DS, banda de coerência e capacidade do canal.
- Capítulo 4: Apresenta-se os resultados obtidos a partir dos dados coletados, com análise comparativa entre os cenários, representações gráficas e tabelas que evidenciam o comportamento do canal em diferentes condições.

- Capítulo 5: Expõe-se as principais conclusões do trabalho, destacando os achados mais relevantes, as limitações da metodologia e propostas de continuidade da pesquisa em estudos futuros.

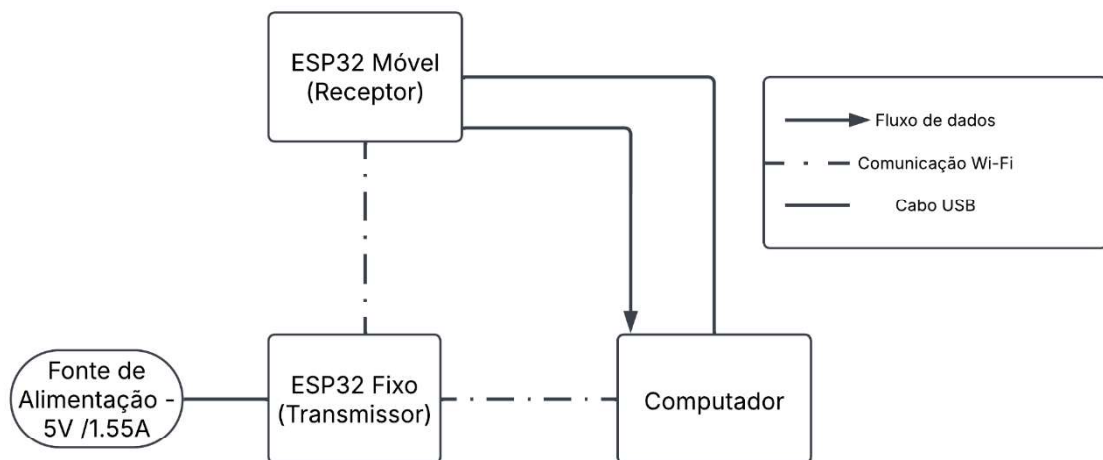
2 ARRANJO E CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Neste capítulo, é apresentado o arranjo de medição utilizado em uma campanha de medição com o intuito de obter estimativas de CFR sem fio em três faixas de frequências largura de banda de 40 MHz cada e cujas frequências centrais são, respectivamente, 2,412 GHz, 2,437GHz e 2,462 GHz. Além disso, a campanha de medição é detalhada, de forma a apresentar o banco de dados obtido e os cenários considerados para medição.

O restante deste capítulo está organizado da seguinte forma: na SEÇÃO 2.1, detalha-se o arranjo de medição utilizado para obter as estimativas de CFR sem fio, bem como o procedimento de medição adotado; e, por fim, na SEÇÃO 2.2, descreve-se a campanha de medição.

2.1 ARRANJO DE MEDIÇÃO

FIGURA 1 - Diagrama de blocos que representa o arranjo de medição



FONTE: Acervo pessoal (2025)

Na FIGURA 1, é apresentado um diagrama de blocos que ilustra o arranjo de medição considerado neste trabalho para estimar as CFRs sem fio. O arranjo de medição é formado pelos seguintes componentes:

- Microcontrolador ESP32 (FIGURA 2(a)): Desenvolvido pela Espressif Systems e amplamente utilizado em aplicações de IoT, automações e comunicação sem fio. Possui um processador dual-core Tensilica LX6 que opera com até 240 MHz e contém a conectividade Wi-Fi e Bluetooth, com baixo consumo energético. Entre suas principais características, destacam-se: sua conectividade compatível com Wi-Fi 802.11 b/g/n e Bluetooth 4.2; baixo consumo de energia possuindo modos de economia de energia avançados, ideais para aplicações embarcada; contém memória de até 520 KB de SRAM e suporte para armazenamento externo via Flash SPI (ESPRESSIF SYSTEMS, 2024)
- Fonte de alimentação (FIGURA 2(b)): Adaptador Samsung EP-TA50BRL utilizado para garantir a alimentação contínua de um do microcontrolador ESP32 transmissor. Esse carregador fornece pode fornecer uma tensão de 5 V e uma corrente máxima de 1,55 A, sendo adequado para fornecer energia estável ao microcontrolador ESP32 durante todo o experimento.
- Computador portátil (FIGURA 2(c)): É utilizado para realizar a configuração, programação e coleta de dados dos microcontroladores ESP32. A comunicação entre o computador e os microcontroladores ESP32 receptor e transmissor é feita por meio de conexão física, através de um cabo USB (do inglês, *universal serial bus*), e sem fio, respectivamente.
- Cabos USB (FIGURA 2(d)): São utilizados para o fornecimento de energia elétrica do microcontrolador ESP32 através do uso do adaptador Samsung conectado a rede de energia elétrica e para a realizar a comunicação entre o computador portátil e o microcontrolador ESP32.

FIGURA 2 - Componentes do Arranjo de Medição



(a) Microcontrolador ESP32



(b) Adaptador



(c) Computador portátil



(d) Cabos USB

FONTE: Acervo pessoal (2025)

2.2 AQUISIÇÃO DAS ESTIMATIVAS DO CANAL SEM FIO

O ponto de partida da etapa prática consistiu na instalação do ambiente de desenvolvimento ESP-IDF (*Espressif IoT Development Framework*), na versão 4.3.7, compatível com o projeto. Em seguida, foram realizadas as configurações necessárias para que ambos os módulos ESP32 operassem de forma sincronizada, utilizando a mesma taxa de transmissão e recepção de dados, dentro da mesma banda base.

Para isto ocorrer, os microcontroladores ESP-32 foram conectados ao computador, um de cada vez, e através do *prompt* de comando do Windows iniciou-se a sua configuração.

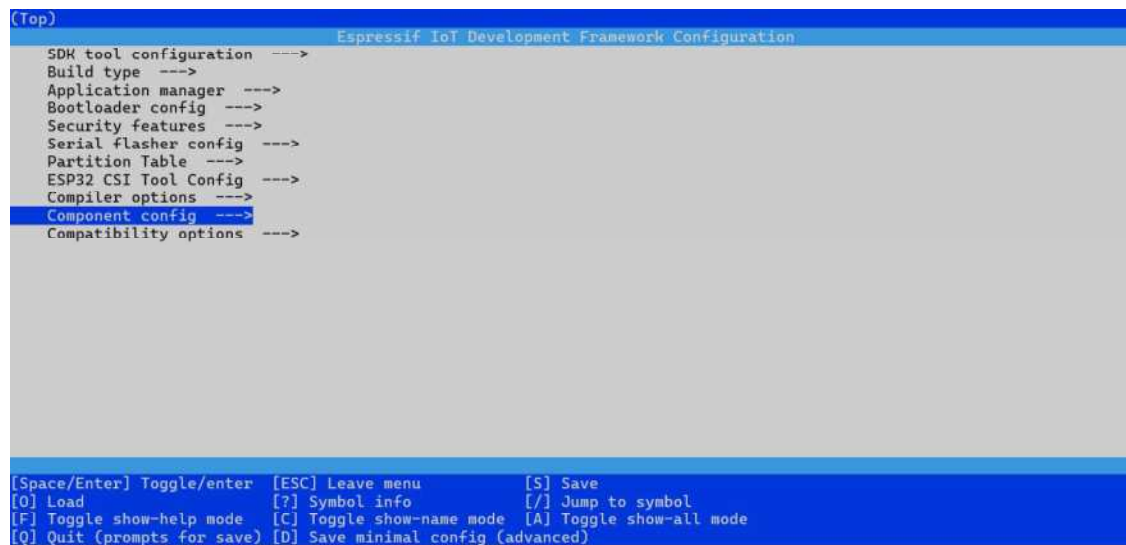
Primeiramente foi necessário mudar o diretório no *prompt* de comando para onde os arquivos de instalação do microcontrolador ESP-32 estão armazenados e assim iniciar a instalação do ambiente virtual que permitiria ao sistema reconhecer o dispositivo e os comandos para que ações fossem realizadas, através do prefixo “idf.py”, onde depois dele se indica a ação que irá ser realizada, como entrar no modo monitor para verificar as informações que estão chegando ou saindo do ESP-32, ou menu para poder mexer nos parâmetros internos do ESP.

Para a instalação deste ambiente virtual é necessário utilizar o comando “install.bat esp32”. Toda vez que o *prompt* de comando for fechado o comando “export.bat” deverá ser executado no diretório onde estão os arquivos de instalação do microcontrolador ESP-32 para que o sistema volte a reconhecer os parâmetros de configuração.

