



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE DOUTORADO**

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

**MODELO DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA APLICAÇÕES DE
INTERNET DAS COISAS E TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DE
INFORMAÇÃO E ENERGIA PARA AMBIENTES INTERNOS**

CAMPINA GRANDE

2022

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

**MODELO DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA APLICAÇÕES DE INTERNET
DAS COISAS E TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DE INFORMAÇÃO E ENERGIA
PARA AMBIENTES INTERNOS**

Tese de Doutorado Submetida ao Programa da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Linha de Pesquisa: Eletrônica e Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Glauco Fontgalland

CAMPINA GRANDE

2022

©Alexandre Henrique Soares de Oliveira – alexandre.oliveira@ee.ufcg.edu.br

O48m Oliveira, Rodrigo de Almeida.

Modelo de perdas de propagação para aplicações de internet das coisas e transmissão simultânea de informação e energia para ambientes internos / Alexandre Henrique Soares de Oliveira. – Campina Grande, 2023.

113 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Glauco Fontgalland".

Referências.

1. Fluxo de rede multicomódite. 2. Internet das coisas. 3. Modelos de propagação. 4. Transmissão simultânea de informação e energia. I. Fontgalland, Glauco. II. Título.

CDU 004.451(043)

**MODELO DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA APLICAÇÕES DE
INTERNET DAS COISAS E TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DE
INFORMAÇÃO E ENERGIA PARA AMBIENTES INTERNOS**

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

TESE APROVADA EM 16/09/2022

**GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador(a)**

**WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG
Examinador(a)**

**MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG
Examinador(a)**

**NUNO BORGES CARVALHO, Dr., Universidade de Aveiro
Examinador(a)**

**HUMBERTO DIONÍSIO DE ANDRADE, Dr., UFERSA
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 16 DE SETEMBRO DE 2022 (nº352)

CANDIDATO: **ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA**. COMISSÃO EXAMINADORA: WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG, Presidente da Comissão e Examinador Interno, GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG, Orientador, MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG, Examinador Interno, NUNO BORGES CARVALHO, Dr., Universidade de Aveiro, HUMBERTO DIONÍSIO DE ANDRADE, Dr., UFERSA, Examinadores Externos. TÍTULO DA TESE: MODELO DE PERDAS DE PROPAGAÇÃO PARA APLICAÇÕES DE INTERNET DAS COISAS E TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DE INFORMAÇÃO E ENERGIA PARA AMBIENTES INTERNOS. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Informação. HORA DE INÍCIO: **16:30** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito EM EXIGÊNCIA, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo de 90 dias. Face à aprovação, declara o(a) presidente da Comissão, achar-se o(a) examinado(a), após o cumprimento das referidas exigências, legalmente habilitado(a) a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Filipe Emmanuel Porfírio Correia, e os membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande, 16 de Setembro de 2022.

Filipe Emmanuel Porfírio Correia

Secretário

WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc.,
Presidente da Comissão e Examinador Interno

GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG,
Orientador

MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG

Examinador Interno

NUNO BORGES CARVALHO, Dr., Universidade de Aveiro

Examinador Externo

HUMBERTO DIONÍSIO DE ANDRADE, Dr., UFERSA

Examinador Externo

ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA

Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado do candidato ALEXANDRE HENRIQUE SOARES DE OLIVEIRA, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **FILIFE EMMANUEL PORFIRIO CORREIA, SECRETÁRIO (A)**, em 14/10/2022, às 15:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WAMBERTO JOSE LIRA DE QUEIROZ, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/10/2022, às 16:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GLAUCO FONTGALLAND, PROFESSOR 3 GRAU**, em 27/10/2022, às 01:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Henrique Soares de Oliveira, Usuário Externo**, em 07/05/2023, às 19:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2835357** e o código CRC **174EE3C3**.

Aos meus avós Antonio Soares da Silva (in memoriam), Francisca Lopes da Silva (in memoriam), João Batista de Oliveira (in memoriam), Maria Madalena de Oliveira (in memoriam) e ao meu tio Jonas Batista de Oliveira (in memoriam) e por aqueles de se foram, mas fizeram parte da minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos, entre elas as dificuldades que trazem ensinamentos, crescimento e humildade.

Agradeço aos meus pais, Antonia Dalva, minha mãe, pelo exemplo de trabalho e perseverança, amor e cuidado. Ao meu pai Jacinto Evandro. Às minhas irmãs Anna Kézia e Anna Raquel.

Agradeço a minha esposa Maria Gabrielle, por todo o companheirismo e cumplicidade, sem seu apoio nada disso seria possível e a jornada teria sido muito mais solitária. Diz o ditado que se quer ir rápido vá sozinho, mas se quer ir longe vá acompanhado. Não poderia ter encontrado uma companhia melhor para minha jornada. Sou grato por todos os caminhos que tive que percorrer para chegar até você, e à Universidade Federal de Campina Grande, por indiretamente ter nos unido.

Agradeço a meu orientador, Prof. Dr. Glauco Fontgalland, por ter aberto as portas do seu laboratório, por me orientar durante o desenvolvimento desse doutorado, pelos ensinamentos, atenção, disponibilidade e toda a confiança. Por todas as oportunidades que me foram ofertadas e por confiar e permitir o desenvolvimento desse doutorado, enquanto atuo no mercado de trabalho.

Ao Prof. Dr. Humberto Dionísio de Andrade, que desde o mestrado é um exemplo de profissional, agradeço pelos caminhos e oportunidades apresentados, por todas as disponibilidades, atenção e orientações.

