

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JOSÉ HENRIQUE BARRIENTOS

**ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE RÁDIOFREQUÊNCIA NA BANDA DE 900
MHZ**

CAMPO MOURÃO

2022

JOSÉ HENRIQUE BARRIENTOS

**ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE RÁDIOFREQUÊNCIA NA BANDA DE 900
MHZ**

Analysis of radio frequency propagation in the 900 MHz band

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica do Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Wilhelm Krauss Martinez.

Coorientador: Prof. Me. Paulo Roberto de Freitas

CAMPO MOURÃO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

JOSÉ HENRIQUE BARRIENTOS

**ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE RÁDIOFREQUÊNCIA NA BANDA DE 900
MHZ**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Engenharia Eletrônica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 11 de novembro de 2022

Osmar Tormena Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roberto Wilhelm Krauss Martinez, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago dos Santos Cavali, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CAMPO MOURÃO
2022**

RESUMO

O processo de implementação de redes de comunicação sem fio pressupõe que seja realizada um levantamento minucioso dos fatores de atenuação do canal que será utilizado, para que assim se possa alcançar a melhor eficiência na comunicação entre seus pontos. Para determinar as características de um canal, existem vários modelos de propagação podendo ser de larga ou pequena escala, teóricos ou empíricos, de modo a considerar o máximo de fatores atenuantes possível, como por exemplo o modelo de Okumura, COST 231 e log-distância. No presente trabalho será explorado o modelo de propagação em larga escala log-distância e em seguida será analisado o comportamento do canal em pequena escala através do modelo de propagação Nakagami- m . Utilizando-se do modelo de propagação em larga escala log-distância foi calculado um coeficiente de perda de propagação igual a 1,841, para a condição de espaço livre e com as antenas sob linha de visada, e para a condição sem linha de visada considerando efeitos de sombreamento o valor do coeficiente de perda de percurso foi de 3,778. Utilizando o modelo de propagação em pequena escala Nakagami- m foi possível determinar o parâmetro de Nakagami através de dois métodos diferentes obtendo os valores de 1,49 e 1,57. Para a realização dos testes foram utilizados kits de desenvolvimento com módulos transceptores produzidos pela empresa Texas Instruments em conjunto com o software de configuração de redes sem fio SmartRF Studio 7® também da empresa Texas Instruments.

Palavras-chave: propagação; modelo log-distância; perda de percurso; nakagami- m .

ABSTRACT

The process of implementing wireless communication networks assumes that a detailed survey of the attenuation factors are carried out for the channel in use, so that the best efficiency in communication between its points can be achieved. To determine the characteristics of a channel, several propagation models exist, which can be large or small, theoretical or empirical, in order to consider as many attenuating factors as possible, such as the Okumura model, COST 231 and log-distance. In the present work, the large-scale log-distance propagation model will be explored and then the behavior of the small-scale channel will be analyzed through the Nakagami- m propagation model. Using the large-scale log-distance propagation model, a propagation loss coefficient equal to 1.841 was calculated, for the free space condition and with the antennas under line of sight, and for the condition without line of sight considering effects of shading, the value of the path loss coefficient was 3.778. Using the small-scale propagation model Nakagami- m , it was possible to determine the Nakagami parameter through two different methods, obtaining values of 1.49 and 1.57. To carry out the tests, development kits were used with transceiver modules produced by the company Texas Instruments together with the SmartRF Studio 7® wireless network configuration software also from the company Texas Instruments.

Keywords: propagation; log-distance model; path-loss; nakagami-m.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fenômeno físico da reflexão.	14
Figura 2 – Fenômeno físico da difração.	15
Figura 3 – Modelo de propagação dois raios.	18
Figura 4 – Comparação entre valores de m no calculo da função densidade de probabilidades calculada através da distribuição de Nakagami- m	21
Figura 5 – Visão superior do kit LAUNCHXL - CC1310®.	23
Figura 6 – Configuração do transmissor no software SmartRF Studio 7®.	24
Figura 7 – Local onde foi realizada a coleta de dados. A marcação X identifica o rádio transmissor e o quadrado identifica o rádio receptor.	26
Figura 8 – Coleta de dados desvanecimento de propagação em pequena escala. A marcação X identifica o rádio transmissor e o quadrado identifica o rádio receptor.	27
Figura 9 – Comparativo entre valores empíricos e teóricos para a condição com linha de visada.	28
Figura 10 – Comparativo entre valores empíricos e teóricos para a condição sem linha de visada.	29
Figura 11 – Log-distância com perdas por difração.	30
Figura 12 – Valores de RSSI obtidos.	31
Figura 13 – Histograma com a distribuição das potências obtidas através da Eq. (25).	32
Figura 14 – Comparação entre as funções de densidade geradas pelo método "fit-dist()", pela Eq. (19) e o histograma das amostras geradas pela Eq. (25).	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Legislação	9
1.2	Objetivos	10
1.2.1	Objetivo geral	10
1.2.2	Objetivos específicos	10
1.3	Trabalhos relacionados	11
1.4	Justificativa	12
1.5	Estrutura do trabalho	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Canal	14
2.1.1	Reflexão	14
2.1.2	Difração	15
2.1.3	Dispersão	16
2.2	Modelos de propagação em larga escala	17
2.2.1	Modelo de propagação no espaço livre	17
2.2.2	Modelo de propagação de dois raios	17
2.2.3	Modelo de perda de percurso log-distância	18
2.2.4	Modelo de Okumura	19
2.2.5	Modelo de Longley-Rice	19
2.3	Propagação em pequena escala	20
2.3.1	Distribuição de Nakagami- m	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais utilizados para as medições	23
3.1.1	Kit de Desenvolvimento	23
3.1.2	SmartRF Studio 7	24
3.1.3	Matlab®	25
3.2	Metodologia de obtenção de dados	25
3.2.1	Propagação em larga escala	25
3.2.2	Propagação em pequena escala	26
4	RESULTADOS	28

4.1	Log-distância	28
4.2	Nakagami- m	30
5	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A história das telecomunicações é relativamente nova sendo que a primeira demonstração das comunicações sem fio ocorreu em 1894 e foi realizada pelo físico inglês Oliver Lodge que, baseando-se nos trabalhos de Maxwell e Hertz, realizou uma transmissão por uma distância aproximada de 137 metros, e alguns anos mais tarde o físico italiano Guglielmo Marconi desenvolveu um aparato capaz de transmitir ondas de rádio por longas distâncias, e em 1901 esse aparato foi capaz de realizar uma transmissão através do Oceano Atlântico, entre as cidades de Cornwall na Inglaterra e a cidade de Signal Hill no Canadá (HAYKIN; MOHER, 2008).

No Brasil a primeira demonstração de uma transmissão de sinais de rádio ocorreu, segundo Rocha (2022a), em 16 de julho de 1899, sendo realizada pelo padre Roberto Landell de Moura, que no ano de 2012 teve seu nome escrito no Livro dos Heróis da Pátria, conforme a lei nº 12.614, de 27 de abril de 2012, devido as suas contribuições na disseminação das telecomunicações tanto no Brasil quanto nos Estados Unidos. A demonstração ocorreu na cidade de São Paulo, e nessa transmissão o sinal percorreu uma distância aproximada de 4 quilômetros sendo transmitido do Colégio Santana situado na Zona Norte, até a Ponte das Bandeiras (ROCHA, 2022a). Porém a primeira transmissão oficial realizada em território brasileiro ocorreu no dia 7 de setembro de 1922 e foi transmitida do Rio de Janeiro, que era a capital do país na época (ROCHA, 2022b). As telecomunicações constituem o ramo da engenharia que trata do projeto, implantação e manutenção dos sistemas de comunicações e tem por objetivo principal atender à necessidade do ser humano de se comunicar a longas distâncias (MEDEIROS, 2016).

Segundo dados do IBGE (2020) em 2020 houve um aumento no número de empresas de telecomunicações apresentando um crescimento de 9,64% e relação ao número de empresas desse ramo no ano de 2019. Além disso com o crescimento do uso de tecnologias de rádio para aplicações em Internet das Coisas (IoT do inglês, Internet of Things) juntamente com aplicações em redes de sensores sem-fio, cresce também a demanda por novas aplicações e tecnologias, em novos ambientes de utilização (FERREIRA; ORTIZ; COSTA, 2019).

A metodologia apresentada no presente trabalho consiste na transmissão de dados sob as circunstâncias com linha de visada e sem linha de visada, afim de que sejam levantados os coeficientes de perda de percurso para as duas condições. De forma semelhante também foi realizada uma transmissão em que o canal entre as antenas sofreu forte atenuação em decorrência de obstruções móveis que transitavam de forma aleatória. Neste cenário foi utilizado o modelo de propagação em pequena escala Nakagami- m para descrever matematicamente o comportamento aleatório do sinal.

Os resultados obtidos no presente trabalho obtiveram proximidade dos valores obtidos experimentalmente, de modo que foi calculado para a condição de linha de visada $n = 1,841$, para a condição sem linha de visada foi obtido $n = 3,778$, e para a propagação em pequena escala foram obtidos três valores distintos para o parâmetro m sendo eles $m = 1,49$ e $m =$

1,57. A discussão a respeito dos valores será realizada com mais detalhes no capítulo 4 - RESULTADOS.

1.1 Legislação

No Brasil o órgão responsável pela regularização e fiscalização dos sistemas de telecomunicações é a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), que foi instituída em 1997, através da Lei Nº 9472, de 16 de julho de 1997. Essa que também é conhecida como Lei Geral das Telecomunicações, e trata a respeito da organização dos serviços de telecomunicações, da criação e funcionamento de um órgão regulador (BRASIL, 1997).

De acordo com a Lei Geral das Telecomunicações, não é permitido o uso ou comercialização de produtos relacionados as telecomunicações em território brasileiro sem que este tenha sido homologado pela Anatel. Esse processo de homologação tem como objetivo a segurança e a qualidade no uso das redes de telecomunicações no Brasil (GOVERNO FEDERAL, 2021). O processo de homologação se dá em conformidade com a resolução 715 de 23 de outubro de 2019, que estabelece critérios para avaliação de conformidade de produtos de telecomunicações, como por exemplo o uso eficiente e racional do espectro radioelétrico, o cumprimento dos requisitos de segurança, de não agressão ao meio ambiente, acesso dos consumidores a produtos diversificados, liberdade econômica, de livre concorrência, criação de oportunidades de investimento e de estímulo ao desenvolvimento tecnológico da indústria de produtos para telecomunicações (ANATEL, 2019).