Com o ambiente funcionando, conectasse um dos microcontroladores ESP-32 ao computador. É de extrema importância determinar uma porta USB específica para cada microcontrolador ESP-32, pois isto faz diferença para saber quem é o transmissor e o receptor. Então alterasse o diretório no *prompt* de comando para a pasta onde estão os arquivos que determinaram quem será o emissor ou o receptor, e utiliza-se o comando `idf.py build` para que os arquivos já prontos possam operar no microcontrolador ESP-32 designado.

Assim é possível utilizar o comando “idf.py menuconfig” no *prompt* de comando, abrindo assim o menu visto na FIGURA 3, onde serão configurados os parâmetros a serem adotados pelo microcontrolador ESP-32, onde se deverá configurar os mesmos parâmetros para os dois dispositivos ESP-32, primeiro para o já conectado, depois repetindo os passos voltando na parte onde se conecta o ESP-32, conectando o outro ESP-32 e desconectando o primeiro. Sempre que precisar entrar em um item usa-se a tecla “enter” ou “espaço”. Essas teclas também irão habilitar ou desabilitar funções e abrir a possibilidade de digitar parâmetros caso seja necessário.

FIGURA 3 - Menu de Configuração ESP-32

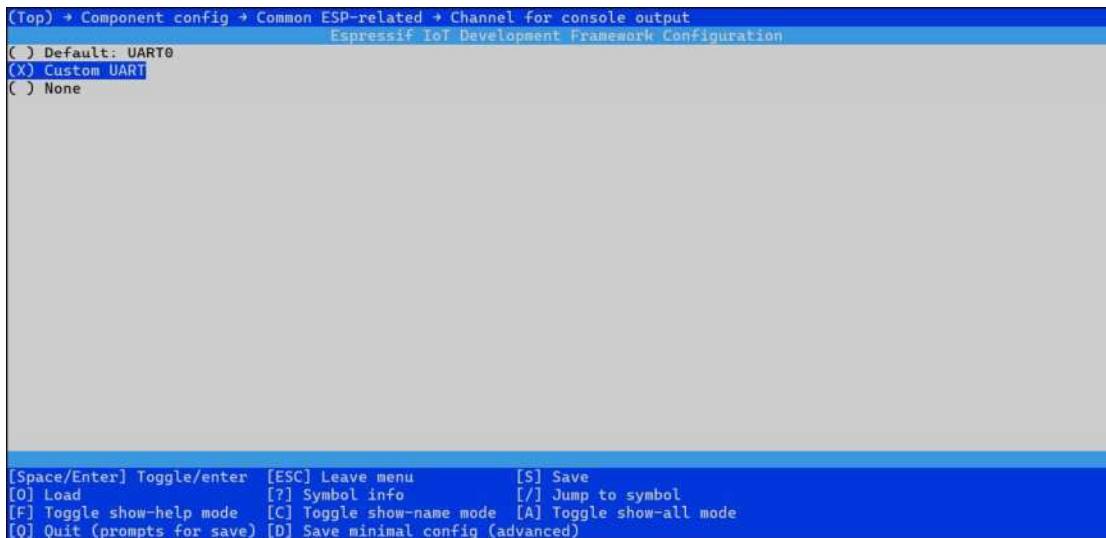


FONTE: Acervo pessoal (2025)

Os parâmetros configurados em ambos os microcontroladores ESP-32 foram definidos conforme as seguintes especificações: No *Serial flasher config* tem-se a opção de mudar o *Baud rate* do monitor, o definindo como *Custom Baud Rate* (taxa personalizada). Após podemos definir um valor para *Custom baud rate value*, que no documento de referência é recomendado utilizar 921600 bps; Com isso, volta-se ao menu principal, ilustrado na FIGURA 3, onde se faz necessário entrar no *Component config*, que inclusive está destacado na FIGURA 3, e se avança nas opções *Common ESP32-related*, *Channel for console output*, *Custom UART* em sequência para selecionarmos a UART customizável, podemos ver a seleção sendo feita na FIGURA 4. Com isso voltamos ao *Channel for console output* para definir o *UART console baud rate* para 921600bps.

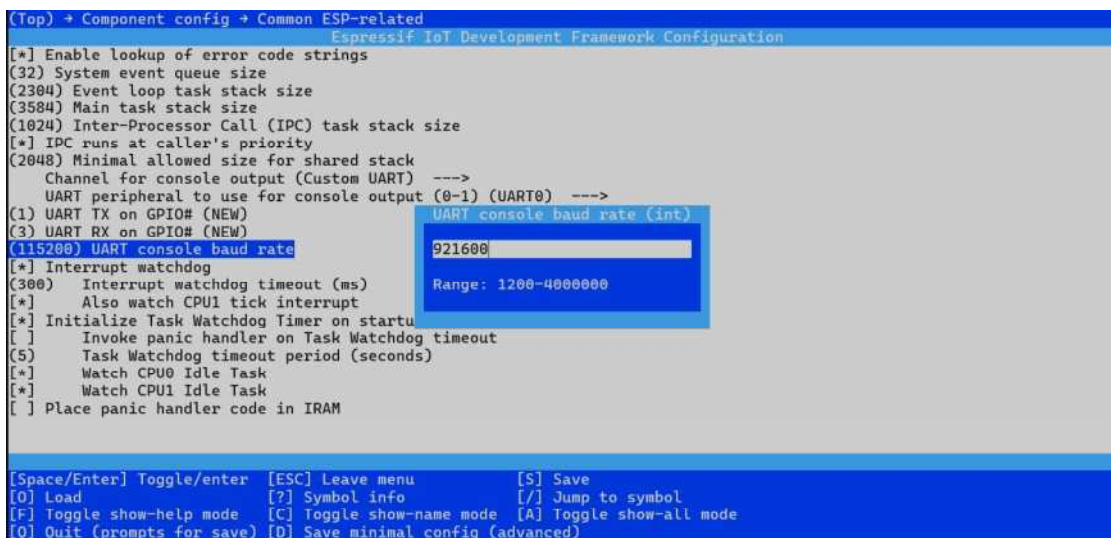
Agora pode-se voltar ao menu *Component config* e seguimos a ordem de avanço do menu *Component config*, Wi-Fi, WiFi CSI onde se habilita as operações com dados CSI. Por fim volta-se novamente para o *Component config* e se avança até o menu de Tick rate para o alterar para 1000, conforme: *Component config*, *FreeRTOS*, *Tick rate (Hz)* e colocamos 1000.

FIGURA 4 - Exemplo Seleção Menu ESP-32



FONTE: Acervo pessoal (2025)

FIGURA 5 - Exemplo de Seleção Numérica Menu ESP-32



FONTE: Acervo pessoal (2025)

A respeito dos parâmetros configurados, o *baud rate* elevado de 921600 bps foi selecionado para garantir comunicação serial rápida e estável, essencial para aplicações com restrições de latência (ESPRESSIF SYSTEMS, 2023).

A ativação do Wi-Fi CSI permite a obtenção das estimativas de CFR, fator essencial para desenvolvimento deste trabalho de propagação de sinal em sistemas de internos. A taxa de *FreeRTOS* em 1000 Hz proporciona melhor granularidade no escalonamento de tarefas críticas.

O experimento foi realizado utilizando dois microcontroladores ESP-32 programados com funções complementares, o primeiro dispositivo foi configurado como unidade passiva, mantida fixo conectado na tomada durante as aquisições, enquanto o segundo foi posicionado em diversos pontos no ambiente residencial para permitir a coleta de dados em diferentes distâncias entre o transmissor e o receptor. Essa abordagem permitiu criar um banco de dados robusto, com variações de frequência e distâncias para as análises nos cenários LOS e NLOS.

Para a aquisição das estimativas de CFR, adotou-se como base um conjunto de ferramentas de código aberto desenvolvido por Hernandez (2020) e disponibilizado na plataforma GitHub. O sistema compreende dois arquivos principais, o arquivo *active_ap.c*, que configura o ESP32 como receptor ativo operando em modo monitor, e o *passive_sta.c*, que implementa o transmissor passivo responsável pelo envio contínuo de pacotes de referência no padrão 802.11n.

Depois de configurados, no *prompt* de comando é necessário dar o comando `idf.py -p PORT [-b BAUD] flash`, substituindo em PORT o número da porta do microcontrolador ESP-32 que ficará ligado ao computador, no caso deste experimento foi a porta 6. Assim inicia-se a coleta de dados, até o momento que o usuário interromper o processo com o comando CTRL+C, onde já está programado para salvar os dados em uma planilha no formato .csv.