Ao Prof. Dr. Wamberto José Lira de Queiroz, por toda a disponibilidade, sugestões e críticas para o aprimoramento do desenvolvimento deste trabalho e pela disponibilidade de participação na banca de avaliação.

Ao Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar, pelas valiosas sugestões, críticas e contribuições para a melhoria do trabalho apresentado e pelo exemplo de profissionalismo e conhecimento de diversas áreas e pela disponibilidade de participar da banca de avaliação.

Ao Prof. Dr. Nuno Borges de Carvalho, pelo exemplo profissional e pela inspiração para buscar desenvolver pesquisa de ponta e de alto impacto internacional, pela disponibilidade, sugestões e críticas para a melhoria desse trabalho.

Aos demais professores do departamento de engenharia elétrica da UFCG, em especial

os professores do Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados (LEMA,) Prof^ª. Raquel Aline e Prof. Rômulo Valle, pelo exemplo de profissionalismo, toda disponibilidade e sugestões para o desenvolvimento da pesquisa e exemplo no trabalho.

A coordenação do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFCG, em especial a querida servidora Ângela Matias, por toda presteza e desenvoltura na resolução dos trâmites burocráticos.

À toda equipe do Laboratório de Metrologia (LABMET), em especial ao técnico Valber de Aragão, pela disponibilidade, presteza e confiança na operação dos equipamentos da universidade.

Aos amigos colegas do PPGEE, em particular Raymundo de Amorim, Tagleorge Marques, Andrécia Pereira, Gustavo Forte, Maciel Oliveira, Priscilla Kadja, Galba Aragão, Tales Augusto, Ana Paula Santos. A Gustavo Queiroz da iniciação científica. Aos colegas Karoline Rodrigues Lima e Nathan Gurgel, que tive o privilégio de ser professor antes de entrar no programa.

À Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal de Nível Superior (CAPES), à BK Outsourcing LTDA e à equipe da gerência de engenharia e segurança de poços, da diretoria de poços de terra e águas rasas da PETROBRAS.

A todos, meu muito obrigado.

“Os obstáculos são ensinamentos para seu espírito”.

Santa Rita de Cássia.

Resumo

Com o surgimento da Internet das Coisas na década de 1990, o desenvolvimento de aplicações industriais voltadas para a integração de equipamentos, rastreabilidade de insumos e a interligação de sistemas heterogêneos tem despertado cada vez mais interesse. Em uma vasta gama de aplicações, o desenvolvimento de sistemas capazes de aproveitar a energia presente no próprio ambiente é cada vez maior. Uma das tecnologias que tem ganhado notoriedade na área de coleta de energia é a transmissão simultânea de informação e energia, denominada em inglês como Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT), principalmente em aplicações industriais voltadas para a coleta de dados no ambiente industrial. Como os sistemas SWIPT necessitam coletar energia do sinal de radiofrequência tanto para a retificação e colheita de energia como para demodulação e decodificação de informações, a utilização de modelos que possam prever o nível de sinal recebido é um fator crítico para a análise e garantia da confiabilidade e aplicabilidade dos sistemas, principalmente em ambientes industriais internos. Neste tipo de ambiente, existe a possibilidade da existência de obstáculos, como equipamentos, insumos e materiais em processamento, além de movimentações e transportes de materiais que podem prejudicar sistemas de comunicações, interrompendo a linha de visada direta e provocando fenômenos de propagação, como reflexões, difrações e refrações. Nesse contexto, foi desenvolvido um modelo de perdas de propagação com base na modelagem de fluxo de rede comódite, denominado Multicommodity Network Flow (MCNF) ou Multicommodity Flow (MCF), que consiste em uma ferramenta de otimização capaz de apresentar uma boa resposta em problemas de otimização e um desempenho computacional satisfatório, devido à sua capacidade de decomposição de sistemas complexos em um somatório de problemas mais simples. O modelo MCF proposto apresentou um desempenho satisfatório para a predição de perdas de propagação em ambientes internos, em comparação com outros modelos comumente utilizados nesse tipo de situação. Foram analisadas frequências de 915 MHz, 2,4 GHz, 3 GHz e 3,5 GHz, para potências de transmissão de 0, 1, 10, 20 e 30 dBm, e medido o indicador de intensidade de sinal recebido, denominado Received Signal Strength Indication (RSSI), para potências de transmissão de -30, -20, -10, -1, 0, 1, 10, 20 e 30 dBm, para distâncias variando entre 1 e 5 m. Foram realizadas medições emulando diferentes situações que podem ocorrer em ambientes industriais internos, como a movimentação relativa entre o transmissor e o receptor e interrupção da linha de visada direta. O modelo MCF proposto foi comparado com os modelos utilizados em ambientes internos, como COST 231 Motley-Keenan e o ITU-R P.1238-1, utilizando diferentes técnicas de análise de erros de predição, o modelo MCF.

Palavras-chaves: Fluxo de rede multicomódite. *Internet* das coisas. Modelos de propagação. Transmissão simultânea de informação e energia.