Para a realização do presente trabalho foram consultadas a Resolução nº 680 de 27 de junho de 2017 que trata sobre a regulamentação sobre os equipamentos de radiodifusão de radiação restrita Anatel (2017). A resolução nº 720 de 10 de fevereiro de 2020 que trata do regulamento geral das outorgas (ANATEL, 2020a). A Resolução nº 740, que trata a respeito regulamento de segurança cibernética aplicada ao setor de telecomunicações (ANATEL, 2020b). E a lei 14108 de 2020 que dispõe sobre os valores das taxas de fiscalização de instalação, de funcionamento, e da contribuição para o fomento da radiodifusão pública e da contribuição para o desenvolvimento das estações de telecomunicações que integrem sistemas de comunicação máquina a máquina, e sobre a dispensa de licenciamento de funcionamento prévio dessas estações (BRASIL, 2020).

A Resolução nº 680 de 27 de junho de 2019 trata sobre os equipamentos de radiocomunicação de radiação restrita, de modo que estes equipamentos devem atender requisitos como, operação periódica e a produção de um campo eletromagnético de $200 \mu\text{V/m}$ a uma distância média de 3 metros, para a frequência de 915 MHz. Além de que equipamentos de radiação restrita não podem causar interferências em outros sistemas e também não têm amparo legal com respeito a proteção contra interferências. E é importante salientar que todos os equipamentos de radiação restrita devem possuir certificação emitida ou aceita pela Anatel (ANATEL, 2017).

Na Resolução nº 720 de 10 de fevereiro de 2020, CAPÍTULO VI - DOS CASOS DE DISPENSA DE AUTORIZAÇÃO DE SERVIÇOS são tratados os casos em que a autorização para a realização de serviços de telecomunicações é dispensada, no Art. 12 é definido que não é necessária autorização quando a atividade de telecomunicações está restrita aos limites de uma propriedade, exceto quando não for realizada por um equipamento de radiação restrita (ANATEL, 2020a).

A resolução nº 740, de 21 de dezembro de 2020 define as diretrizes que devem ser seguidas pelo pessoal envolvido na gestão ou no desenvolvimento das redes e serviços de telecomunicações, dentre essas diretrizes podem ser citadas atuar com responsabilidade, zelo e transparência, identificar, proteger, diagnosticar, responder e recuperar de incidentes de Segurança Cibernética visando sempre a utilização segura e sustentável das redes e serviços de telecomunicações. Essas diretrizes tem como objetivo assegurar a autenticidade, confidencialidade, disponibilidade, diversidade, integridade, responsabilidade e transparência (ANATEL, 2020b).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo realizar o levantamento do coeficiente de atenuação para um sistema de comunicação sem fio implementado na UTFPR no campus de Campo Mourão no interior do Paraná e com isso contribuir para trabalhos futuros, seja no campo acadêmico através da elaboração de um roteiro de aula prática para a disciplina de comunicações sem fio ou para a implementação prática de um sistema de comunicação sem fio, seja para fins industriais ou científicos.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar um levantamento dos fatores e coeficientes de atenuação locais na frequência não licenciada de 915 MHz. Embora a banda de 900 MHz seja de 902 - 907,5 MHz e de 915 - 928 MHz.

1.2.2 Objetivos específicos

- Descrever os fenômenos de propagação básicos e os meios físicos que geram obstrução ou atenuação do sinal;
- Efetuar o cálculo dos coeficientes relacionados a atenuação;
- Esboçar graficamente o comportamento do sinal em cada cenário;

- Comparar os dados obtidos experimentalmente com resultados gerados a partir de modelos de propagação;
- Apresentar um relatório de instruções e medições para cada canal a ser medido;

1.3 Trabalhos relacionados

A utilização do modelo log-distância para o levantamento do coeficiente de perda de percurso para a elaboração de um sistema de comunicação sem fio é uma ideia amplamente usada principalmente devido a sua simplicidade se comparado a outros modelos de predição e também a sua proximidade com os valores obtidos de forma empírica, frequentemente utilizado para predição de sinais em ambientes externos como demonstrado por Sandoval *et al.* (2017) que utilizaram o modelo Log-distância para comparar a eficiência da transmissão de dados nas bandas de 915 MHz e 2,4 GHz em uma rede inteligente de distribuição de energia. Wojcicki *et al.* (2021) que propõe um algoritmo de filtragem Bayesiana para estimar o valor do expoente de perda de percurso para o modelo Log-distância para medições ao ar livre. Anzum *et al.* (2022) faz uma comparação entre o modelo de perda de propagação log-distância, o modelo ITU-R e o modelo Weissberger afim de verificar qual o mais indicado para um sistema de comunicação de sensores inseridos em uma plantação de dendê. O trabalho de Mahmood, Mohamed e Imran (2021) busca demonstrar a influência que os fatores de ganho das antenas e o expoente de perda de percurso exercem sobre a intensidade do sinal recebido. Ahmed *et al.* (2019) que aplica o modelo log-distância em conjunto com o modelo de propagação em pequena escala Nakagami- m para desenvolver um sistema de localização indoor que pode ser aplicados a aeroportos ou grandes fábricas.

O modelo de Nakagami- m é muito utilizado quando se trata de propagação em pequena escala, pois em sua modelagem ela leva em conta fatores aleatórios presentes no sinal, em conjunto com isso permite que seu parâmetro m possa ser ajustado a fim de se alcançar uma precisão maior. Pensando nisso alguns autores como: Cheng e Beaulieu (2002), Abdi e Kaveh (2000), propõem métodos para calcular o valor de m com base em dados experimentais. De modo semelhante Ferreira, Ortiz e Costa (2019) afim de verificar o comportamento do sinal de sensores situados no Parque Nacional da Serra dos Órgãos no Rio de Janeiro também propõem uma metodologia para o calculo da distribuição de Nakagami- m fazendo uso de funções presentes no software Matlab®. Seguindo o mesmo princípio Cao e Beaulieu (2005) também propõem um método de amostragem para a distribuição de Nakagami- m de modo a se obter maior eficiência na distribuição de potências. Nesse contexto Popovic *et al.* (2007) realizam uma análise numérica da distribuição de Nakagami- m de modo a trata-la como soluções particulares de equação diferencial.

Em seu artigo Byra *et al.* (2015) trata a respeito de como a atenuação do sinal influencia na estimativa do parâmetro de Nakagami, e analisam métodos de correção, afim de se

obter maior precisão. Nesse contexto também podem ser citados Lu e Han (2009) que propõem uma simplificação na descrição do canal com desvanecimento descrito pela distribuição de Nakagami- m através da aplicação de três fatores, que são: a dispersão angular, constrição angular e direção azimutal de desvanecimento máximo. E Souza e Yacoub (2007) que em seu trabalho propõem uma equação de forma fechada para calcular a distribuição de Nakagami- m gerada a partir de variáveis aleatórias correlacionadas.

O autor Schlichting (2020) em sua monografia propõe a utilização do kit de desenvolvimento CC1350@ para execução de atividades laboratoriais para a disciplina de Comunicações Móveis, com a proposta de utilizar ferramentas de software gratuitos assim como códigos em python para realização do tratamento matemático dos dados coletados.

No presente trabalho foram utilizadas as metodologias de coleta de dados sugeridas por Sandoval *et al.* (2017) que em seu trabalho estabelece as distâncias a qual foram realizadas as aquisições. E Ahmed *et al.* (2019) que em seu trabalho faz sugestões a respeito do tempo de coleta das amostras de sinal, assim também como da quantidade de amostras de sinal a ser coletado.

1.4 Justificativa

Segundo a Associação Brasileira de Internet das Coisas, até 2025, mais de 27 milhões de dispositivos já estarão conectados (ABINC, 2022), e há perspectiva de crescimentos de que até o final de 2030 cerca de 29,3 bilhões de dispositivos estarão conectados por meio de redes IoT (SPARCCAQUERCHE, 2022). Para atender a essa demanda é necessário que se tenha um canal de comunicação otimizado, afim de que não haja perda de dados na comunicação entre os dispositivos conectados, devido a isso o estudo a respeito de metodologias de caracterização dos canais de comunicação sem fio, se faz necessário, de modo a buscar formas mais otimizadas para transmissão de sinais entre dispositivos conectados.

Tendo em vista que o canal impõe limitações fundamentais para o desempenho de comunicações sem fio, de modo que o caminho entre transmissor e receptor pode variar desde a simples linha de visada até que seja seriamente obstruído por prédios montanhas, folhagens e, em canais com transmissão de altas frequências, até mesmo gotas d'água constituem obstrução para o sinal. Além das obstruções também é preciso considerar se a distância entre receptor e transmissor será fixa, ou se o canal sofrerá alterações devido a variação da posição do transmissor ou receptor, nesse caso, diferentemente dos canais com distância fixa entre transmissor e receptor que são previsíveis os canais móveis são aleatórios e não oferecem uma análise fácil (RAPPAPORT, 2008). No presente trabalho será analisado um canal cuja distância entre transmissor e receptor se manterá fixa durante o tempo de coleta dos dados.

Nesse contexto a caracterização do canal de comunicação sem fio é indispensável ao processo de implementação de um sistema de comunicação confiável pois este é suscetível a ruídos e interferências que impedem o bom funcionamento do sistema (GOLDSMITH, 2005).

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi constituído de modo que no Capítulo 1 está apresentado um breve histórico a respeito das comunicações sem fio, assim como sua importância para a sociedade atual e os objetivos que motivaram sua execução. No Capítulo 2 é apresentada a base da teoria relacionada aos sistemas de comunicação sem fio, assim também como são apresentados alguns modelos de propagação em larga escala e modelos de cálculo de desvanecimento em pequena escala. O Capítulo 3 contém a descrição dos materiais e métodos utilizados para a obtenção e tratamento dos dados. No Capítulo 4 contém uma discussão sobre os resultados obtidos assim como algumas considerações a respeito desses resultados. Por fim, no Capítulo 5 está a conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes da realização dos experimentos propostos é necessário conhecer o conceito de canal e quais os fenômenos físicos relacionados a propagação de ondas eletromagnéticas, como esses fenômenos interferem no funcionamento do sistema e como eles são considerados no momento de modelar o canal do sistema de comunicação.