Nos sistemas sem fio baseados no padrão IEEE 802.11, o esquema de transmissão empregado é o de multiplexação por divisão ortogonal de frequência (do inglês, *orthogonal frequency-division multiplexing*, OFDM), que é uma técnica de modulação multiportadora utilizada em comunicações digitais modernas, incluindo as redes IEEE 802.11 a/b/g/n/ac (GOLDSMITH, 2005; RAPPAPORT, 2002). O princípio do OFDM consiste em dividir a largura de banda total do canal em N subportadoras ortogonais, transmitindo dados de forma paralela nessas subportadoras, o que proporciona maior imunidade contra desvanecimento seletivo em frequência e interferências interportadora (MOLISCH, 2011).

Em busca de viabilizar a coleta de dados do canal no receptor, o padrão IEEE 802.11 especifica a utilização de preâmbulos padronizados, que são transmitidos no início de cada quadro. Tais preâmbulos são compostos por campos conhecidos como *short training field* (STF) e *long training field* (LTF), os quais são utilizados por algoritmos específicos no intuito de realizar as seguintes funções: estimação do desvio

de frequência e fase de portadora; estimativa da CFR; sincronização de símbolos e estimação do desvio de frequência de amostragem (IEEE Std 802.11-2016).

Para o caso da extração de CSI pela ferramenta adotada, ESP32-CSI Tool (HERNÁNDEZ, 2021), o microcontrolador ESP-32 ignora o *payload* dos quadros de dados e processa exclusivamente o campo LTF do preâmbulo para computar a CFR do canal.

Considerando um símbolo OFDM de comprimento N , no domínio da frequência, o vetor transmitido pode ser representado por

$$\mathbf{X} = [X_0 \quad X_1 \quad \dots \quad X_{N-1}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1},$$

sendo X_k o símbolo complexo modulado na subportadora k . Durante o preâmbulo, o bloco de símbolos $\mathbf{X}$ é conhecido no receptor. A propagação no canal sem fio altera os k -ésimos símbolos de $\mathbf{X}$ segundo a CFR, cuja representação vetorial é

$$\mathbf{H} = [H_0 \quad H_1 \quad \dots \quad H_{N-1}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}.$$

O canal pode ser representado por uma matriz diagonal expressa como

$$\Delta_H = \text{diag}(H_0, H_1, \dots, H_{N-1}) \in \mathbb{C}^{N \times N}.$$

Logo, a representação vetorial do bloco de símbolos recebido $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ no receptor é dada por

$$\mathbf{Y} = \Delta_H \mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (1)$$

em que $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ representa o ruído aditivo branco complexo. Como o receptor conhece o vetor $\mathbf{X}$ (devido ao preâmbulo LTF), considerando que

$$\Delta_X = \text{diag}(X_0, X_1, \dots, X_{N-1}),$$

é possível calcular a estimativa de CFR pela expressão

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{H}} &= \Delta_X^{-1} \mathbf{Y} \\ &= \Delta_X^{-1} (\Delta_H \mathbf{X} + \mathbf{V}) \\ &= \mathbf{H} + \Delta_X^{-1} \mathbf{V} \end{aligned} \quad (2)$$

Antes de apresentar os resultados obtidos na campanha de medição, é importante reforçar que todo o processo de configuração do ambiente experimental, a preparação dos microcontroladores ESP32 e o detalhamento do arranjo de medição foram fundamentados com base em literatura consolidada e cuidadosamente implementados para garantir a confiabilidade dos dados coletados.

Assim, com o ambiente devidamente preparado e os dispositivos operando conforme o planejado, foi possível dar início à campanha de medição, descrita a seguir, a qual buscou explorar as variações dos parâmetros do canal em diferentes condições de propagação, nos cenários LOS e NLOS, e em distintas distâncias entre transmissor e receptor.

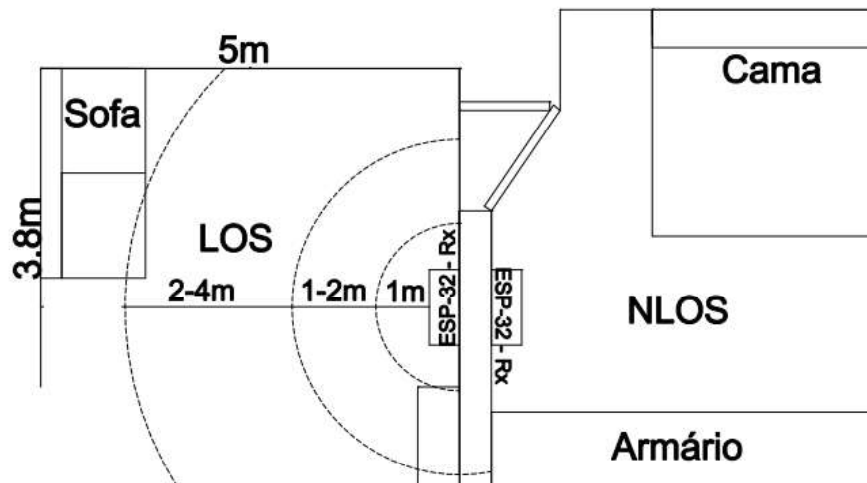
A campanha de medição é realizada através do arranjo de medição mostrado na FIGURA 1 e conforme os seguintes passos:

1. Configuração dos microcontroladores ESP32 (transmissor e receptor) por meio da ferramenta ESP-IDF v4.3.7, com os firmwares fornecidos no repositório ESP32-CSI-Tool.
2. Posicionamento do transmissor em uma posição fixa, enquanto o receptor, juntamente com o computador portátil, é posicionado a uma distância específica d_0 do transmissor.
3. Envio de comando pelo computador ao transmissor para enviar preâmbulos consecutivos e ao receptor realizar as estimações de CFR sem fio sucessivas, através do modo monitor, armazenando-as em arquivos .pcap, que posteriormente são convertidos para .csv utilizando os scripts Python do repositório.
4. Reposicionamento do receptor considerando a distância d_0 , e repetição do passo 3. Esse passo é repetido algumas vezes no intuito de obter diferentes estimativas da CFR sem fio.
5. Escolhe-se uma nova distância d_i do receptor em relação ao transmissor e repete-se o passo 3 e, em seguida, o passo 4.
6. Repete-se o passo 5 até se ter obtido um número suficiente de estimativas da CFR que possam representar o meio de comunicação sem fio no ambiente considerado.

2.3 CAMPANHA DE MEDIÇÃO

A campanha de medição foi realizada em uma casa de 120 m², cujo esboço do espaço físico é mostrado na FIGURA 6, onde se optou por mostrar os cômodos que foram utilizados na campanha, considerando dois cenários de medição: (i) com linha de visada (LOS) entre o transmissor e o receptor, e (ii) sem linha de visada (NLOS) entre o transmissor e o receptor. Além disso, conforme ilustrado na FIGURA 6, para o cenário LOS, considerou-se as distâncias $d_{LOS} \in \{0,1,2,4\}$ m entre o transmissor e o receptor, e para o cenário NLOS, considerou-se as distâncias $d_{NLOS} \in \{0,1,2,4\}$ m entre transmissor e receptor.

FIGURA 6 – Esboço ambiente residencial onde foi realizada a campanha de medição



FONTE: Acervo pessoal (2025)

No local onde o microcontrolador ESP32 (receptor, Rx) está localizado na FIGURA 6, é o local que no espaço físico possui tomadas na casa para ele pudesse ficar fixo e estável em um local estratégico para uma boa campanha de medição. As distâncias pontilhadas demonstram as distâncias de medição entre o transmissor e o receptor. As quais são definidas para ter dados estatísticos da situação, e onde se moveu o microcontrolador ESP32 (transmissor).

O microcontrolador ESP32, por meio do protocolo WiFi, permite a escolha de até 12 faixas de frequências distintas em torno da portadora de 2,4 GHz. Para este trabalho, adotou-se três faixas de frequência com largura de 40 MHz e cujas frequências centrais são: 2,412 GHz (FB1), 2,437 GHz (FB2) e 2,462 GHz (FB3).

Como resultado da campanha de medição, obteve-se um total de 114 estimativas de CFRs para os cenários LOS e NLOS, respectivamente. Especificamente, para cada faixa de frequência obteve-se 38 estimativas de CFR. Além disso, para cada faixa de frequências, coletou-se uma medida da PSD do ruído aditivo.