Abstract

Since the advent of the Internet of Things in the 1990s, there has been a growing interest in creating industrial applications for things like equipment integration, inventory tracking, and system interoperability. The demand for energy-efficient systems that can harness the power already existing in their surroundings is growing across a wide variety of industries. Transmission of both data and power at the same time, or Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT), has gained prominence in the field of energy collection, particularly in industrial applications geared toward data collection in an industrial setting. Since radiofrequency (RF) signal energy must be harvested by SWIPT systems for both power regeneration and energy collection and data demodulation and decoding, signal-level prediction models are essential for SWIPT analysis and reliability guarantees in challenging RF environments. Communication systems may be harmed in such an environment due to the presence of obstacles like equipment, raw materials, and finished goods; the movement and transport of these items; and the occurrence of propagation phenomena like reflections, diffractions, and refractions. In this setting, we developed a propagation loss model based on commodity network flow modeling; we call it Multicommodity Network Flow (MCNF) or Multicommodity Flow (MCF). MCF is an optimization tool that can provide a good response to optimization problems and satisfactory computational performance by breaking down complex systems into their component parts. For compared to other models typically used in such situations, the proposed MCF model showed satisfactory performance for predicting propagation losses in internal environments. We analyzed 915 MHz, 2.4 GHz, 3 GHz, and 3.5 GHz signals at transmission powers of 0, 1, 10, 20, and 30 dBm and measured the received signal strength indicator (RSSI) at distances ranging from 1 to 5 meters at powers of -30, -20, -10, -1, 0 to 1, 10, 20, and 30 dBm. Measures were taken to simulate various situations that may arise in internal industrial environments, such as relative movement between the transmitter and receiver and interruption of the direct line of sight. Models used in internal environments, such as COST 231 Motley-Keenan and the ITU-R P.1238-1, were compared with the proposed MCF model using various methods of error analysis.

Keywords: Multicommodity Network Flow. Internet of Things. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. Propagation Model.

Lista de Siglas

Sigla	Descrição	Significado
5G	<i>Fifth Generation</i>	Quinta Geração
AS	<i>Antenna Switching</i>	Comutação de antena
CNs	<i>Communication Nodes</i>	Nós de Comunicações
D2D	<i>Device-to-Device</i>	Dispositivo a dispositivo
DEIN	<i>Data and Energy Integrated Communication Network</i>	Rede integrada de dados e energia
DoF	<i>Degree of Freedom</i>	Graus de liberdade
EH	<i>Energy Harvesting</i>	Colheita de energia
EM	<i>Electromagnetic</i>	Eletromagnética
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>	Arranjo de porta programável em campo
IoHEHT	<i>Internet of Hybrid Energy Harvesting Things</i>	Internet das coisas com colheita de energia híbrida
IoT	<i>Internet of Things</i>	Internet das coisas
ISM	<i>Industrial, Scientific, and Medical</i>	Industrial, Científica e Médica
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>	União Internacional de Telecomunicações
KEH	<i>Kinetic Energy Harvesting</i>	Colheita de energia cinética
LEH	<i>Light Energy Harvesting</i>	Colheita de energia de fontes de luz
LoS	<i>Line-of-Sight</i>	Linha de visada
LP	<i>Linear Problems</i>	Problemas Lineares
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>	Máquina a Máquina
MAC	<i>Media Access Control</i>	Controle de acesso ao meio
MCF	<i>Multicommodity Flow</i>	Fluxo Multicommodity
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>	Múltiplas entradas e múltiplas saídas
NLoS	<i>Non-Line-of-Sight</i>	Sem linha de visada
NP	<i>Numerical Problems</i>	Problemas Numéricos
PDF	<i>Probability Density Function</i>	Função de densidade de probabilidade
PS	<i>Power Splitting</i>	Divisão de energia
QoS	<i>Quality of Service</i>	Qualidade de serviço
RF	<i>Radio Frequency</i>	Radiofrequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>	Identificação por Radiofrequência
SN	<i>Sensing Nodes</i>	Nós sensores
SoC	<i>System-on-a-Chip</i>	Sistema no chip
SS	<i>Spatial Switching</i>	Comutação espacial
SWIPT	<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>	Transmissão Simultânea de Informação e Energia
TEH	<i>Thermal Energy Harvesting</i>	Colheita de energia térmica
TS	<i>Time Switching</i>	Comutação de Tempo
WET	<i>Wireless Energy Transfer</i>	Transferência de energia sem Fio

Sigla	Descrição	Significado
WIT	<i>Wireless Information Transfer</i>	Transferência de informação sem fio
WPBC	<i>Wirelessly Powered Backscatter Communication</i>	Comunicações por Retroespalhamento Alimentada sem Fio
WPCNs	<i>Wireless Powered Communication Networks</i>	Redes de Comunicações com Alimentação sem Fio
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>	Transferência de energia sem Fio
WSN	<i>Wireless Sensors Networks</i>	Redes de Sensores sem Fio

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia	Descrição
A	Conjunto de arcos
$a(h_m)$	Fator de correção de propagação
$a_{i,j}$	Arco i, j
b_i^k	O suprimento do nó da comódite k
$c_{i,j}^k$	Custo sobre o fluxo da comódite k
d	Distância entre o transmissor e o receptor
d_0	Distância em relação a um ponto de referência
f_c	Frequência da onda portadora
G_r	Ganho da antena receptora
G_t	Ganho da antena transmissora
h_b	Altura da antena da estação base
$\mathbf{H}_{i,j}$	Matriz de desvanecimento do canal
h_m	Altura do dispositivo móvel
K	Conjunto de comódites
k	Comódite específica
$K_{f,i}$	Números de pisos atravessados
$K_{w,i}$	Número de paredes atravessadas
L_0	Perda de propagação a 1 m de distância da fonte transmissora
$L_{f,i}$	Perdas de propagação através do piso i
L_i	Perdas de propagação na condição i
$L_{w,i}$	Perdas de propagação através das paredes j
N	Conjunto de nós da rede
n	Coefficiente de propagação, com base nos ambientes a serem transpostos
P_r	Potência recebida
P_t	Potência transmitida
q^k	quantidade total da comódite k
x	Variável de decisão
$x_{i,j}^k$	Fração da comódite k , transportando pelo arco i, j
$y_{i,j}^{\{k\}}$	Sinal transmitido contendo as comódite no arco i, j
$\alpha(t)$	Variação do sinal ao longo do tempo
$\delta(\tau)$	Função de resposta de impulso
λ	Comprimento de onda
$\boldsymbol{\eta}_{i,j}$	Ruído gaussiano circularmente simétrico
ρ	Fator de divisão de energia