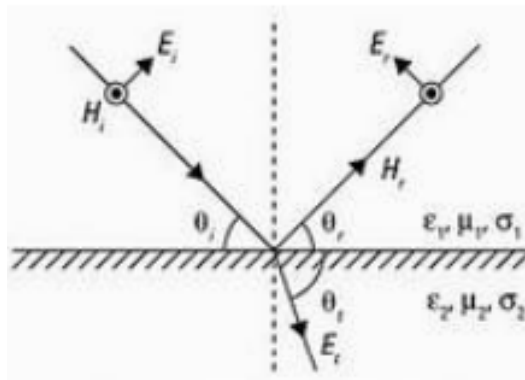
2.1 Canal

O canal de um sistema de comunicações sem fio corresponde ao caminho pelo qual o sinal é transmitido. Nos sistemas sem fio as perdas mais comuns no canal são, a distorção no próprio canal, que diz respeito aos múltiplos percursos que o sinal pode percorrer até chegar ao receptor, esses sinais provenientes de multi-percursos interagem entre si de modo a gerar interferências destrutivas e construtivas o que gera alterações na intensidade do sinal recebido. A natureza variável no tempo, interferências por fontes externas e ruídos do receptor (HAYKIN; MOHER, 2008). Essas perdas no canal são decorrentes dos efeitos dos fenômenos físicos responsáveis pela propagação das ondas eletromagnéticas, que são: reflexão, difração e dispersão e como elas reagem aos componentes do canal, como construções, rios, movimento, entre outros.

2.1.1 Reflexão

A reflexão é um fenômeno que ocorre quando uma onda de rádio que se propaga em um meio colide com outro meio que possui propriedades dielétricas diferentes, nessas condições a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida (RAPPAPORT, 2008). Como está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Fenômeno físico da reflexão.



Fonte: Rappaport (2008, p. 77).

O comportamento dos raios refletidos pode ser descrito com base em seu plano de incidência, ou superfície refletora, e o ângulo no qual a onda eletromagnética se choca com o plano de incidência. Na ocorrência da reflexão a relação entre a intensidade do campo elétrico incidente E_i e do campo elétrico refletido E_r e esta demonstrado na Eq. (1)

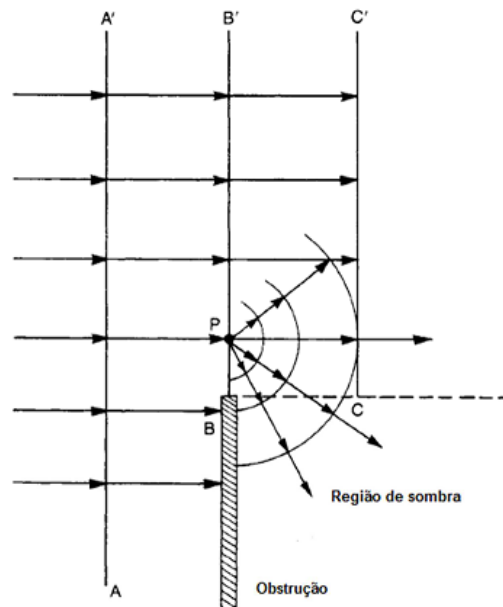
$$E_r = E_i \rho e^{j\psi} \quad (1)$$

onde ρ é a atenuação do campo elétrico e ψ é o fator de fase associado a reflexão (HAYKIN; MOHER, 2008).

2.1.2 Difração

A difração pode ser explicada através do princípio de Huygens que considera que todos os pontos de uma frente de onda podem ser considerados como fontes de onda. Esse fenômeno permite que sinais de rádio se propaguem ao redor de obstruções, e mesmo que o receptor se movimente em direção a região obstruída o campo de difração ainda é capaz de produzir um sinal útil (RAPPAPORT, 2008). Como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Fenômeno físico da difração.



Fonte: Freitas (2016, p. 29).

Para se calcular a perda de sinal decorrente da difração é necessário primeiro calcular o parâmetro de Fresnel-Kirchoff, o que pode ser feito por meio da Eq. (2) (HAYKIN; MOHER, 2008)

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_t + d_r)}{\lambda d_t d_r}} \quad (2)$$

em que λ é o comprimento de onda, h é a altura do obstáculo entre as antenas, d_t e d_r são as distâncias entre a antena transmissora e receptora até o obstáculo respectivamente.

E em posse do parâmetro v é possível calcular a mudança de fase do sinal ϕ , que é calculado segundo a Eq. (3) (RAPPAPORT, 2008).

$$\phi = \frac{\pi}{2}v^2 \quad (3)$$

Fazendo uso do parâmetro de Fresnel-Kirchoff é possível calcular a intensidade do campo eletromagnético no receptor, aqui chamado de E , como sendo a soma de todas as fontes secundárias de Huygens no plano acima da obstrução (HAYKIN; MOHER, 2008), esse método é conhecido como integral complexa de Fresnel, e está descrita na Eq. (4)

$$E = E_d \frac{1+j}{2} \int_v^\infty e^{-j\frac{\pi}{2}t^2} dt \quad (4)$$

em que E_d é a intensidade de campo elétrico da onda difratada.

2.1.3 Dispersão

A dispersão é normalmente utilizada para explicar o porquê de um sinal recebido normalmente possuir uma intensidade maior do que a prevista levando em consideração apenas a reflexão e a difração (RAPPAPORT, 2008). Esse fenômeno ocorre quando uma onda eletromagnética se choca contra uma superfície rugosa, onde a rugosidade possui um determinado grau de proporção com seu comprimento de onda, ou quando a superfície possui dimensões menores do que o comprimento de onda do sinal (SANTOS, 2019).

Segundo Cunha (2021) o fenômeno da dispersão pode ser causado desde de uma simples chuva até grandes edificações cujo a aspereza da parede a qual a onda incide atende ao critério de Rayleigh. que define a altura máxima das protuberâncias da superfície para um determinado ângulo de incidência, essa altura crítica pode ser obtida por meio da Eq. (5)

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \text{sen}(\theta_i)} \quad (5)$$

em que h_c é a altura máxima da protuberância para que a superfície seja considerada plana, λ é o comprimento de onda do sinal e θ_i é o angulo de incidência.

Caso a irregularidade seja maior do que h_c é necessário fazer um ajuste no parâmetro de reflexão, de modo que este parâmetro deve ser multiplicado por um fator ρ_s para que assim as perdas por dispersão sejam consideradas (RAPPAPORT, 2008). Segundo Ament (1953) a superfície pode ser considerada como uma variável aleatória que pode ser descrita por meio

de uma distribuição gaussiana, deste modo o fator de perdas por dispersão ρ_s pode ser obtido através da Eq. (6).

$$\rho_s = \exp \left[-8 \left(\frac{\pi \sigma_h \sin \theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (6)$$

em que σ_h é o desvio padrão da altura da superfície sobre a altura média da superfície.

2.2 Modelos de propagação em larga escala

Com o prévio conhecimento dos fenômenos relacionados a propagação de ondas eletromagnéticas é possível descrever matematicamente alguns modelos, esses modelos por sua vez podem ser caracterizados em duas grandes categorias, que são: os modelos de propagação em larga escala e os modelos de propagação em pequena escala.

Os modelos de perda de propagação em larga escala caracterizam o nível de sinal para transmissões por grandes distâncias (RAPPAPORT, 2008), alguns exemplos de modelos comuns na literatura são, o modelo de propagação no espaço livre, modelo de dois raios, log-distância, modelo de Okumura e modelo Longley-Rice.

2.2.1 Modelo de propagação no espaço livre

O modelo de propagação no espaço livre é usado para prever a intensidade do sinal recebido quando transmissor e receptor estão sob condição de linha de visão e sem nenhum obstáculo entre eles, e a potência recebida pelo receptor é dada segundo a equação de Friis, mostrada na Eq.(7) (RAPPAPORT, 2008).

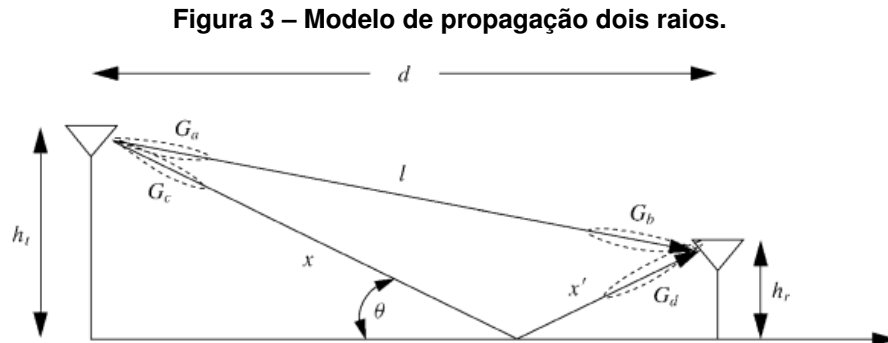
$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi^2 d^2 L} \quad (7)$$

em que P_r é a potência recebida pelo receptor, P_t é a potência do transmissor, G_t e G_r são os ganhos das antenas transmissora e receptora respectivamente, λ é comprimento de onda em metros, d é a distância entre transmissor e receptor e L é o fator de perda do sistema (RAPPAPORT, 2008). Pela análise da equação é possível perceber que a potência recebida pelo receptor, é diretamente proporcional ao ganho das antenas, a potência do transmissor e ao quadrado do comprimento de onda, e é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as antenas e ao fator de perda do sistema.

2.2.2 Modelo de propagação de dois raios

O modelo de dois raios se baseia na ótica geométrica, considerando um caminho direto e um caminho de propagação refletido no solo entre transmissor e receptor, conforme ilustra

a Figura 3. Esse modelo apresenta uma precisão maior para distâncias de vários quilômetros se comparado com o modelo de propagação no espaço livre (RAPPAPORT, 2008), conforme mostrado na Eq. (8).



Fonte: Goldsmith (2005, p. 35).

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (8)$$

em que P_r é a potência do receptor, P_t é a potência do transmissor h_t e h_r são as alturas do transmissor e receptor respectivamente e d é a distância entre transmissor e receptor.