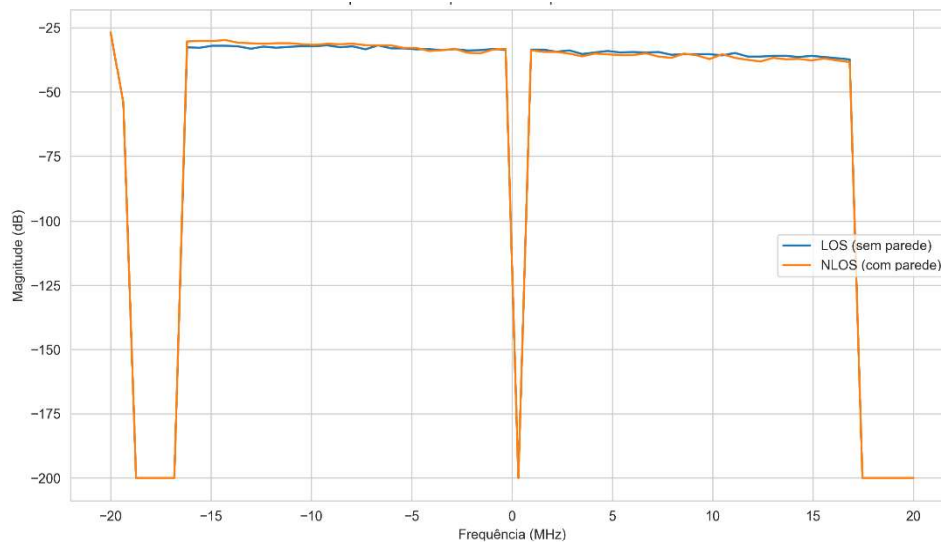
Na FIGURA 7, é apresentado a magnitude de duas estimativas da CFR sem fio obtidas na campanha de medição nos cenários LOS e NLOS considerado a faixa de frequências FB2. Observando a figura, nota-se que há nulos espectrais localizados no início, no centro e no final do espectro. Esses nulos correspondem às subportadoras que não carregam dados, conforme definido no padrão Wi-Fi (baseado em OFDM). Elas são intencionalmente deixadas em silêncio para atender a requisitos de proteção contra interferência intercanal e sincronização de frequência, contribuindo para a robustez da transmissão e a redução de sobreposição entre canais adjacentes.

Indo assim da subportadora -28 a -1 e da +1 até a 28, isso para a banda de frequência foi escolhida em 20MHz. A subportadora do centro, que tem índice 0, também não carrega dados, além disso é desativada para evitar o ruído DC, o qual é gerado pela interferência dos offsets de hardware e para evitar a auto interferência, pois o componente DC pode corromper a demodulação dos dados nas subportadoras vizinhas.

Na teoria a potência se aproxima de $-\infty$ dB no índice 0, onde aparece um grande vale, pois o microcontrolador ESP-32 apenas zera esse valor antes de enviar os dados CSI, fazendo assim para o começo e final, assim respeitando o padrão Wi-Fi e atendendo uma captação esperada de dados. Isto é um indício de que a obtenção dos dados está correta.

No começo dos gráficos tem um ganho elevado que pode estar sendo causado pelo ESP estar aplicando um *boost* nas subportadoras iniciais para tentar compensar possíveis perdas de frequências, ou como resquício da transformada de Fourier que é usada para estimar o Canal.

FIGURA 7 – Magnitude da resposta em frequência do canal sem fio para cenários LOS e NLOS



FONTE: Acervo pessoal (2025)

Na FIGURA 8, é apresentada uma comparação entre a magnitude da resposta em frequência do canal sem fio para os cenários LOS e NLOS. Nota-se que o cenário LOS apresenta linhas mais uniforme e com maior magnitude média em relação ao NLOS, indicando menor atenuação e menor seletividade em frequência. No cenário NLOS, há uma maior variabilidade na magnitude entre subportadoras, evidenciando os efeitos da dispersão espectral e da interferência entre múltiplos caminhos causados por obstáculos físicos no ambiente. Este comportamento está em conformidade com a teoria da propagação em ambientes internos, onde a ausência de linha de visada direta resulta em desvanecimentos seletivos mais intensos e maior complexidade no padrão espectral do canal.

Em análise é possível notar que valores de amplitude no cenário LOS são ligeiramente superiores aos observados em NLOS, o que nos indica uma menor atenuação do sinal quando não há obstáculos físicos entre transmissor e receptor.

Além disso, para ilustrar a variabilidade das amplitudes, fez-se um contorno sombreado ao redor das curvas, representando o intervalo entre os percentis 10 e 90 das amostras em cada subportadora. Essa abordagem permite visualizar a dispersão das medidas, o que auxilia na análise visual, principalmente no cenário NLOS, onde há maior variação estatística.

Esses efeitos tendem a degradar a coerência do canal e aumentam a instabilidade das medições. Analisando a figura, está exemplificado que em NLOS existe uma maior atenuação do sinal, podendo ser vista nos valores mais baixos de magnitude da CFR em comparação ao cenário LOS.

FIGURA 8 - Comparação Cenário LOS e NLOS para CFR



FONTE: Acervo pessoal (2025)

3 ANÁLISE DOS DADOS

Neste capítulo, são apresentados os parâmetros adotados para a caracterização do banco de dados composto pelas estimativas de CFR sem fio e PSD do ruído aditivo medido. Como parâmetros, são considerados o ganho médio do canal, a banda de coerência, RMS-DS e a capacidade.

O restante do capítulo está organizado na seguinte forma: na Seção 3.1 serão apresentados os conceitos fundamentais para a caracterização do canal de comunicação sem fio, incluindo o ganho médio do canal, RMS-DS e a banda de coerência. Na Seção 3.2, discute-se a capacidade teórica do canal, com base na fórmula de Shannon adaptada para cenários com seletividade em frequência. Por fim, na Seção 3.3, são analisados os resultados experimentais obtidos nas medições em ambientes LOS e NLOS, comparando o desempenho do canal em diferentes condições de propagação.

3.1 GANHO MÉDIO DO CANAL

O ganho médio do canal, $\bar{G}$, é um parâmetro fundamental para a caracterização da CFR em um meio comunicação, uma vez que ele fornece uma ideia de sua qualidade e permite estimar grosseiramente sua capacidade. Ele é obtido por meio da média das magnitudes ao quadrado dos subcanais e pode ser expresso como

$$\bar{G} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |H[k]|^2 \quad (3)$$

Como o ganho médio do canal é normalmente representado em decibéis, considera-se $\bar{G}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} (\bar{G})$.

3.2 RAIZ QUADRADA DO ESPALHAMENTO DO ATRASO MÉDIO

O parâmetro RMS-DS é de extrema importância para a caracterização da dispersão temporal de um canal de comunicação. Ele fornece uma medida para o espalhamento do sinal de comunicação causado pelos múltiplos percursos do meio de comunicação e é essencial no projeto de sistemas de comunicação. Por exemplo, sistemas de comunicação que adotam o esquema OFDM, podem usar essa informação para determinar o comprimento do prefixo cíclico.

O RMS-DS é definido como a raiz quadrada do segundo momento central da resposta ao impulso do canal e pode ser expresso como

$$\sigma_\tau = T_s \cdot \sqrt{\mu_1 - \mu_0^2} \quad (4)$$

em que μ_0 e μ_1 representam os momentos de primeira e segunda ordens, respectivamente, podendo serem escritos como

$$\mu_0 = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} n |h[n]|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2} \quad (5)$$

e

$$\mu_1 = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} n^2 |h[n]|^2}{\sum_{n=0}^{N-1} |h[n]|^2}. \quad (6)$$

Observa-se que $\{h[n]\}_{n=0}^{N-1}$ é a resposta ao impulso do canal de comprimento N e T_s é o período de amostragem.

Quando obtemos valores elevados deste parâmetro podemos aferir que o canal apresenta uma dispersão temporal significativa, o que é uma característica de ambientes com propagação por múltiplos percursos. Este cenário pode ser encontrado com facilidade em ambientes internos (como o deste trabalho) com numerosas superfícies refletoras, onde o sinal recebido é composto por diversas réplicas com atrasos temporais consideráveis.

Ao olharmos para o oposto do citado acima, ou seja, quando o cálculo do RMS-DS resulta em valores reduzidos, podemos aferir que em uma situação de cenários LOS uma menor interferência entre símbolos (ISI), o que simplifica o projeto do sistema de comunicação.