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolução Tecnológica de IoT	25
Figura 2.2 – Divisão de Arquitetura de tecnologias IoT	28
Figura 2.3 – Técnicas de implementação de SWIPT. (a) Comutação de tempo. (b) Divisão de energia. (c) Comutação de antenas. (d) Comutação Espacial.....	41
Figura 2.4 – Exemplificação de sistemas SWIPT por divisão de energia	42
Figura 4.1 – Representação de grafo de fluxo de rede.	56
Figura 5.1 – Modelo de SWIPT de divisão de potência.....	66
Figura 5.2 – Estrutura para Medição	69
Figura 5.3 Medição de valores de referência em câmara anecoica	72
Figura 5.4 Medições em ambiente interno	73
Figura 6.1 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 915 MHz	75
Figura 6.2 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 2,4 GHz	76
Figura 6.3 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 3 GHz	77
Figura 6.4 Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 3,5 GHz	78
Figura 6.5 Distribuição do RSSI por frequência e total.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 6.6 RSSI para obstrução de linha de visa com placa vertical	Erro! Indicador não definido.
Figura 6.7 RSSI com obstáculos sem interrupção da linha de visada	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Camadas da Tecnologia IoT.	26
Tabela 2.2 – Principais elementos de sistemas IoT	29
Tabela 2.3. – Principais Técnicas de Colheita de Energia aplicadas em aplicações IoT	34
Tabela 3.1 – Coeficiente de adensamento de ambiente do modelo de Log-distância	52
Tabela 3.2 – Coeficiente de perdas por propagação em obstáculos	53
Tabela 6.1 Comparação das métricas de erro entre o os modelos analisados	80
Tabela A.0.1 Métricas de avaliação de erro dos modelos	106
Tabela B.0.1 Média de medição de RSSI para modo sem barreiras entre Tx e Rx.....	109
Tabela C.0.1 - Resumo dados médios de medição de RSSI variação do anteparo abaixo da linha de visada.	110
Tabela D.0.1 Medição RSSI com barreira em linhas de visada.	112

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	Motivação e Relevância	18
1.2.	Objetivos Geral e Específicos.....	21
1.3.	Organização do Documento	22
2.	INTERNET DAS COISAS E TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DE INFORMAÇÃO E ENERGIA	24
2.1.	<i>Internet</i> das Coisas	24
2.2.	IoT e Coleta de Energia.....	30
2.3.	Transmissão Simultânea de Informação e Energia	35
2.4.	SWIPT, WPCN, WPBC	39
2.5.	Técnicas de Implementação de SWIPT	40
3.	MODELOS DE PROPAGAÇÃO	44
3.1.	Principais Fenômenos.....	44
3.2.	Características dos Modelos de Propagação	45
3.3.	Tipos de Modelos de Propagação	48
3.4.	Modelos de Propagação Empíricos para ambientes internos	49
4.	PROBLEMAS DE FLUXO E REDES <i>MULTICOMMODITY</i>	54
4.1.	Aspectos Gerais de Problemas de Rede <i>Multicommodity</i>	54
4.2.	Estado da Arte.....	59
4.2.1.	MCF aplicados em redes de comunicações.....	59
4.2.2.	Logística, transporte e aplicações diversas.....	62
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	66
5.1.	Materiais e Métodos Computacionais Utilizados.....	66
5.2.	Materiais e Métodos de Medições.....	69
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
6.1.	Resultados da Análise de Perdas de Propagação	74

6.2.	Resultados de Medições da Indicação de Nível de Sinal Recebido, RSSI.....	80
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
7.1.	Sugestões de Trabalhos Futuros.....	90
	REFERÊNCIAS	92
	Apêndice A.....	106
	Apêndice B.....	109
	Apêndice C.....	110
	Apêndice D.....	112

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e Relevância

Com o advento da Internet of Things (IoT), um dos obstáculos para a implementação dessa tecnologia é garantir a interoperabilidade entre dispositivos diferentes. Embora a IoT esteja surgindo em vários setores, é no ramo industrial que essa tecnologia tem um potencial para gerar uma significativa vantagem competitiva, conforme observado por estudos recentes de (KAMBLE et al., 2020; LI; DAI; CUI, 2020).

No setor industrial, a evolução das tecnologias aplicadas na captação de informações e na rastreabilidade de processos e insumos, como a identificação por radiofrequência, *Radio Frequency Identification* (RFID) e redes de sensores sem fio, *Wireless Sensors Networks* (WSN), foi fundamental para o surgimento do conceito de Internet das Coisas (IoT) (ZHOU et al., 2016).