Por meio da análise da Eq. (8) é possível perceber que a potência recebida pelo receptor situado a uma distância d do transmissor é inversamente proporcional à distância elevada a quarta potência, ou seja, -40 dB a cada dez metros, o que representa uma perda de percurso muito maior do que a experimentada no modelo de propagação no espaço livre (RAPPAPORT, 2008).

2.2.3 Modelo de perda de percurso log-distância

O modelo de perda de percurso log-distância considera que a perda da potência de um sinal transmitido por uma distância qualquer é expressa como uma função logarítmica da distância entre o transmissor e o receptor proporcional a um expoente de perda de percurso, n^1 (RAPPAPORT, 2008). Conforme mostrado na Eq. (9).

$$PL = PL(d_0) - 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (9)$$

Nesse modelo para o cálculo da perda de percurso PL , é necessário determinar uma distância de referência d_0 próxima ao transmissor e então medir a potência perdida nesse ponto $PL(d_0)$, a partir desse valor e conhecendo também o valor do expoente de perda de percurso n é possível calcular a potência perdida para qualquer distância d . Mais à frente na seção 4.1 será apresentada a metodologia de como obter o valor de n através de dados experimentais.

¹ No espaço livre n assume valores próximos a 2

2.2.4 Modelo de Okumura

O modelo de Okumura é um dos modelos mais utilizados para áreas urbanas, é aplicável a frequências que variam de 150 MHz a 1920 MHz e distâncias que podem variar de 1 Km a 100 Km (RAPPAPORT, 2008). Cujo o cálculo pode ser realizado por meio da Eq. (10)

$$PL = L_f + A_u(f,d) - G(h_t) - G(h_r) - G_{rea} \quad (10)$$

de modo que a Eq. (10) é um somatório da perda de propagação em espaço livre L_f medida em dB, com a atenuação mediana relativa ao espaço livre A_u , também medida em dB, menos os fatores de ganho relativo à altura das antenas transmissora $G(h_t)$ e receptora $G(h_r)$ e menos o ganho do ambiente G_{rea} , todos medidos em dB, que retorna a mediana da perda no caminho de propagação PL em dB (GOLDSMITH, 2005).

2.2.5 Modelo de Longley-Rice

O modelo de Longley-Rice é aplicado a sistemas de comunicação ponto a ponto na faixa de frequência de 40 MHz a 100 GHz. Nesse modelo a perda média de transmissão é prevista utilizando a geometria do percurso no terreno e a refratividade da troposfera (RAPPAPORT, 2008). Nesse modelo conforme mostra a Eq. (11) o sinal recebido por uma estação móvel é descrito como sendo a diferença do nível de sinal transmitido atenuado no espaço livre PL e o somatório das atenuações causadas pelas variáveis aleatórias $\delta_s Y_s$, $\delta_t Y_t$, $\delta_l Y_l$, tendo como resultado uma atenuação de referência P_{ref} (AMARAL, 2012)

$$P_{ref} = PL + \delta_s Y_s + \delta_t Y_t + \delta_l Y_l \quad (11)$$

em que $\delta_l Y_l$ é localização de estação móvel, e pode ser calculada segundo a Eq. (12) (AMARAL, 2012).

$$Y_l = \frac{10 k \Delta h(d)}{k \Delta h(d) + 13} \quad (12)$$

em que k é o número de onda e é calculado em função da frequência do sinal, de forma que $k = 2\pi f$, $\Delta h(d)$ é distância entre as estações calculada em função da irregularidade do terreno (AMARAL, 2012). E $\delta_s Y_s$ é a situação da estação móvel e pode ser calculada, através da Eq. (13) (AMARAL, 2012).

$$Y_s = 5 + 3 \exp\left(-\frac{d_e}{D}\right) \quad (13)$$

em que d_e é a distância entre as estações e D é a distância de referência, normalmente é adotado $D = 100$ Km (AMARAL, 2012). E $\delta_t Y_t$ é a condição de variabilidade tempo e é obtida através da análise gráfica da atenuação do sinal em relação ao tempo (AMARAL, 2012).

2.3 Propagação em pequena escala

Porém o sinal transmitido também pode sofrer rápidas flutuações em sua amplitude e fase, essas flutuações em geral são causadas por cópias do mesmo sinal que chegam ao receptor em tempos diferentes, e ocorrem durante curtos períodos de tempo e em distâncias pequenas demais para que os efeitos da atenuação em larga escala sejam levados em conta, por isso essas flutuações são chamadas de atenuação em pequena escala (RAPPAPORT, 2008).

Tendo em vista o comportamento aleatório que o sinal pode assumir em decorrência dos múltiplos percursos gerados por reflexões, difrações e dispersões, é necessário que se calcule a distribuição das potências recebidas. Com base nesse comportamento alguns modelos matemáticos foram desenvolvidos para descrever a natureza estatística das atenuações em pequena escala, dentre eles podemos citar as distribuições de Rayleigh, e Rician (GOLDSMITH, 2005). Ambas as distribuições levam em consideração a média da potência do sinal recebido $\overline{P_r}$ e a potência do envelope do sinal recebido aqui denominado como a variável z para efetuar o cálculo da função de densidade de probabilidades (PDF do inglês, Probability Density Function) $Pz(z)$ do envelope recebido (RAPPAPORT, 2008). A distribuição de Rayleigh é calculada conforme mostra a Eq. (14)

$$Pz(z) = \frac{2z}{\overline{P_r}} \exp \left[-\left(\frac{z^2}{\overline{P_r}} \right) \right] \quad (14)$$

De modo que a distribuição de Rayleigh é comumente usada para descrever sinais com atenuação gerada pelos multi-percursos que se comportam de maneira quase uniforme ou quando a atenuação é resultado de um envelope de percurso individual, ou seja, quando não há interferência de cópias refletidas ou difratadas do sinal (RAPPAPORT, 2008).

Já a distribuição de Rician, demonstrada na Eq. (15) é mais utilizada quando há um componente de sinal dominante, como por exemplo na situação de linha de visada.

$$Pz(z) = \frac{2z(K+1)}{\overline{P_r}} \exp \left[-K - \left(\frac{(K+1)z^2}{\overline{P_r}} \right) \right] I_0 \left(2z \sqrt{\frac{k(k+1)}{\overline{P_r}}} \right) \quad (15)$$

a Eq. (15) se difere da distribuição de Rayleigh por levar em consideração um parâmetro K definido como a razão entre a potência do sinal determinístico e a variância de múltiplos percursos (RAPPAPORT, 2008).

O parâmetro K é expresso em dB e pode ser calculado através da Eq. (16)

$$K = \frac{s^2}{\sum_{n=1}^N |E_n|^2} \quad (16)$$

em que E_n é a intensidade de campo elétrico no n -ésimo percurso e $s^2 = |E_0|^2$, onde E_0 é a intensidade principal de campo elétrico recebido, normalmente atribuído ao percurso de visada direta.

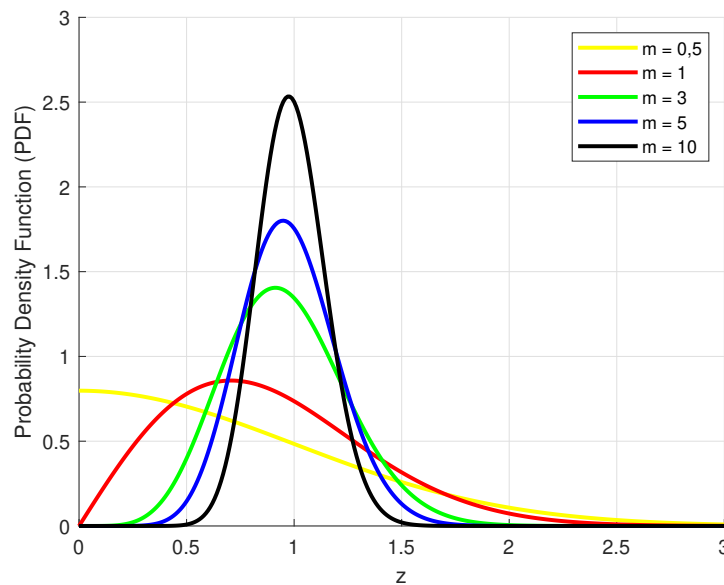
Através da análise do parâmetro K é possível determinar o nível de intensidade do desvanecimento, de modo que a medida que o fator K aumenta, a probabilidade de que ocorra um desvanecimento de forma mais intensa diminui, de modo que quando $K = 0$ a distribuição de Rician se torna igual a distribuição de Rayleigh (HAYKIN; MOHER, 2008).

2.3.1 Distribuição de Nakagami- m

Outro modelo que pode ser citado é a distribuição de Nakagami- m , demonstrada na Eq. 17, que foi deduzida por Minouro Nakagami através da análise de desvanecimento em propagações de altas frequências por longas distâncias (MELO; DANTAS, 2013).

Tendo em vista que alguns dados experimentais não se encaixam nas distribuições de Rayleigh e nem de Rician, o modelo de Nakagami- m possui parâmetros que podem ser ajustados para se adequarem as medições empíricas (GOLDSMITH, 2005). Conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Comparação entre valores de m no cálculo da função densidade de probabilidades calculada através da distribuição de Nakagami- m .



Fonte: Autoria própria (2022).

$$Pz(z) = \frac{2m^m z^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(\frac{-mz^2}{\Omega}\right) \quad (17)$$

em que Γ é a função gama do parâmetro m , e o valor do parâmetro Ω representa a energia total resultante dos multi-percursos e é obtido através da Eq. (18), mostrada a seguir

$$\Omega = E\{z^2\} \quad (18)$$

em que $E\{z^2\}$ é a esperança do quadrado dos sinais de potência recebidos. Enquanto que o valor de m pode ser ajustado afim de aproximar o sinal calculado do sinal obtido experimentalmente, de modo que quando $m = 1$ o resultado obtido é igual a distribuição de Rayleigh.