Podemos explorar a relação entre o espalhamento temporal e a largura de banda coerente, fator que é relevante para o dimensionamento dos sistemas de comunicação. Aproximando $B_c \approx 1/(5\sigma_t)$ demonstramos que canais com maior dispersão temporal apresentam necessariamente uma menor banda coerente. A partir desta relação podemos estabelecer limites para a taxa de transmissão máxima sem a ocorrência de interferência, entre símbolos.

Vale destacar que, expressões matemáticas utilizadas para o cálculo do RMS-DS são normalizadas pela energia total do canal. Esta normalização garante uma independência dos resultados em relação à potência absoluta do sinal recebido, permitindo comparações entre diferentes medições e mantendo a correlação com as características temporais intrínsecas do canal.

3.3 BANDA DE COERÊNCIA

O parâmetro banda de coerência define a largura de banda que a magnitude da CFR pode ser considerada aproximadamente plana (ou seja, sem variações significativas em sua magnitude). Ela é determinada a partir da função de autocorrelação da CFR e está diretamente relacionada ao RMS-DS. Determinar a banda de coerência permite que se possa analisar a necessidade de técnicas de equalização e projetar sistemas robustos contra os efeitos do RMS-DS.

A autocorrelação da CFR pode ser calculada da seguinte forma:

$$R_H[k] = \sum_{\ell=0}^{N-1} H[\ell] \cdot H^*[\langle k - \ell \rangle_N] \quad (7)$$

de forma que $\langle a \rangle_N$ representa $a \bmod N$ e $\{\cdot\}^*$ o operador complexo conjugado.

O cálculo da função de autocorrelação $R_H[k]$, operação que caracteriza a coerência espectral do canal, realiza uma comparação sistemática entre a resposta original do canal $H[\ell]$ e suas versões deslocadas $H^*[\langle k - \ell \rangle_N]$, onde o operador módulo N assegura a periodicidade, mesmo com a transformada discreta de Fourier. Essa é uma abordagem circular, que preserva as propriedades matemáticas da análise no domínio da frequência. Ao realizarmos o cálculo, obtém-se uma medida estatística que quantifica a similaridade da resposta em frequência em diferentes deslocamentos.

A autocorrelação atinge seu valor máximo em $R_H[0]$, ponto que representa o pico de autocorrelação, o qual serve como referência para a determinação da banda de coerência, pois estabelece o ponto de máxima similaridade espectral.

Por fim, podemos analisar que conforme o deslocamento k aumenta, a autocorrelação $R_H[k]$ decresce, indicando uma perda contínua de similaridade espectral. O ponto em que esta correlação atinge um limiar em relação a $R_H[0]$ determina a banda de coerência.

Uma vez obtida a autocorrelação da CFR, a banda de coerência pode ser calculada pela expressão

$$B_c^\beta = \Delta f \cdot \text{argmin}(R_H[k] \geq \beta \cdot R_H[0])$$

com β sendo o limiar de correlação e $\Delta f = 1/(NT_s)$ representa a largura de banda de um subcanal.

3.4 CAPACIDADE DE CANAL

A capacidade de transmissão em sistemas de comunicação, é uma medida teórica determinada pela fórmula de Shannon, que pode ser adaptada para canais com atenuação seletiva em frequência. Este cálculo permite estabelecer o limite superior de taxa de transmissão de bits de informação que pode ser alcançado no canal, considerando as características específicas de cada subcanal.

A capacidade de um canal seletivo em frequência pode ser expressa por

$$C = \Delta f \sum_{k=0}^{N-1} \log_2 \left(1 + \frac{P[k] \cdot |H[k]|^2}{P_v[k]} \right) \quad (8)$$

em que Δf é a distância em Hertz entre as subportadora, $P[k]$ é a potência alocada para a k -ésima subportadora e $P_v[k]$ é a k -ésima potência do ruído aditivo.

A relação entre a potência do sinal e a potência do ruído em cada subcanal determina a contribuição individual de cada subcanal para a capacidade total. Os subcanais com melhor qualidade (maior relação sinal-ruído) contribuem de maneira mais significativa para a capacidade do canal. Vale destacar que a capacidade calculada representa um limite máximo teórico, onde se assume uma condição ideal e pode ser aproximada na prática através de técnicas de modulação e codificação.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados numéricos em termos de ganho médio do canal, banda de coerência, RMS-DS e capacidade calculados a partir do banco de dados obtido de uma campanha de medição realizada em um ambiente residencial com cerca de 120 mm². Esse banco de dados é formado por medidas de ruído aditivo e estimativas de CFR considerando os cenários LOS e NLOS, nas faixas de frequências FB1 (2,412 GHz $\pm$ 20 MHz), FB2 (2,437 GHz $\pm$ 20 MHz) e FB3 (2,462 GHz $\pm$ 20 MHz).

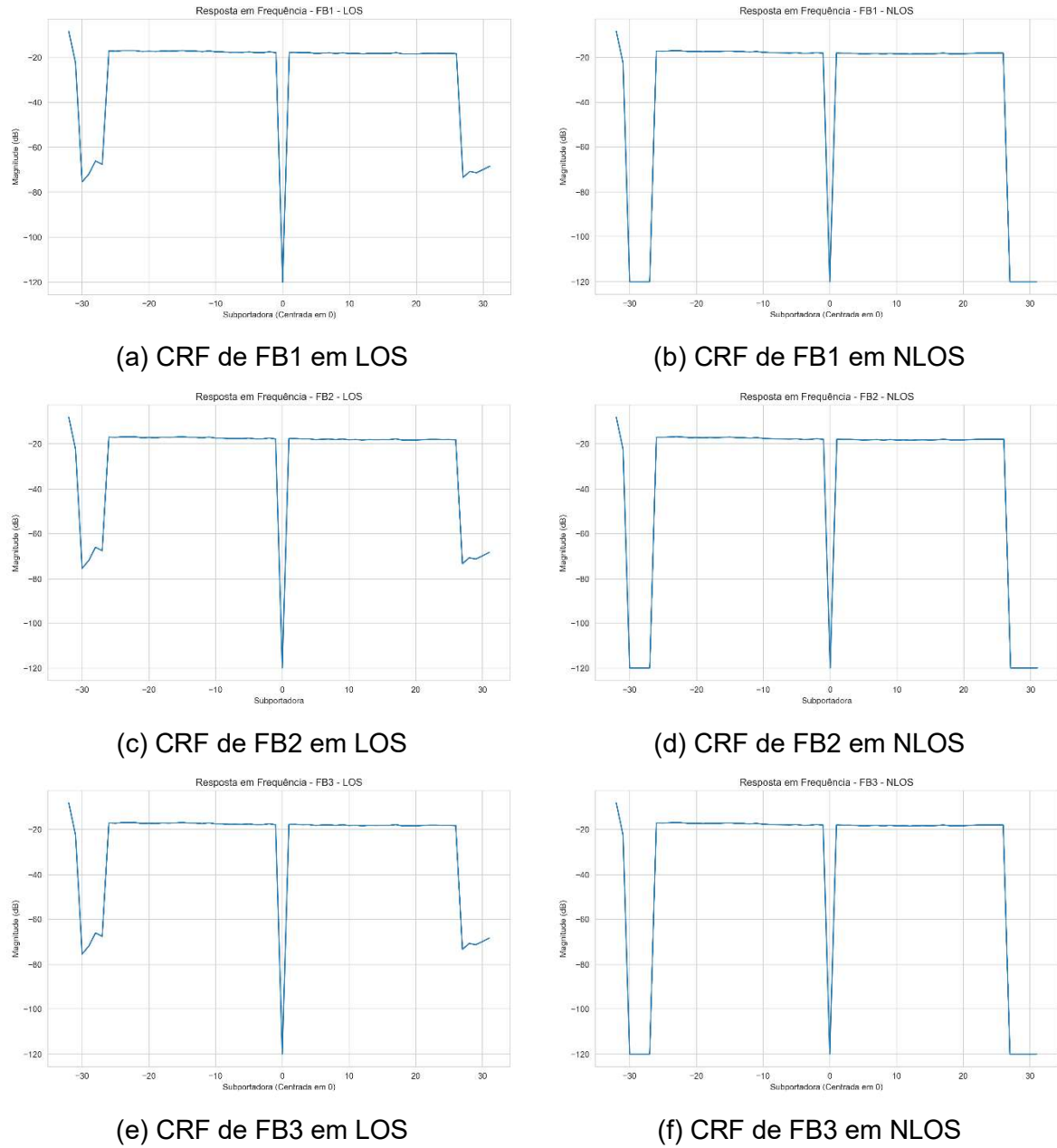
4.1 RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO CANAL

Na FIGURA 9, é apresentada uma comparação real das amplitudes dos coeficientes de CSI ao longo das subportadoras, para os cenários LOS e NLOS. Observa-se que os valores médios de amplitude no cenário LOS são ligeiramente superiores aos do cenário NLOS, indicando uma menor atenuação do sinal quando há linha de visada direta entre transmissor e receptor.