A capacidade de coletar, processar e armazenar dados é um fator crítico para o desenvolvimento de equipamentos e sistemas produtivos inteligentes, uma vez que é fundamental para a implantação de tecnologias como Internet das Coisas (IoT) e para o desenvolvimento da Indústria 4.0. A integração de tecnologias como IoT, Big Data e Análise de Dados é imprescindível para o alcance de sistemas produtivos mais eficientes, eficazes e inovadores, em meio da tudo isso, tecnologias de comunicações são necessárias para viabilizar a operacionalização desse tipo de tecnologia (OSTERRIEDER; BUDDE; FRIEDLI, 2020).

Os sistemas de telecomunicações viabilizam esse intercâmbio de dados de informação e controle entre os dispositivos. A análise de informações é cada vez mais um fator estratégico para o ganho de competitividade nas organizações. Dessa forma, tecnologias de telecomunicações para aplicações em IoT são consideradas como estratégicas por diferentes organizações e governos. No Brasil, o plano nacional de internet das coisas visa ao desenvolvimento e fomento de tecnologias de telecomunicações para aplicações de tecnologias IoT na indústria nacional (ANATEL, 2016; CULOT et al., 2020).

A implantação de sistemas de comunicações em ambientes industriais apresenta uma série de desafios, incluindo a integração entre tecnologias antigas e atuais, bem como a conexão entre dispositivos que usam diferentes tipos de protocolos de comunicação se soluções tecnológicas (CHEN et al., 2016a, 2016b; KUO et al., 2018).

Diversos dispositivos utilizados em aplicações IoT utilizam baterias para viabilizar sua operação, seja pela necessidade de estabelecer comunicações com outros dispositivos, ou mesmo para alimentar sistemas de sensoriamento, armazenamento, análise e processamento das informações (CLERCKX et al., 2019; KRIKIDIS, 2015; SONG et al., 2014).

A utilização de dispositivos alimentados por baterias é necessária em muitas aplicações IoT, uma vez que estas fornecem a energia necessária para operacionalizar os dispositivo (YANG et al., 2020). Embora existam técnicas de eficiência energética e avanços na tecnologia de acumulação e armazenamento de energia, que visam aumentar a duração de carga das baterias, ainda é necessária a realização de manutenções, tais como a troca de elementos de armazenamento ou mesmo a substituição do dispositivo inteiro (CLERCKX et al., 2019).

Técnicas de coleta de energia, *Energy Harvesting* (EH), com o intuito do prolongamento da vida útil de baterias ou mesmo a viabilização de tecnologias sem bateria têm sido cada vez mais comuns, principalmente em aplicações comerciais e industriais. No geral, as tecnologias de EH buscam obter energia a partir de fontes renováveis e ambientais, como luz solar, movimento ou vibrações, e convertê-las em energia elétrica para alimentar dispositivos IoT (CLERCKX et al., 2019; SONG et al., 2014).

Além disso, também têm sido pesquisadas alternativas para minimizar ou até mesmo eliminar a necessidade de baterias, aumentando a eficiência energética e garantindo maior durabilidade e confiabilidade nos dispositivos. Essas soluções têm sido amplamente investigadas, especialmente em setores como a indústria, em que a disponibilidade e confiabilidade desses dispositivos são cruciais para o funcionamento dos processos industriais. (CLERCKX et al., 2019; SONG et al., 2014).

Uma das tecnologias utilizadas no campo da coleta de energia que tem se destacado é a SWIPT, que permite a realização conjunta da retificação do sinal de radiofrequência para coleta de energia, bem como da demodulação e decodificação para recuperação de informações (CLERCKX et al., 2019; UWAECHIA; MAHYUDDIN, 2020).

A colheita de energia e a demodulação e decodificação de informações são tecnologias

distintas, chegando a ser consideradas concorrentes entre si (VIZZIELLO; SAVAZZI, 2016). As tecnologias SWIPT precisam lidar com a diferença de sensibilidade aos sinais captados, já que os circuitos de retificação para a colheita de energia normalmente apresentam sensibilidade na ordem de -30 dBm, enquanto que os circuitos de demodulação e decodificação de informações apresentam sensibilidade na ordem de -80 dBm ou ainda inferior em soluções mais avançada (KRIKIDIS, 2015; RAJARAM et al., 2019; SONG et al., 2014; ZHANG; LU; HUANG, 2019).

evido a essas particularidades das aplicações de sistemas SWIPT, o conhecimento das características dos canais de comunicações é crucial, pois a ativação das funcionalidades de colheita de energia ou mesmo de decodificação de informação dependerá dos níveis de sinais recebidos de maneira distinta. Logo, nem sempre os sistemas SWIPT conseguirão operar executando as duas funções, colheita de energia e decodificação e demodulação de informações, de maneira efetivamente simultânea (CLERCKX et al., 2019; KRIKIDIS, 2015; ZHANG; LU; HUANG, 2019).

Modelos de propagação mais precisos, focados nessas aplicações, pode gerar uma maior confiabilidade no funcionamento desse tipo de sistema de comunicações. Além disso, tais modelos podem auxiliar na otimização do projeto e seleção de dispositivos para implementação dos sistemas SWIPT, bem como na identificação de soluções para possíveis problemas de interferência e confiabilidade de transmissão de informações (KANG et al., 2020).

Todavia, soluções de otimização que utilizam métodos exatos possuem uma alta demanda computacional, dessa forma podem não satisfazer os requisitos que viabilizem sua implementação. Dessa maneira, soluções baseadas em algoritmos heurísticos ou aproximados tem sido explorados para possibilitar a implementação de sistemas de otimização. Essas abordagens são mais exequíveis em termos de tempo computacional, porém podem não garantir uma solução ótima para os problemas analisados (TAVARES et al., 2020).