A determinação do parâmetro m é realizada através de métodos estatísticos, de modo que no presente trabalho foi utilizado o método descrito por Cheng e Beaulieu (2002), onde valor de m é calculado por meio da Eq. (19).

$$m = \frac{\mu_{\frac{1}{p}}\mu_2}{\mu_{2+\frac{1}{p}} - \mu_{\frac{1}{p}}\mu_2} \quad (19)$$

em que p é a p -ésima raiz do dado utilizado para o cálculo e μ é o momento amostral dos dados coletados, de modo que os diferentes valores de μ podem ser calculados através da Eq. (20).

$$\mu_k = \frac{\sum_{i=1}^N h_i^k}{N} \quad (20)$$

onde N é o valor total de amostras, i diz respeito a i -ésima amostra e k é o momento amostral de interesse, de modo que a Eq. (20) deve ser calculada para $k = \frac{1}{p}$, $k = 2$ e $k = 2 + \frac{1}{p}$, de modo que sejam calculados todos os elementos da Eq. (19). Segundo Cheng e Beaulieu (2002) esse método é uma aproximação mais precisa do que a descrita por Abdi e Kaveh (2000) que depende apenas de Ω e da variância dos dados coletados, conforme mostra a Eq. (21).

$$m = \frac{\Omega^2}{\sigma^2(h^2)} \quad (21)$$

onde, $\Omega = 1$ para este estudo e σ^2 é a variância dos quadrados dos elementos do vetor h .

Segundo Cao e Beaulieu (2005) quanto maior o valor do parâmetro m mais simétrica, e menos espalhada se torna a distribuição Nakagami- m de modo a se assemelhar a distribuição gaussiana para valores de m muito elevados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente trabalho foi adotada uma metodologia que une os conceitos teóricos à experimentação prática de modo a possibilitar a comparação de resultados obtidos de ambas as formas, para que assim seja possível comprovar a eficiência e precisão do modelo log-distância na implementação de redes de comunicação sem fio sob as condições com e sem linha de visada.

O modelo log-distância foi escolhido devido a sua simplicidade matemática, além da possibilidade de ser aplicado em ambientes tanto dentro de edificações quanto em ambientes externos.

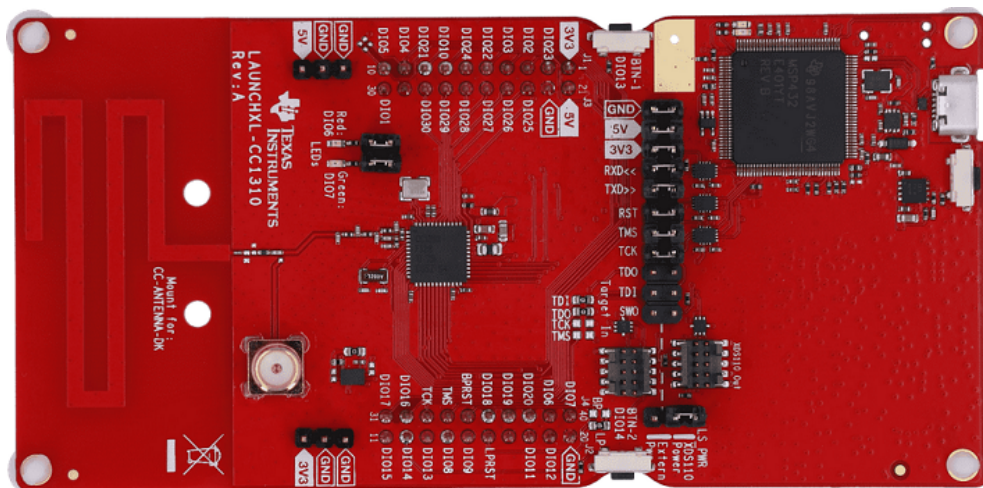
De mesma maneira, afim de que fosse demonstrado o comportamento do canal sob influência de vários obstáculos se movendo foi adotado o modelo de desvanecimento em pequena escala Nakagami- m , devido a sua maior precisão quando comparado aos modelos de Rayleigh e Rician.

3.1 Materiais utilizados para as medições

3.1.1 Kit de Desenvolvimento

O ambiente de simulação utilizado, consiste em dois kits de desenvolvimento LAUNCHXL-CC1310®, que está ilustrado na Figura 5, desenvolvido pela empresa Texas Instruments, que conta com um módulo transceptor sub-1GHz CC1310®, possui uma memória RAM de 28 kB, um processador Arm-Cortex-M3®, uma sensibilidade de recepção de -124 dBm, potência máxima de transmissão de 15 dBm e tem capacidade de operação em temperaturas que variam desde -40 °C a 85 °C (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

Figura 5 – Visão superior do kit LAUNCHXL - CC1310®.



Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2022a, p. 1).

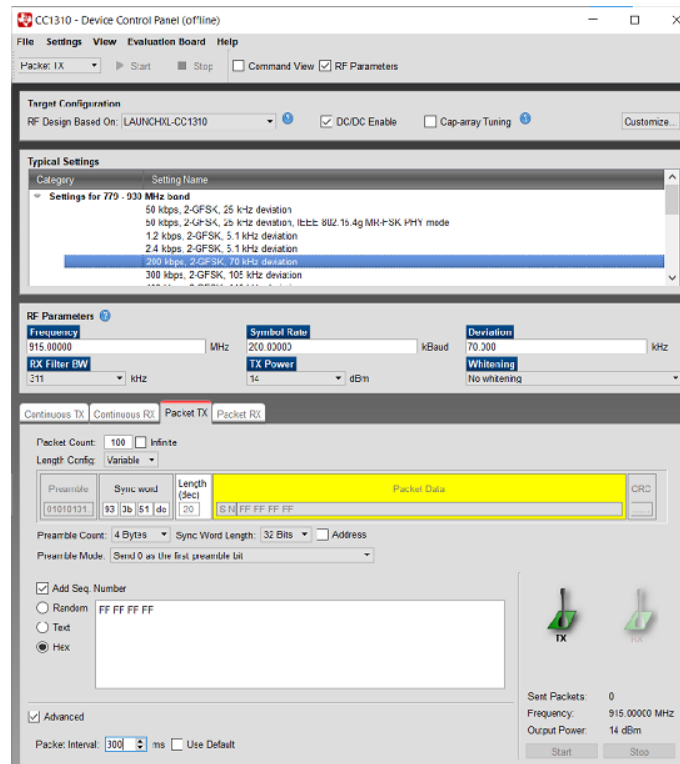
Esse kit de desenvolvimento possui um módulo transceptor da família CCxxxx, que é a mesma família dos utilizados nos trabalhos de Sandoval *et al.* (2017) que utiliza os transceptores CC1000 para aplicações sub-1 GHz e CC2420 para aplicações de 2,4 GHz e Schlichting (2020) que usa o módulo CC1350 que se trata de um transceptor para aplicações sub-1 GHz. Esse módulo é recomendado para aplicações em sistemas sem fio de baixa potência podendo ser utilizado em automações residenciais e prediais, sistemas de segurança, sistemas de controle industrial, aplicações em smart grids, entre outras aplicações (TEXAS INSTRUMENTS, 2018).

3.1.2 SmartRF Studio 7

O software SmartRF® Studio 7, desenvolvido pela empresa Texas Instruments, apresenta uma interface amigável onde é possível estabelecer os parâmetros tanto do transmissor como do receptor para qualquer kit de desenvolvimento baseado nos módulos transceptores CCxxxx de maneira facilitada, permitindo que o projetista salve os dados obtidos em uma planilha do Excel® para tratamento posterior.

A interface de programação do transmissor está ilustrada na Figura 6, onde é possível estabelecer as configurações de desvio, taxa de símbolos, frequência, modulação, potência da antena transmissora, assim também como a mensagem que está sendo enviada, também é possível definir o tempo de intervalo entre a transmissão de cada pacote.

Figura 6 – Configuração do transmissor no software SmartRF Studio 7®.



Fonte: Adaptado de Texas Instruments (2022b, p. 1).

A tela de configuração do receptor, apresenta as configurações de desvio, taxa de símbolos, frequência e modulação que serão recebidos pelo equipamento receptor, com o acréscimo de uma caixa de texto onde são apresentados os dados de potência média do sinal recebido, quantidade de pacotes recebidos ou não recebidos, pacotes que apresentam algum erro em sua mensagem e também as taxas de erro de pacotes e bits.

Devido a sua facilidade de operação este software é muito útil para testes iniciais e para a determinação de configurações iniciais para canais de comunicação sem fio (SCHLICHTING, 2020).

3.1.3 Matlab®

Outro software utilizado no presente trabalho foi o Matlab®, desenvolvido e distribuído pela empresa Mathworks®, cuja a UTFPR disponibiliza licença gratuitamente para docentes e discentes, esse software foi utilizado para o tratamento matemático dos dados obtidos, tanto para os experimentos de propagação em larga escala, quanto para o cálculo do desvanecimento em pequena escala, de modo que os dados coletados que haviam sido armazenados em planilhas foram exportados para o código por meio da função "xlsread()", para o cálculo da média e desvio padrão foram utilizadas as funções "mean()" e "std()" respectivamente, também foram usadas as funções "hist()" e "fitdist()" para a análise da distribuição de Nakagami- m conforme descrito na seção 4.2

3.2 Metodologia de obtenção de dados

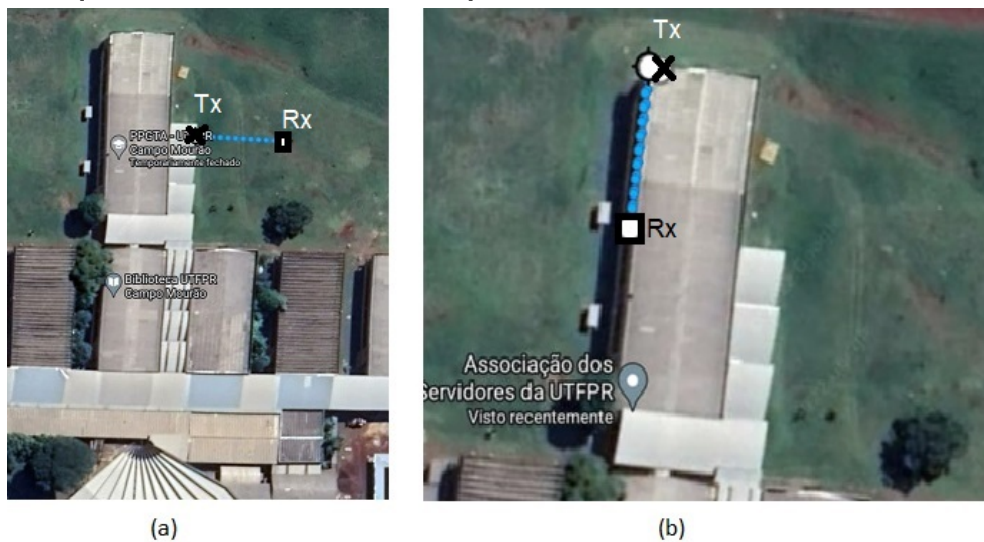
3.2.1 Propagação em larga escala

Para a determinação dos coeficientes de perda de propagação utilizou-se o kit de desenvolvimento LAUNCHXL-CC1310® em conjunto com o software SmartRF Studio 7®, onde foi transmitido um total de 7.000 amostras para a condição de visada direta, divididas em 7 pontos de coleta, sendo que em cada ponto foram coletados 1000 pacotes com um intervalo de tempo de 300 ms entre cada pacote, tempo esse sugerido por Ahmed *et al.* (2019). Da mesma forma, foram coletadas 7.000 amostras em um cenário sem linha de visada, divididas em 7 pontos de coleta, sendo que em cada ponto foram coletados 1000 pacotes com um intervalo de 300 ms entre cada pacote, e para o estudo da propagação em pequena escala foram coletadas 1000 amostras também com um intervalo de 300 ms entre cada uma, mantendo as configurações do equipamento transmissor e do receptor.