Tais efeitos tendem a degradar a coerência do canal, conceito que se refere à faixa de frequência em que a resposta do canal permanece aproximadamente constante. Em ambientes com alta dispersão, como no cenário NLOS, essa faixa se reduz, o que compromete a previsibilidade do canal e pode impactar negativamente o desempenho da comunicação sem fio.

Na FIGURA 9, as curvas de CFR, são expressas por $|H[k]|^2$, ao longo das subportadoras do protocolo OFDM, para as três frequências (FB1, FB2 e FB3) nos dois cenários analisados: LOS e NLOS. Essa métrica permite observar a distribuição espectral da energia recebida pelo receptor, destacando a influência que o ambiente exerce sobre a propagação do sinal.

FIGURA 9 - Comparação Cenário LOS e NLOS para CFR



FONTE: Acervo pessoal (2025)

Observa-se que os valores médios de amplitude no cenário LOS são ligeiramente superiores aos do cenário NLOS, indicando menor atenuação do sinal quando há linha de visada direta entre transmissor e receptor. Em particular, a média da CFR em LOS gira em torno de 0,0014, enquanto no cenário NLOS, essa média estabiliza em torno de 0,0010. Essa diferença reforça a expectativa teórica de que a visada direta proporciona uma transmissão mais eficiente e menos afetada por obstáculos ou fenômenos de múltiplos caminhos.

Torna-se perceptível que o cenário NLOS apresenta menor dispersão estatística, ainda que com valores absolutos mais atenuados. Já o cenário LOS revela uma maior flutuação espectral, sugerindo uma maior presença de caminhos múltiplos construtivos e destrutivos, algo característico de ambientes indoor com forte reflexão.

Destaca-se ainda que os picos de magnitude em LOS ultrapassam valores de 0,025 em algumas subportadoras intermediárias, o que sugere eventos de reforço do sinal por interferência construtiva. Por outro lado, em NLOS, os picos máximos não ultrapassam 0,017, enquanto os valores mínimos frequentemente se aproximam de zero, sugerindo possíveis cancelamentos destrutivos ou desaparecimentos de sinal em determinadas subportadoras, especialmente devido à presença da parede e à falta de um caminho direto entre os equipamentos.

Além disso, é possível observar três regiões com valores de magnitude extremamente baixos e consistentes, próximas de -120 dB, localizadas no início, meio e fim do espectro de subportadoras. Esses nulos espectrais não representam falhas do canal, mas sim subportadoras desativadas por configuração do padrão IEEE 802.11 (Wi-Fi), comumente utilizadas como bandas de guarda e subportadora nula central. Elas são necessárias para evitar interferência entre canais adjacentes e compensar imperfeições na conversão analógica-digital.

Em resumo, os resultados apresentados confirmam as premissas teóricas da comunicação sem fio, a presença de visada direta favorece a atenuação média do sinal e proporciona picos localizados de maior magnitude, mas também gera maior variabilidade espectral devido às múltiplas reflexões.

Em contrapartida, o cenário sem visada direta apresenta um perfil mais homogêneo e atenuado, coerente com o comportamento típico de canais com obstruções severas.

Visando um maior entendimento do ocorrido na campanha de medição, podemos aprofundar a análise observando a TABELA 1.

TABELA 1 - Estatísticas do Ganho Médio do Canal (dB) por Cenário

Cenário	Frequências	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
NLOS	FB1	25,9	26,8	28,6	0,55
	FB2	25,7	26,6	28,4	0,55
	FB3	25,5	26,4	28,2	0,55
LOS	FB1	26,0	26,7	27,9	0,52
	FB2	25,8	26,5	27,7	0,52
	FB3	25,6	26,3	27,5	0,52

Fonte: O autor(2025)

Na TABELA 1, resume-se os valores agregados do ganho médio do canal, obtidos por meio da análise do CSI em três faixas de frequência distintas (FB1, FB2 e FB3), considerando os dois cenários avaliados: NLOS e LOS.

Os resultados nos indicam que NLOS apresenta valores médios superiores de ganho em comparação ao cenário LOS. Observando a tabela evidenciamos isso, por exemplo, na faixa FB1 o ganho médio em NLOS é 26,8 dB e em LOS 26,7 dB. Embora esta diferença possa ir contra o esperado teórico, pode se explicar pela ocorrência de reflexões construtivas em determinados pontos do ambiente com parede, o que resulta em maior acúmulo de energia em algumas posições específicas.

Ao analisarmos os valores mínimos e máximos, a tendência acaba se confirmando onde o cenário LOS apresenta menor atenuação mínima e menor ganho máximo, o que nos sugere um canal mais homogêneo e previsível. Por exemplo, na faixa FB3, o ganho mínimo em LOS é 25,6 dB, enquanto em NLOS é 25,5 dB o que é uma diferença pequena, mas consistente.

Outro ponto de análise é o desvio padrão, o qual representa a variabilidade do ganho ao longo das medições. O cenário NLOS apresenta valores constantes de 0,55 dB, enquanto no cenário LOS, esse valor é 0,52 dB. Isso nos indica que apesar da visada direta, o ambiente LOS também apresenta flutuações no ganho que podem ser associadas à interferência de múltiplos caminhos internos, à movimentação de objetos ou à variabilidade natural do canal.

Por fim, é possível observar uma tendência de redução do ganho médio com o aumento da frequência, de aproximadamente 0,2 dB a cada 25 MHz, o que é coerente com a teoria de *path-loss* em ambientes indoor acima de 2 GHz. Que nos

traz a ideia de que onde o comprimento de onda menor contribui para maior atenuação e sensibilidade a obstáculos. Esse comportamento é descrito na literatura como, a atenuação do sinal aumenta com a frequência em razão da maior absorção por materiais e menor capacidade de difração das ondas em altas frequências (RAPPAPORT, 2002).

4.2 RAIZ QUADRADA DO ESPALHAMENTO DO ATRASO MÉDIO

Optou-se por não apresentar um gráfico do RMS-DS ao longo das amostras, uma vez que, durante a coleta, o transmissor e o receptor permanecem estáticos em cada posição de medição. O espalhamento temporal, portanto, é determinado principalmente pelas características fixas do ambiente e não tende a variar significativamente entre amostras consecutivas obtidas na mesma condição. Assim, plotar o RMS-DS ao longo do tempo não acrescentaria informação relevante à análise, pois a variabilidade observada seria estatisticamente irrelevante ou resultante de ruído de medição. Em vez disso, optou-se por utilizar medidas estatísticas agregadas para comparar os cenários LOS e NLOS, o que é mais representativo e condizente com a metodologia adotada neste estudo.

Neste pretexto, para melhor entendimento do ocorrido na campanha de medição, podemos aprofundar a análise observando a TABELA 2.

TABELA 2 - Estatísticas do RMS Delay Spread (μ s) por Cenário

Cenário	Frequências	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
NLOS	FB1	12,0	13,8	15,3	0,9
	FB2	12,2	14,0	15,5	0,9
	FB3	12,4	14,2	15,7	0,9
LOS	FB1	9,0	13,3	15,6	1,6
	FB2	9,1	13,5	15,8	1,6
	FB3	9,2	13,7	16,0	1,6

Fonte: O autor(2025)

A TABELA 2 apresenta as estatísticas agregadas do *RMS Delay Spread* para os dois cenários LOS e NLOS e três faixas de frequência distintas (FB1, FB2 e FB3). As métricas incluem os valores mínimo, médio, máximo e o desvio padrão para cada configuração experimental.

Os resultados indicam que para todos os casos os valores médios do *RMS-DS* são maiores no cenário LOS, onde por exemplo, na faixa FB1, a média em LOS é 13,3 ns, contra 13,8 ns em NLOS. Esta diferença pode parecer pequena, mas se torna relevante a medida em que ela se mantém consistente nas demais faixas (FB2 e FB3), sugerindo que a dispersão em LOS é estruturalmente maior devido à interferência de múltiplos caminhos reflexivos ao redor do traçado direto do sinal.