Desta forma, nesta tese, propõe-se o uso da modelagem híbrida, combinando fluxo comódite e medições empíricas, para o desenvolvimento de um modelo semideterminístico de perdas de percurso no canal de comunicações sem fio. Portanto, busca-se alcançar uma representação precisa dos processos de perda de sinal, utilizando a abordagem de modelagem de problemas de fluxo e redes multicomódite (SZYMANSKI, 2012).

A modelagem de fluxo de rede multicomódite aborda a otimização do transporte de várias comodidades em uma rede, visando minimizar os custos ou maximizar o fluxo total.

Esses problemas são complexos e de natureza NP-difícil. No entanto, a vantagem da utilização da modelagem MCF é a capacidade de decompor o problema em subproblemas envolvendo apenas uma comodidade, tornando-o mais gerenciável, flexível e viável. A utilização da modelagem de fluxo multicomódite possibilita a redução da complexidade computacional em determinadas aplicações, tornando-a uma técnica amplamente utilizada em problemas de otimização de recursos (DA SILVEIRA FARIAS; BORENSTEIN, 2017; SARITHA; VINOD CHANDRA, 2019; ZHANG et al., 2020).

A presente tese propõe um modelo de perdas de propagação semideterminístico baseado em MCF para aplicações SWIPT IoT em ambientes industriais internos, pois os modelos existentes apresentam um desempenho inferior para as situações e ambientes de propagação analisados. O modelo proposto é baseado na modelagem de fluxo multicomódite (MCF) e combina medições empíricas e modelos numéricos para estimar as perdas de propagação no canal de comunicações sem fio.

1.2. Objetivos Geral e Específicos

O objetivo geral desta tese é o desenvolvimento de um modelo de canal de comunicações sem fio, para a predição de perdas de propagação em ambientes industriais internos, considerando a utilização de sistemas de transmissão simultânea de informação e energia (SWIPT) por meio da utilização de algoritmos de fluxo de rede multicomódite.

Para o atendimento do objetivo principal são listados os seguintes objetivos específicos:

- Modelar o canal de comunicações com base em problemas de fluxo de rede *multicommodity*;
- Simular e medir a propagação de sinais em laboratório, emulando situações presentes no ambiente industrial interno;
- Analisar das características de propagação do canal para avaliar a viabilidade do uso de modelo MCF;

- Analisar a influência da topologia da rede, dos obstáculos e das condições do ambiente na performance do modelo.
- Comparar o modelo desenvolvido com os modelos comumente utilizados, nas aplicações de ambiente interno.

1.3. Organização do Documento

Esta tese está dividida da seguinte forma: No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho destacando o objetivo principal e os objetivos específicos, desenvolvidos ao longo da pesquisa.

No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos dos temas que balizaram a delimitação do tema principal abordado, que são *internet* das coisas e as aplicações de transmissão simultânea de informação e energia.

No Capítulo 3 são abordados os principais conceitos relativos aos modelos de propagação utilizados, para aplicações em ambientes internos. No Capítulo 4 são apresentados os conceitos gerais e alguns dos principais trabalhos relativos aos problemas de fluxo de rede multicomódite, que formam o estado da arte sobre o tema. O estado da arte está dividido em duas seções, uma relativa aos trabalhos que são aplicados em redes de telecomunicações e outra parte relativa às aplicações de fluxo multicomódite em problemas de logística e transportes.

No Capítulo 5 são mostrados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da tese, abordando os equipamentos utilizados, técnicas e principais equações referentes ao desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo 6 são apresentados os resultados e discussões das medições e simulações desenvolvidas ao longo do trabalho. No Capítulo 7 são mostradas as considerações finais, assim como as sugestões de trabalhos futuros.

E por fim, são apresentados os trabalhos utilizados nas referências bibliográficas e os apêndices. No Apêndice A estão os resultados tabulados para as métricas de erros de avaliação dos modelos de propagação, como MAE, MSE, RMSE, MSLE. No Apêndice B são mostrados os dados para o cálculo do indicador de força de sinal recebido, RSSI, para uma medição com linha de visada sem a presença de obstáculos entre o transmissor e o receptor.

No Apêndice C são mostrados os dados para o cálculo do indicador de força de sinal

recebido, RSSI, com objetos que possam refletir o sinal, posicionados abaixo da linha de visada entre o transmissor e o receptor. No Apêndice D, são mostrados os dados o cálculo do RSSI para situações em que há interrupção da linha de visada.

2. INTERNET DAS COISAS E TRANSMISSÃO SIMULTÂNEA DE INFORMAÇÃO E ENERGIA

No presente Capítulo são abordados os conceitos balizadores para o desenvolvimento e direcionamento da pesquisa. Este Capítulo é subdividido em cinco seções, na Seção 2.1 são mostrados principais os conceitos *internet* das coisas. Na Seção 2.2 são mostrados conceitos e aplicações de coleta de energia em aplicações IoT.

Na Seção 2.3 são mostrados os principais aspectos sobre a transmissão simultânea de informação e energia (SWIPT). Na Seção 2.4 são mostrados os principais tipos de técnicas de transmissão de energia sem fio. E por fim na Seção 2.5 são mostradas as principais subdivisões de sistemas SWIPT.

2.1. *Internet das Coisas*

O surgimento do termo Internet das Coisas (IoT) pode ser atribuído à evolução de tecnologias de comunicações aplicadas em ambientes empresariais para coleta de dados e informações, visando auxiliar na tomada de decisão das organizações. Observa-se uma crescente conexão de objetos físicos à internet, de maneira acentuada nas últimas décadas (XU; HE; LI, 2014).