Para o estudo de propagação sob a condição de linha de visada foram efetuadas medidas a uma distância de meio comprimento de onda que será considerada como medida de referência e após isso foram coletadas amostras a 5, 10, 15, 20, 25 e 30 metros do transmissor

seguindo a metodologia de Sandoval *et al.* (2017), esses pontos de coleta estão situados no pátio do campus da UTFPR na cidade de Campo Mourão, como ilustrado na Figura 7a.

Figura 7 – Local onde foi realizada a coleta de dados. A marcação X identifica o rádio transmissor e o quadrado identifica o rádio receptor.



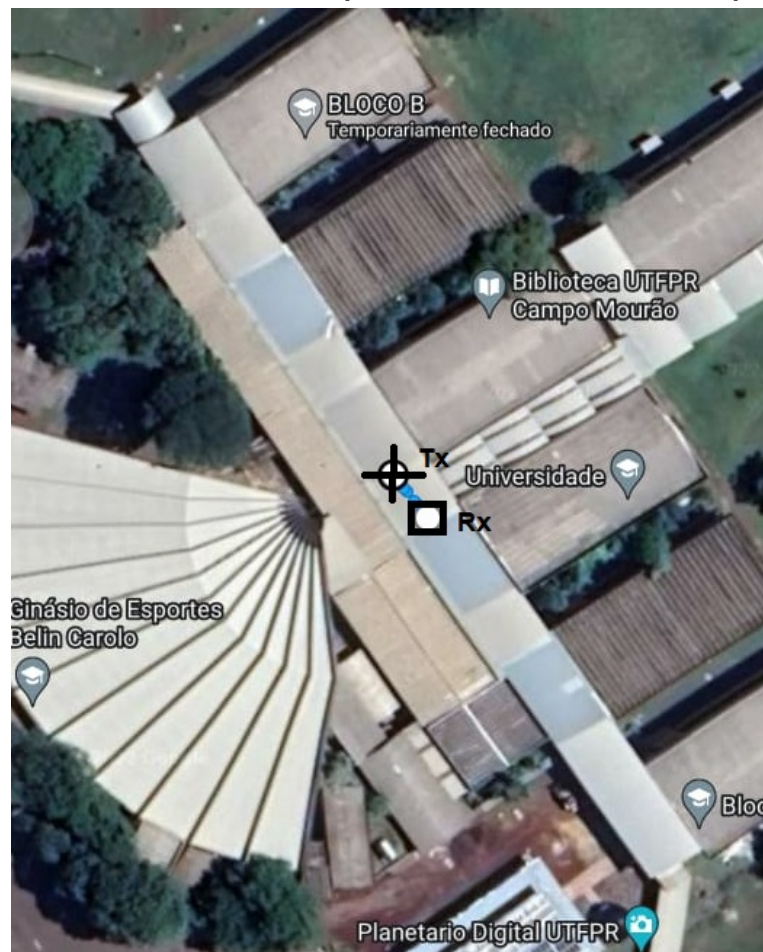
Fonte: Adaptado de Google Maps (2022).

Já para a condição sem linha de visada, foi adotado como referência a intensidade de sinal detectado pelo receptor a uma distância de 1 m após o início da parede, de modo que a distância do transmissor até o término da parede permaneceu 1 m, enquanto o receptor variou sua distância em 5, 10, 15, 20, 25 e 30 metros em relação ao obstáculo, também situado no pátio do campus da UTFPR na cidade de Campo Mourão, como ilustrado na Figura 7b.

3.2.2 Propagação em pequena escala

Para a coleta de dados para o experimento de atenuação em pequena escala a coleta de dados foi realizada com transmissor e receptor situados no corredor principal no pátio da UTFPR separados por uma distância fixa de 10 metros, como mostra a Figura 8, por um período de 9 minutos, durante o horário do intervalo que tem início às 15:30, e em local estratégico, cobrindo o espaço ao qual alguns alunos utilizam para efetuar venda de doces caseiros, desse modo garantindo que diversos alunos transitem entre os equipamentos de medição, visando assim obter o maior número de obstáculos em movimento.

Figura 8 – Coleta de dados desvanecimento de propagação em pequena escala. A marcação X identifica o rádio transmissor e o quadrado identifica o rádio receptor.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2022).

4 RESULTADOS

4.1 Log-distância

Com os valores dos indicadores de força do sinal recebido (RSSI do inglês, Received Signal Strength Indicator) dos pacotes foi calculada média aritmética simples dos 1000 pacotes, através da função "mean()" no software Matlab® para se obter a intensidade média do sinal recebido para as condições com e sem linha de visada, assim também como o desvio padrão para cada um dos pontos de coleta de dados, que foi calculado fazendo uso da função "std()".

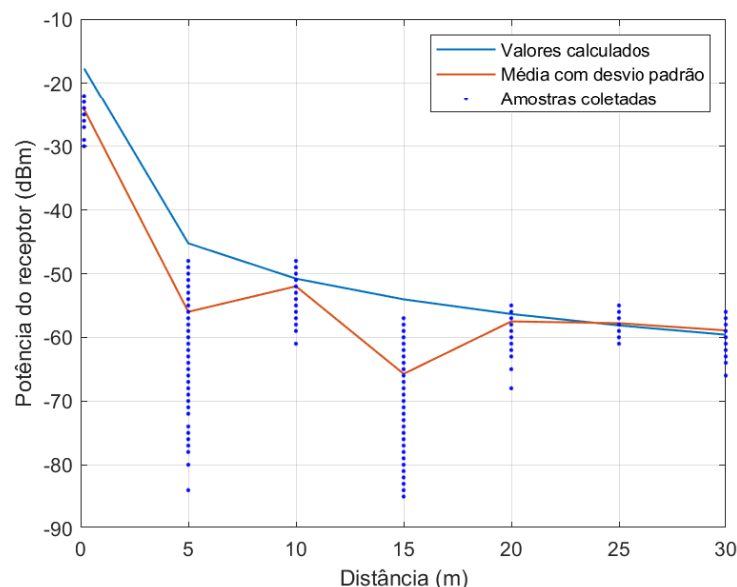
Com o valor médio de RSSI medido em cada ponto foi possível calcular o coeficiente de perda de propagação n para as duas condições por meio do erro quadrático médio do sinal (MSE do inglês, *Mean Square Error*) demonstrado na Eq. (22) (GOLDSMITH, 2005).

$$MSE = \sum_{q=1}^7 (\overline{RSSI}_q - RSSI_{calculado})^2 \quad (22)$$

onde q indica a qual dos sete pontos de coleta a média pertence. Dessa forma foi possível determinar o valor do coeficiente de perda de propagação n para duas antenas sob condição de linha de visada e sem linha de visada.

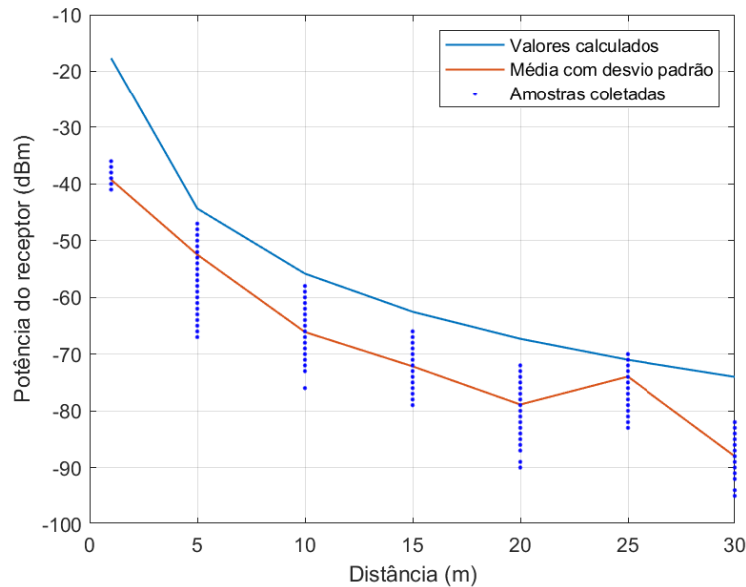
Por meio do cálculo da MSE foi possível chegar a um coeficiente de perda de propagação n para a condição de linha de visada de 1,841 e para a condição sem linha de visada e com sombreamento foi de 3,778. Com o valor dos coeficientes obtidos foi possível calcular os valores teóricos, para fins de comparação com os dados experimentais, que pode ser feita através da análise dos gráficos mostrados nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Comparativo entre valores empíricos e teóricos para a condição com linha de visada.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 10 – Comparativo entre valores empíricos e teóricos para a condição sem linha de visada.



Fonte: Autoria própria (2022).

Nas Figuras 9 e 10 os valores teóricos estão demonstrados por meio da linha azul, de modo semelhante as médias dos dados experimentais estão traçadas em laranja, enquanto que os valores de RSSI das amostras coletadas estão demonstradas no gráfico por meio dos pontos azuis.