Um ponto importante a ser destacado é o valor do desvio padrão. No cenário LOS ele é significativamente maior, 1,6 ns, comparado ao NLOS, 0,9 ns, em todas as faixas. Isto reforça a observação feita na Figura anterior de que a dispersão no canal com visada é mais volátil, variando bastante entre as amostras, o que está de acordo com o comportamento esperado de ambientes internos com multipercursos.

Ao olharmos para os valores extremos, podemos analisar que o valor máximo do *RMS-DS* ocorre em LOS na faixa FB3, atingindo 16,0 ns e o valor mínimo aparece em LOS com 9,0 ns, enquanto em NLOS os valores mínimos estão acima de 12,0 ns, sugerindo uma ausência total de sinal direto e presença apenas de trajetos múltiplos.

Em relação à frequência, é possível, em análise, notar uma tendência crescente dos valores médios do *RMS-DS* à medida em que se avança de FB1 para FB3, onde por exemplo, em NLOS os valores médios sobem de 13,8 ns para 14,2 ns. Esse crescimento pode ser explicado por uma maior resolução temporal das faixas de frequência mais altas e pela maior sensibilidade às reflexões, resultando em mais trajetos detectáveis com atrasos diferentes.

Esses dados reforçam a importância da caracterização estatística do canal, já que variações pequenas em termos de frequência ou presença de obstáculos podem impactar significativamente o projeto de filtros, esquemas de equalização, e até decisões sobre alocação de banda em sistemas reais de comunicação.

4.3 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

Da forma análoga ao tema acima, não foi incluído no trabalho um gráfico da PSD ao longo das amostras. Isso se deve ao fato de que, em uma única coleta, os dados de CSI são obtidos com o microcontrolador ESP-32 fixo, sem variação na posição ou nos parâmetros de transmissão. Consequentemente, a estimativa de PSD permanece praticamente constante entre as amostras, resultando em uma curva reta ou com variações desprezíveis.

Como essa repetição não acrescenta informações significativas à análise, optou-se por apresentar apenas valores estatísticos médios e comparativos por cenário, os quais são mais úteis para a caracterização do canal em ambientes LOS e NLOS.

Diante do exposto, podemos aprofundar a análise observando a TABELA 3 para obter maiores detalhes.

TABELA 3 - Estatísticas da PSD (dBm/Hz) por Cenário

Cenário	Frequências	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
NLOS	FB1	-62,0	-59,1	-57,2	1,0
	FB2	-61,8	-58,9	-56,9	1,0
	FB3	-61,6	-58,7	-56,6	1,0
LOS	FB1	-61,9	-58,8	-56,4	1,2
	FB2	-61,7	-58,6	-56,1	1,0
	FB3	-61,5	-58,4	-55,8	1,2

Fonte: O autor(2025)

Analisando a tabela 3 de maneira estatística, levando em conta as três frequências utilizadas (FB1, FB2 e FB3), nota-se que a média de PSD é um pouco mais alta nos cenários LOS, com valores entre -58,8 dBm/Hz e -58,4 dBm/Hz, enquanto em contraste, no NLOS, os valores médios ficam entre -59,1 dBm/Hz e -58,7 dBm/Hz, evidenciando uma redução adicional, que já era esperado. Os valores mínimos e máximos seguem a mesma tendência, com menor potência nas condições sem visada direta.

Diante do exposto, o que podemos tirar de conclusão é de que o desvio padrão é ligeiramente maior em LOS (até 1,2 dB), o que pode ser explicado pela maior

variação de tempo dos sinais quando há múltiplas interferências, enquanto no cenário NLOS o canal tende a se comportar de forma mais estática.

Esses resultados comprovam que a obstrução física direta impacta negativamente a potência recebida por subportadora, afetando a densidade espectral do sinal. Ao mesmo tempo, a presença de múltiplos caminhos em LOS pode introduzir flutuações mais acentuadas na energia recebida, resultando em envelopes mais amplos.

4.4 BANDA DE COERÊNCIA

A TABELA 4 apresenta as estatísticas da banda de coerência do canal calculada a partir do RMS-DS, utilizando dois limiares de correlação: $\beta = 0,5$ e $\beta = 0,9$. Esta métrica representa a faixa de frequência dentro da qual o canal pode ser considerado aproximadamente plano, assim sendo, livre de seletividade frequência.

Portanto quanto maior a banda de coerência, mais estável é o canal em termos espectrais. Conforme esperado, os cenários LOS apresentam bandas de coerência mais amplas do que os cenários NLOS. Para $\beta = 0,5$ os valores médios situam-se em torno de 3,0 MHz no cenário LOS, enquanto no NLOS giram em torno de 2,2 MHz. Já para $\beta = 0,9$, um critério mais rigoroso, os valores médios são de aproximadamente 1,7 MHz para LOS e 1,3 MHz para NLOS. Esse comportamento reflete diretamente o maior espalhamento em frequência provocado pela presença de obstáculos, o que compromete a coerência espectral do canal.

Além disso, observa-se que os valores para as três frequências (FB1, FB2 e FB3) são relativamente estáveis dentro de cada cenário, indicando que o comportamento do canal em termos de seletividade de frequência não varia drasticamente entre bandas próximas (de 2,412 GHz a 2,462 GHz). As pequenas variações registradas podem ser atribuídas a diferenças específicas na ocupação espectral, ruído de fundo ou particularidades da reflexão multipercurso para cada faixa.

TABELA 4 - Banda de coerência para $\beta = 0,9$ E $\beta = 0,5$

Cenário	Frequências	β	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
NLOS	FB1	0,5	1,23	2,07	2,88	0,59
		0,9	0,74	1,12	1,65	0,33
	FB2	0,5	1,37	2,23	2,97	0,61
		0,9	0,89	1,30	1,76	0,28
	FB3	0,5	1,42	2,35	3,01	0,57
		0,9	0,93	1,40	1,85	0,31
LOS	FB1	0,5	2,20	3,04	3,82	0,52
		0,9	1,18	1,71	2,21	0,28
	FB2	0,5	2,14	3,10	3,91	0,60
		0,9	1,11	1,80	2,34	0,35
	FB3	0,5	2,31	3,15	3,97	0,55
		0,9	1,20	1,86	2,42	0,36

Fonte: O autor(2025)

4.5 CAPACIDADE

A TABELA 5 apresenta os valores estatísticos da capacidade do canal em megabits por segundo (Mbps), discriminados por frequência (FB1, FB2 e FB3) e por condição de propagação, LOS e NLOS. Os dados foram obtidos a partir da análise do CSI coletado experimentalmente, aplicando-se a fórmula de Shannon.

TABELA 5 - Capacidade

Cenário	Frequências	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
NLOS	FB1	8,28	39,35	108,83	12,31
	FB2	8,92	40,27	110,42	12,33
	FB3	8,91	40,25	110,45	12,34
LOS	FB1	9,06	40,12	110,30	12,24
	FB2	9,01	39,95	109,81	12,15
	FB3	9,00	39,96	109,78	12,16

Fonte: O autor(2025)

Ao analisar os valores médios apresentados, observa-se um resultado inicialmente contraintuitivo, onde todas as faixas de frequência, no cenário NLOS apresentaram capacidades médias ligeiramente superiores às observadas no cenário LOS. Por exemplo, na faixa FB1, a capacidade média no cenário NLOS foi de 39,35 Mbps, contra 40,12 Mbps em LOS; na FB2, 40,27 Mbps em NLOS contra 39,95 Mbps em LOS; e na FB3, 40,25 Mbps em NLOS, frente a 39,96 Mbps em LOS.

Embora essa diferença não seja expressiva numericamente, sua análise, com NLOS superando LOS, diverge do comportamento teórico típico, no qual a presença de obstruções tende a reduzir a qualidade do canal e, portanto, sua capacidade.

Contudo, é possível levantar a hipótese de que esse comportamento pode ser justificado pela complexidade dos ambientes internos, nos quais a propagação não segue o modelo ideal de linha de visada direta.

Em contextos como a geometria do local, a disposição dos móveis, o tipo de material das paredes e superfícies, e até mesmo objetos metálicos ou eletrodomésticos, contribuem para a reflexão, difração e espalhamento do sinal. Isso pode favorecer, de forma localizada, a formação de trajetos alternativos altamente energéticos, capazes de reforçar o sinal por interferência construtiva. Assim, mesmo na ausência de visada direta, o sinal pode atingir o receptor com intensidade considerável, o que se reflete nos valores de capacidade medidos.

A análise da variabilidade dos dados, representada pelo desvio padrão, mostra que a dispersão dos valores de capacidade é levemente maior no cenário NLOS, com valores entre 12,31 e 12,34 Mbps, enquanto no cenário LOS o desvio padrão situa-se entre 12,15 e 12,24 Mbps.