Conforme descrito em Islam et al. (2015), IoT é um conceito que representa um conjunto interconectado de pessoas, coisas ou objetos, transcendendo as barreiras geográficas e visando a disponibilidade de informações. As tecnologias para aplicações IoT são uma tendência tanto presente quanto futura em dispositivos de comunicação, podendo causar impactos significativos nos negócios. As tecnologias IoT pode ser caracterizadas por meio da interconexão de objetos e dispositivos que possuem capacidades de sensoriamento, armazenamento, processamento de informações e automação.

As soluções IoT possuem ampla aplicabilidade em uma variedade de setores, incluindo cidades inteligentes, gestão de tráfego, gestão de resíduos, saúde, segurança, serviços de

emergência, logística, varejo, controle industrial e saúde. Contudo, interconectar dispositivos heterogêneos constitui um dos maiores desafios para este tipo de tecnologia, uma vez que diferentes aplicações apresentam diferentes requisitos operacionais, tais como frequência de operação, taxa de transmissão, modulação, polarização de antenas, entre outros aspectos (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015; ISLAM et al., 2015).

Com o constante avanço das tecnologias de comunicação, tais como a identificação por radiofrequência, as redes de sensores sem fio e outras soluções, as organizações que as implementam têm potencial para experimentar ganhos significativos em eficiência e produtividade. Isso se deve, em parte, à redução de custos associada à maior rastreabilidade dos processos e à tomada de decisões baseadas em dados coletados, que proporciona uma maior competitividade no mercado (ISLAM et al., 2015; XU; HE; LI, 2014).

Figura 2.1 Evolução Tecnológica de IoT



Fonte: Adaptado de (XU; HE; LI, 2014).

Na Figura 2.1 são mostradas algumas tecnologias e suas principais características. Embora tenham surgido desde a Segunda Guerra Mundial, as aplicações de RFID só começaram a ser utilizadas comercialmente na década de 1980, visando principalmente a rastreabilidade de insumos e equipamentos. (KIM; LEE; KIM, 2018a, 2018b).

Na década de 1990, houve uma maior adoção de tecnologias de redes de sensores sem fios, focando em um monitoramento mais inteligente, no sentido de poder ser usado para ações automatizadas, a partir das informações captadas do ambiente de instalação, sendo aplicados principalmente nas áreas industriais, ambientais e de saúde (CHOI et al., 2011; XU; HE; LI, 2014).

A partir da evolução dessas e outras tecnologias de comunicação, surge, no início da década de 2010, a primeira aplicação do termo Internet das Coisas. Essa aplicação é baseada no conceito de sistemas ciberfísicos, que consistem em dispositivos que integram computação, comunicação e controle. Esses dispositivos possuem uma camada física, composta por hardware, sensores, controladores e antenas, e uma camada cibernética, que engloba softwares, comunicação com sistemas e bancos de dados. (ISLAM et al., 2015; KAMBLE et al., 2020).

Tabela 2.1 Camadas da Tecnologia IoT.

Camada	Descrição
Camada de Detecção	Integração do <i>hardware</i> existente (RFID, sensores, atuadores etc.) para realizar sensoriamento e controle no mundo físico e adquirir dados
Camada de rede	Suporte básico de rede e transferência de dados por rede sem fio
Camada de Serviço	Criação e gerenciamento de serviços de suporte a informações, envios, armazenamento, integração com sistemas de informação.
Camada de interface	fornece métodos de interação para usuários e outros aplicativos

Fonte: adaptado de (ISLAM et al., 2015).

Na Tabela 2.1 é mostrada a subdivisão dos sistemas IoT em quatro camadas distintas. O entendimento dessas camadas é crucial para a identificação da camada mais relevante para uma determinada aplicação. O conhecimento dessas camadas é fundamental para determinar qual delas é mais relevante para uma aplicação específica, permitindo assim o desenvolvimento de soluções IoT mais eficientes e eficazes (ISLAM et al., 2015)

A camada de sensoriamento ou detecção é responsável pela captação de informações e está diretamente relacionada com os componentes de hardware instalados. Já a camada de rede tem como função conectar todos os dispositivos para que possam compartilhar informações com outros dispositivos. Essa camada visa agregar informações de infraestrutura de tecnologia da informação existentes, definindo questões como frequências, modulações, polarização, tipos

de antenas, ganho e taxas de transmissão requeridas, entre outros fatores (ISLAM et al., 2015).

A camada de serviço, por sua vez, depende principalmente da tecnologia de *middleware*, que tem o objetivo de integrar serviços e aplicativos na infraestrutura de rede das aplicações. A tecnologia de *middleware* permite que as plataformas de hardware e software possam ser integradas com os sistemas organizacionais que farão uso das informações coletadas. O entendimento dessas camadas é crucial para o desenvolvimento de aplicações IoT, proporcionando maior eficiência e eficácia com a integração das necessidades de negócio e requisitos técnicos. (ISLAM et al., 2015).

A camada de interface é responsável pela gestão da integração dos elementos do sistema, que muitas vezes são desenvolvidos por diferentes fabricantes e fornecedores, mesmo seguindo os mesmos padrões e protocolos, pode ocorrer a necessidade de adequações. Em decorrência dessa heterogeneidade, ocorrem diversos problemas de interação e troca de informações. Assim, o objetivo da camada de interface é integrar os dados coletados pelos dispositivos dos sistemas IoT com as aplicações e bancos de dados, garantindo a interoperabilidade entre diferentes tecnologias e dispositivos, possibilitando uma comunicação mais eficiente e segura. (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015; ISLAM et al., 2015).