Pela análise dos gráficos percebe-se que o modelo de propagação log-distância tem um menor desvanecimento para a condição onde as antenas estão em linha de visada enquanto que para a condição sem linha de visada há uma diferença entre os valores calculados e medidos, essa diferença se deve ao fato desse modelo de propagação não levar em conta efeitos físicos como reflexão e difração, ao baixo número de amostras, e também ao fato do ambiente não ser amplamente controlado.

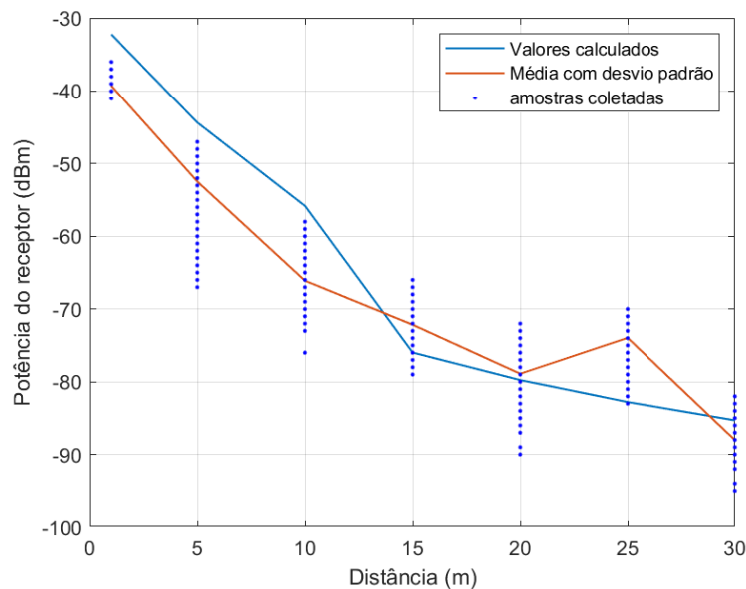
Para a condição sem linha de visada, tendo em vista as características físicas do obstáculo entre as antenas, foi avaliado o efeito físico da difração. Para o cálculo das perdas de sinal em decorrência da difração, primeiro é preciso encontrar o parâmetro de Fresnel-Kirchhoff, que pode ser calculado pela Eq. (2).

Em posse do valor de v , é necessário efetuar o cálculo da integral complexa de Fresnel para cada distância analisada, porém segundo Goldsmith (2005) esse cálculo é muito complexo e segundo Rappaport (2008) não existem soluções analíticas para essa integral. Tendo isso em mente a perda por difração foi calculada através das aproximações desenvolvidas por Lee, que se mostram próximas do que se é observado na prática, o conjunto das aproximações estão descritas na Eq. (23) (GOLDSMITH, 2005).

$$L(v) = \begin{cases} 20 \log(0.5 - 0.62v) & \text{para } v < 0 \\ 20 \log(0.5e^{0.95v}) & \text{para } 0 < v < 1 \\ 20 \log(0.4 - \sqrt{0.1184 - 0.38 - 0.1v}) & \text{para } 1 < v < 2.4 \\ 20 \log(0.225/v) & \text{para } 2.4 < v \end{cases} \quad (23)$$

em que a atenuação varia em função do parâmetro v , de modo que o valor de v define qual equação do conjunto será utilizada. Com a perda por difração calculada para cada ponto de coleta e inserida no cálculo do modelo log-distância foi possível obter valores mais próximos dos valores empíricos, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Log-distância com perdas por difração.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 Nakagami- m

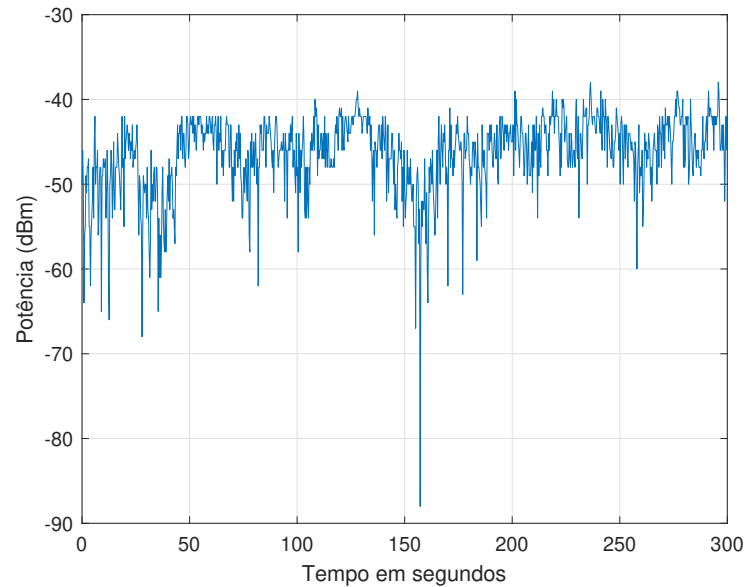
Através do método descrito na subseção 3.2.2 - Propagação em pequena escala, foi possível obter um sinal com características aleatórias como pode ser visualizado no gráfico apresentado na Figura 12.

Para à análise da propagação em pequena escala primeiro foi necessário converter os dados de potência que estavam dBm para watts, essa conversão foi feita por meio da Eq. (24)

$$P_W = 10^{\frac{P_{dBm}}{10}} \quad (24)$$

onde P_W é a potência em watts e P_{dBm} é a potência recebida em dBm.

Figura 12 – Valores de RSSI obtidos.



Fonte: A autoria própria (2022).

Em posse dos valores de potência em Watts foi efetuada a média aritmética simples das 1000 amostras e então foi calculado o valor do desvanecimento, aqui chamado de h , o valor do parâmetro h foi calculado para cada uma das amostras conforme mostra a Eq. (25) (SCHLICHTING, 2020).

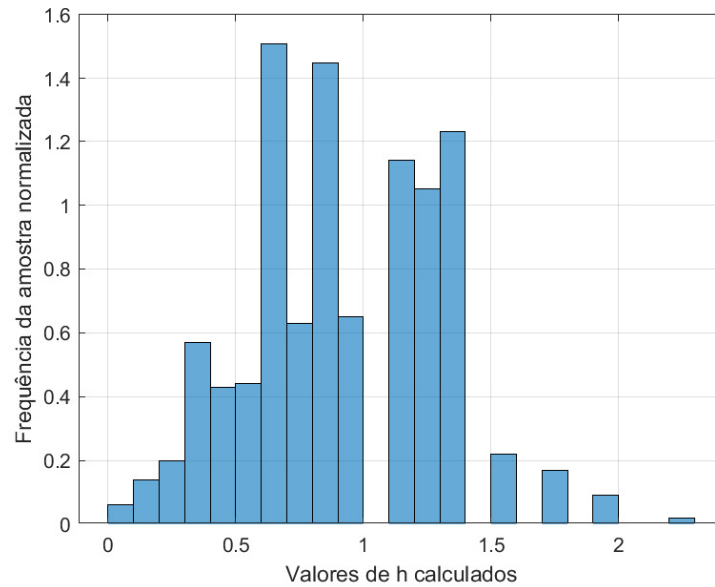
$$h_n = \sqrt{\frac{RSSI_n}{RSSI_{med}}} \quad (25)$$

em que o h_n diz respeito ao desvanecimento da n -ésima amostra recebida. Após efetuado o cálculo, os valores obtidos são agrupados em um vetor h e então foi gerado um histograma através da função "hist()" no Matlab®, conforme sugerem Ferreira, Ortiz e Costa (2019), esse processo retornou o gráfico apresentado na Figura 13, onde observa-se o gráfico de frequências normalizadas, de modo que é possível observar a ausência de dados em múltiplos intervalos, isso se deve a baixa quantidade de amostras.

Com a visualização do histograma é possível ter uma ideia de como ficará a curva da distribuição das potências recebidas, porém para encontrar a distribuição de Nakagami- m é preciso calcular o valor de m e o valor de Ω , esses valores podem ser obtidos facilmente no Matlab através da função "fitdist()", que calcula esses parâmetros com base nos valores do vetor h , para esse experimento os resultados encontrados foram de $m = 1,49$ e $\Omega = 1$, aplicando esses valores na Eq. (17) é possível obter a PDF do sinal que pode ser visualizado em laranja na Figura 14.

Para fins de comparação, o parâmetro m também foi calculado utilizando a metodologia de Cheng e Beaulieu (2002). Através do uso da Eq. (19) foi calculada a distribuição de Nakagami- m , mostrada em vermelho no gráfico da Figura 14.

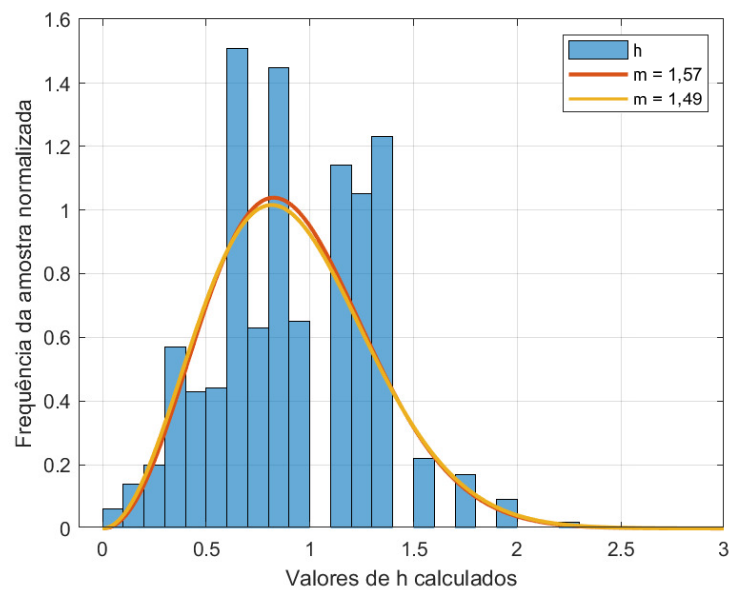
Figura 13 – Histograma com a distribuição das potências obtidas através da Eq. (25).



Fonte: Autoria própria (2022).

Após efetuado o cálculo das distribuições foi possível plotar o gráfico mostrado na Figura 14 onde as funções de probabilidade geradas para os valores de m calculados para que assim ficasse mais fácil realizar a comparação e estabelecer qual método se aproxima mais da distribuição de potências encontrada na prática.