Isso indica que, embora os valores médios em NLOS estejam superiores, os dados apresentam uma maior flutuação, sugerindo que o canal é mais sensível a variações locais, talvez em função da interferência entre múltiplos caminhos que ocorrem de forma aleatória e menos previsível. No cenário LOS, por outro lado, embora a média seja ligeiramente inferior, a variabilidade é menor, indicando uma maior estabilidade temporal e espectral do canal quando há visada direta, o que é consistente com modelos mais clássicos de propagação.

É importante ressaltar que os valores mínimos de capacidade, tanto em LOS quanto em NLOS, situam-se próximos de 9 Mbps, enquanto os valores máximos ultrapassam 110 Mbps em ambos os cenários e todas as faixas. Isso confirma que há momentos de canal altamente favorável, mesmo em condições adversas, o que

reforça a necessidade de sistemas adaptativos capazes de aproveitar tais oportunidades com técnicas como modulação adaptativa e alocação dinâmica de taxa.

Por fim, apesar da leve incongruência entre os resultados empíricos e o comportamento previsto por modelos teóricos simplificados, os dados obtidos são plenamente compatíveis com a realidade da propagação em ambientes indoor, em especial na faixa de 2,4 GHz. Como discutido por Molisch (2011), ambientes fechados tendem a apresentar fenômenos de multipercurso intensos, e os trajetos refletidos podem ocasionalmente superar o sinal direto em termos de intensidade, especialmente quando o canal direto está degradado por obstruções ou atenuações específicas. S, a dispersão é menor, o que indica uma estrutura de canal mais estática, embora atenuada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a caracterização de canais de comunicação sem fio em ambientes internos, utilizando informações de CSI extraídas de microcontroladores ESP32 operando na frequência de 2,4 GHz. Através de uma campanha experimental estruturada, foram realizadas medições sob diferentes condições de propagação LOS e NLOS e em três frequências representativas dos canais Wi-Fi.

Os dados obtidos permitiram a extração de parâmetros fundamentais para a caracterização dos canais, como o ganho médio, RMS-DS, a banda de coerência, a CFR e a PSD. A análise conjunta desses parâmetros ofereceu uma visão dos efeitos que o ambiente físico exerce sobre a propagação do sinal Wi-Fi, tanto em relação à sua intensidade quanto à sua distribuição espectro-temporal.

No cenário NLOS, observou-se um comportamento compatível com a teoria da propagação por múltiplos percursos. Houve maior atenuação média do sinal, maior dispersão temporal, que é expressa pelos altos valores de RMS-DS, e uma consequente redução da banda de coerência do canal. Tais efeitos são indicativos de uma maior seletividade em frequência, o que exige, em sistemas práticos, técnicas de equalização mais robustas e algoritmos de correção adaptativos. Por outro lado, no cenário LOS, o canal apresentou maior ganho médio, menor dispersão temporal e uma banda de coerência mais ampla, sugerindo um ambiente mais estável e propício à transmissão eficiente de dados, com menores perdas por interferência ou desvanecimento seletivo.

Uma observação relevante foi o fato de que, contrariando a expectativa teórica, em determinados pontos do ambiente NLOS foi identificada uma capacidade de canal ligeiramente superior àquela observada em LOS. Essa condição foi atribuída à ocorrência de efeitos construtivos causados por múltiplas reflexões, típicas de ambientes internos complexos, onde certos percursos podem se combinar de forma favorável à transmissão. Esse achado reforça a importância de campanhas empíricas, já que o comportamento real do canal pode divergir das previsões teóricas quando há variabilidade espacial e interferência multitrajeto.

A análise da PSD mostrou-se coerente com o esperado para o canal analisado, com distribuição praticamente constante ao longo das subportadoras úteis, o que atesta a validade do método de coleta e a integridade dos dados obtidos. As pequenas variações identificadas nas extremidades do espectro foram atribuídas a características inerentes ao padrão OFDM e às limitações do hardware, não comprometendo a análise central dos resultados.

O uso do microcontrolador ESP-32 como ferramenta de medição demonstrou ser uma solução viável, econômica e tecnicamente eficiente para coleta de CSI em ambientes internos. O sistema apresenta vantagens como facilidade de programação, suporte ativo por parte da comunidade, ampla documentação e integração com o *framework* ESP-IDF, o que permite customizações e configurações avançadas. O tratamento dos dados via *scripts* em *Python* facilitou a extração dos parâmetros desejados e permitiu a construção de visualizações gráficas e tabelas explicativas que corroboram a literatura técnica da área.

Portanto, o estudo atinge seus objetivos propostos. Através de uma metodologia experimental bem definida e uma análise crítica dos resultados, foi possível validar o uso do microcontrolador ESP32 como plataforma viável para a caracterização de canais sem fio, além de contribuir com dados experimentais relevantes para aplicações em redes Wi-Fi e sistemas de IoT. Cabe destacar que, mesmo nos casos em que os resultados se afastaram do referencial teórico, essas divergências não invalidam o estudo, apenas oportunizaram subsídios importantes para o entendimento prático dos canais em condições reais, mostrando que ambientes internos apresentam comportamentos complexos e, muitas vezes, contraintuitivos.

A metodologia adotada neste trabalho pode ser expandida para diferentes bandas de frequência, ambientes com materiais distintos, cenários com mobilidade e densidade de obstáculos variada. Investigações futuras podem incorporar análises em 5 GHz, avaliação de tempo de coerência, simulações baseadas em *machine learning* e comparação entre diferentes arquiteturas de *hardware*. Assim, este estudo estabelece uma base sólida para pesquisas posteriores, além de contribuir com ferramentas acessíveis para o desenvolvimento de sistemas de comunicação mais adaptativos, eficientes e compatíveis com a realidade dinâmica dos ambientes modernos.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos, propõe-se como extensões deste estudo:

- Avaliar a influência de diferentes materiais de barreira (como madeira, drywall e vidro);
- Incluir medições com mobilidade, para estimativa do tempo de coerência;
- Estender a coleta para a faixa de 5 GHz e comparar com os resultados obtidos em 2,4 GHz;

REFERÊNCIAS

GOLDSMITH, Andrea. Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

CAMPONOGARA, Â. Physical layer security analyses for low-bit-rate hybrid PLC/WLC and broadband plc systems. Ago. 2020. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

RAPPAPORT, Theodore S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

MOLISCH, Andreas F. Wireless Communications. 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011.

PROAKIS, John G.; SALEHI, Masoud. Comunicações Digitais. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2010.

HERNÁNDEZ, Steven M. ESP32 CSI Tool. Disponível em:
<https://github.com/StevenMHernandez/ESP32-CSI-Tool>.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP-IDF Programming Guide. Disponível em:
<https://docs.espressif.com>.

IEEE. IEEE Standard for Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std 802.11-2016, 2016.

CHEN, Ke; LIU, Jie. CSI-Based WiFi Human Sensing: A Survey. ACM Computing Surveys, v. 54, n. 2, p. 1–36, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1145/3439866>.

BANINIA, A.; DANESHMAND, M. Wireless Propagation Metrics: Channel Modeling and Performance Evaluation. Cham: Springer, 2020.

ATIF, Muhammad; et al. An Experimental Framework for Estimating Wireless Channel Characteristics Using ESP32. *Journal of Communication and Distributed Electronics*, 2020.

HALPERIN, Daniel; HU, Wenjun; SHEPHERD, Anmol; WETHERALL, David. Tool release: gathering 802.11n traces with channel state information. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 41, n. 1, p. 53, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1145/1925861.1925870>.

WANG, X.; LI, Y.; ZHANG, P.; ZHANG, M. Deep learning for wireless physical layer: Opportunities and challenges. *China Communications*, v. 14, n. 11, p. 92–111, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/CC.2017.8246344>.

ZHAO, L.; RAPPAPORT, T. S.; AZAR, Y.; SAMIMI, M. K. 28 GHz millimeter wave cellular communication measurements for reflection and penetration loss in and around buildings in New York City. In: *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019. Anais... IEEE, 2019. p. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2019.8761572>.

GÓMEZ, P.; DE LA CRUZ, J. M.; GALACHE, J. A. Machine learning-based link quality estimation for wireless sensor networks. *IEEE Access*, v. 10, p. 26357–26372, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157058>.

IEEE. IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements – Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications (Rev. 2016). *IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, p. 1–3534, 14 dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7786995>.

ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Technical Reference Manual. [S.l.]: Espressif Systems, 2024. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>.