Figura 14 – Comparação entre as funções de densidade geradas pelo método "fitdist()", pela Eq. (19) e o histograma das amostras geradas pela Eq. (25).



Fonte: Autoria própria (2022).

Através da análise do gráfico apresentado na Figura 14 é possível ver a proximidade entre os valores obtidos pelos dois métodos, de modo que, quanto maior o número de amostras mais próximos esses valores seriam.

5 CONCLUSÃO

Devido ao desafio que a caracterização de um canal sem fio pode apresentar o presente trabalho trouxe como objetivo a realização de um levantamento das características do canal de forma prática e objetiva de modo que os valores obtidos possam ser usados como exemplos em aulas de comunicação sem fio e os experimentos realizados possam ser replicados em aulas praticas na disciplina de comunicação sem fio, seguindo o roteiro descrito na sessão 3.2- Metodologia de obtenção de dados de modo a contribuir com o aprendizado e vivencia prática dos alunos.

Outro objetivo pretendido foi o de estimar os coeficientes de perda de propagação para a cidade de Campo Mourão no Paraná, de modo que os dados obtidos com o presente trabalho possam ser usados em futuras aplicações de modo a agilizar o processo de implementação de sistemas de comunicação sem fio em áreas mais distantes do centro. Neste trabalho foi apresentado uma metodologia de determinação do coeficiente de perda de percurso para o modelo de propagação log-distância, por meio de medições de intensidade de sinal, em situações com e sem linha de visada. Tal procedimento possibilitou a comparação entre valores calculados e medidos, apontando desvios padrões médios de 2,07 e 2,40 respectivamente, e valores dos expoentes de perda de percurso de 1,841 e 3,778 respectivamente.

Outro objetivo foi o de estabelecer uma forma simplificada de realizar o levantamento da PDF de sinais em pequena escala, pois esses dados são de extrema importância para a implementação de sistemas móveis de comunicação, no presente trabalho foram utilizados dois métodos diferentes, que apresentaram valores de m próximos, porém casos com maiores quantidades de dados devem ser analisados em trabalhos futuros, de modo a minimizar as regiões de pico visualizadas no histograma apresentado na Figura 13, afim de verificar como o aumento do numero de amostras influencia os valores de m .

De maneira geral o presente trabalho apresentou e testou metodologias para levantamento de algumas características de canais de comunicação sem fio de maneira simples e objetiva, o que possibilita que os métodos descritos neste trabalho sejam replicados por alunos e engenheiros que necessitem realizar o levantamento desses dados seja em âmbito acadêmico ou profissional.

Não foram abordadas nesse trabalho questões como a influência das modulações nos expoentes de perda de percurso, de modo que os dados apresentados aqui foram obtidos utilizando apenas a modulação GFSK, permitindo que em trabalhos futuros outras modulações possam ser utilizadas afim de que sejam efetuadas comparações como por exemplo a taxa de erro de bit. De mesma maneira não foi efetuado o cálculo do link budget do sistema, tendo em vista que para as condições sob as quais foram realizados os testes não houveram perdas significativas de bits e nem bits com erro na transmissão, possibilitando que em trabalhos futuros os testes sejam feitos.

REFERÊNCIAS

- ABDI, A.; KAVEH, M. Performance comparison of three different estimators for the nakagami m parameter using monte carlo simulation. **IEEE Communications Letters**, v. 4, p. 119–121, 2000.
- ABINC. **IoT: até 2025, mais de 27 bilhões de dispositivos estarão conectados**. 2022. ABINC. Disponível em: <https://abinc.org.br/iot-ate-2025-mais-de-27-bilhoes-de-dispositivos-estarao-conectados/>. Acesso em: 15 de out. de 2022.
- AHMED, A. U. *et al.* Nakagami-m distribution of rssi in shadowing pathloss model for indoor localization. *In: 2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- AMARAL, C. T. **Uma Análise do Modelo de Propagação Longley-Rice sob a perspectiva de Ambientes Urbanos Localizados em Area de Clima Tropical**. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- AMENT, W. S. Toward a theory of reflection by a rough surface. **Proceedings of the IRE**, v. 41, n. 1, p. 142–146, 1953.
- ANATEL. Resolução nº 680, de 27 de junho de 2017. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680#tabelal>.
- ANATEL. Resolução nº 715, de 23 de outubro de 2019. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2019/1350-resolucao-715#art3>.
- ANATEL. Resolução nº 720, de 10 de fevereiro de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2020/1382-resolucao-720#art32>.
- ANATEL. Resolução nº 740, de 21 de dezembro de 2020. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2020/1497-resolucao-740>.
- ANZUM, R. *et al.* A multiwall path-loss prediction model using 433 mhz lora-wan frequency to characterize foliage's influence in a malaysian palm oil plantation environment. **Sensors**, v. 22, n. 14, 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/14/5397>.
- BRASIL. Lei nº 9472, de 26 de julho de 1997. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9472.htm.
- BRASIL. **Lei nº 14108, de 16 de dezembro de 2020**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=17/12/2020&jornal=515&pagina=3&totalArquivos=354>.
- BYRA, M. *et al.* Correcting the influence of tissue attenuation on nakagami distribution shape parameter estimation. *In: 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4.

- CAO, L.; BEAULIEU, N. A simple efficient method for generating independent nakagami-m fading samples. *In: 2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 44–47 Vol. 1.
- CHENG, J.; BEAULIEU, N. Generalized moment estimators for the nakagami fading parameter. **IEEE Communications Letters**, v. 6, n. 4, p. 144–146, 2002.
- CUNHA, M. P. **Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz**. jul. 2021. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, Niterói, jul. 2021.
- FERREIRA, A. E.; ORTIZ, F. M.; COSTA, L. Caracterização de disrupções na faixa ISM de 900 mhz em ambiente de floresta. *In: .* [S.l.: s.n.], 2019.
- FREITAS, P. R. d. **Desenvolvimento de uma metodologia de parametrização e ajuste do modelo de propagação de RF standard propagation model-SPM, em ambiente outdoor, para sistemas de comunicação móvel limitados privados de missão e de infraestrutura críticas**. Curitiba: [s.n.], 2016.
- GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. New York, USA: Cambridge University Press, 2005.
- GOOGLE MAPS. **Google Maps**. 2022. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-24.0614306>.
- GOVERNO FEDERAL. **Por que a Anatel homologa equipamentos de telecomunicações**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/fiscalizacao/combate-a-pirataria/objetivos-da-certificacao-por-que-a-anatel-homologa-equipamentos-de-telecomunicacoes>. Acesso em: 08 de out. de 2022.
- HAYKIN, S.; MOHER, M. **Sistemas modernos de comunicação wireless**. Porto Alegre, Brasil: Bookman Editora, 2008.
- IBGE. **Pesquisa Anual de Serviços**. 2020. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/2623#resultado>. Acesso em: 01 de out. de 2022.
- LU, J.-h.; HAN, Y. Application of multipath shape factors in nakagami-m fading channel. *In: 2009 International Conference on Wireless Communications Signal Processing*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4.
- MAHMOOD, T.; MOHAMED, W. Q.; IMRAN, O. A. Factors influencing the shadow path loss model with different antenna gains over large-scale fading channel. *In: 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Mechatronics Systems (AIMS)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–5.
- MEDEIROS, J. C. D. O. **Princípios de telecomunicações: Teoria e pratica**. São Paulo, Brasil: Érica, 2016.
- MELO, P. K. P.; DANTAS, E. C. S. **Modelo de Desvanecimento de Nakagami para Canais de Comunicações Móveis**. 2013. BibliotekeVirtual. Disponível em: <http://www.bibliotekevirtual.org/simposios/ENCOM2013/encom2013-a01.pdf>. Acesso em: 01 de out. de 2022.
- POPOVIC, H. *et al.* Some statistical characteristics of nakagami-m distribution. *In: 2007 8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 509–512.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: Princípios e práticas**. São Paulo, Brasil: Bookman Editora, 2008.

ROCHA, L. **Landell de Moura: conheça o padre brasileiro que inventou o rádio**. 2022. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/landell-de-moura-conheca-o-padre-brasileiro-que-inventou-o-radio/>. Acesso em: 28 de set. de 2022.

ROCHA, L. **No Bicentenário da Independência, destaque para os 100 anos do rádio no Brasil**. 2022. CNN Brasil. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/no-bicentenario-da-independencia-destaque-para-os-100-anos-do-radio-no-brasil/>. Acesso em: 28 de set. de 2022.

SANDOVAL, R. M. *et al.* Evaluating the more suitable ism frequency band for iot-based smart grids: A quantitative study of 915 mhz vs. 2400 mhz. **Sensors**, v. 17, n. 1, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/1/76>.

SANTOS, A. B. C. **Caracterização de canal em banda estreita nas faixas de 900 MHz e 2,4 GHz em áreas de vivência com predominância de vegetação para projetos de parques digitais**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019.

SCHLICHTING, L. **Atividades de Laboratório de Comunicações sem Fio com Launchpad CC1350**. 2020. 61 p. Monografia (Graduação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SOUZA, R. A. A. de; YACOUB, M. D. On the multivariate nakagami-m distribution with arbitrary correlation and fading parameters. *In: 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 812–816.

SPARCCAQUERCHE, P. **IoT é o futuro das novas tecnologias, diz ABINC**. 2022. ABINC. Disponível em: <https://abinc.org.br/iot-e-o-futuro-das-novas-tecnologias-diz-abinc/>. Acesso em: 15 de out. de 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. **CC1310 SimpleLink™ Ultra-Low-Power Sub-1 GHz Wireless MCU**. Dallas, Estados Unidos da América, 2018. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1310.pdf>. Acesso em: 18 de maio de 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. **LAUNCHXL-CC1310 Evaluation board | TI.com**. 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-CC1310#overview>.

TEXAS INSTRUMENTS. **SMARTRFSTM-STUDIO Calculation tool | TI.com**. 2022. Disponível em: <https://www.ti.com/tool/SMARTRFSTM-STUDIO#tech-docs>.

WOJCICKI, P. *et al.* Estimation of the path-loss exponent by bayesian filtering method. **Sensors**, v. 21, n. 6, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/1934>.