A aplicação de um modelo de predição de perdas de propagação em sistemas IoT que utilizam tecnologias SWIPT pode ter um impacto significativo na camada de rede e na camada de interface, por exemplo. A camada de rede é responsável por conectar todos os dispositivos do sistema e permitir o compartilhamento de informações entre eles. A utilização de um modelo de predição de perdas de propagação pode influenciar a escolha das frequências, modulações, tipos de antenas e taxas de transmissão necessárias para garantir uma comunicação eficiente entre os dispositivos conectados (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015; ISLAM et al., 2015).

Por sua vez, como a camada de interface é responsável pela integração de diferentes elementos do sistema, incluindo a integração dos dados coletados pelos dispositivos IoT com as aplicações e bancos de dados. A utilização de um modelo de predição de perdas de propagação pode afetar a integração desses dados, devido a influência sobre as decisões presentes na camada de rede, exigindo adaptações na camada de interface para garantir que os dados sejam integrados corretamente para as aplicações e bancos de dados (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015; ISLAM et al., 2015).

Além disso, vale ressaltar que a aplicação de um modelo de predição de perdas de propagação deve ser cuidadosamente avaliada, considerando as características específicas do ambiente de implantação e das tecnologias utilizadas, a fim de garantir a eficiência e eficácia do sistema IoT como um todo.

De forma geral, no contexto de projetos de sistemas IoT, o projeto de arquitetura visa analisar as características dos elementos que compõem o sistema, incluindo a rede de comunicações, os dispositivos inteligentes, os serviços e aplicativos de interconexão Web, os modelos de negócios e processos, o processamento cooperativo de dados e a segurança. (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015; XU; HE; LI, 2014).

Para o desenvolvimento de um projeto de arquitetura para IoT, é fundamental considerar diversos elementos que podem impactar diretamente no sucesso do projeto, como a extensão, escalabilidade, modularidade e interoperabilidade. A extensão se refere à abrangência do projeto, que pode ser local ou global. A escalabilidade é importante para que o projeto possa ser expandido com facilidade e atender a novas demandas, sem comprometer a sua eficiência. A modularidade se relaciona com a possibilidade de dividir o projeto em partes menores, o que facilita o gerenciamento e a manutenção do sistema como um todo. (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015; XU; HE; LI, 2014).

Figura 2.2 – Divisão de Arquitetura de tecnologias IoT



Fonte: Adaptado de (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015).

Conforme mostrado Figura 2.2 compreender as camadas que compõem a arquitetura das aplicações de IoT é fundamental para obter uma visão abrangente sobre o escopo e a funcionalidade desse tipo de sistema. É importante destacar que cada solução pode apresentar diferentes níveis de interação em uma determinada camada (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015).

Desse modo, no projeto de sistemas IoT é necessário compreender quais camadas o projeto irá contemplar e como ocorrerá a interface entre cada uma dessas camadas (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015). Na Tabela 2.2 são ilustrados os principais elementos de sistemas IoT.

Tabela 2.2 – Principais elementos de sistemas IoT

Elemento	Descrição
Identificação	Sistemas de identificação permitem aplicações relacionadas à rastreabilidade.
Sensoriamento	O sensoriamento em IoT implica captação de dados de objetos relacionados dentro da rede e enviar para um <i>data warehouse</i> , banco de dados ou nuvem.
Comunicações	Elementos responsáveis pela transmissão e recepção de sinais
Computação	Unidades de processamento, como microcontroladores, microprocessadores, SoCs, e FPGAs e aplicações de <i>software</i> .
Serviço	Serviços de agregação de informações.
Semântica	Semântica na IoT refere-se à capacidade de extrair conhecimento de forma inteligente, integrando com o <i>middleware</i> e diferentes sistemas que usam a essas informações como base.

Fonte: Adaptado de (AL-FUQAHA; GUIZANI; MOHAMMADI, 2015).

A capacidade de integrar diversas tecnologias com as infraestruturas de comunicação existentes é uma característica fundamental da infraestrutura de IoT. Essa capacidade permite uma evolução progressiva dos sistemas de IoT, possibilitando a interligação de diferentes dispositivos e a oferta de novas funcionalidades e serviços. A interconexão de sistemas de IoT

com a infraestrutura de comunicação existente também facilita a utilização de recursos já disponíveis, reduzindo assim os custos de implementação de novas soluções (CHEN et al., 2016a; ZANELLA et al., 2014).

Essa diversidade de aplicações apresenta um desafio significativo na identificação de soluções que possam atender aos requisitos de todos os cenários possíveis. Na verdade, o número de soluções possíveis pode crescer exponencialmente. Como resultado, muitas soluções distintas e, às vezes, incompatíveis podem proliferar na prática de sistemas de comunicação. (ZANELLA et al., 2014).

2.2. IoT e Coleta de Energia

A transferência de energia sem fio por meio de radiofrequência, surgiu como aliada das aplicações IoT, caracterizando como uma alternativa para o desenvolvimento de sistemas de comunicações mais ecologicamente integráveis. A vida útil da bateria se torna um problema crítico para operar uma rede IoT de baixa energia de forma contínua (PARK et al., 2020).

Essa abordagem tem sido adotada para criar dispositivos autossuficientes em energia, com o intuito de permitir o uso de tecnologias sem fio em ambientes de difícil acesso ou em áreas remotas. A coleta de energia do ambiente em conjunto com técnicas de armazenamento e gerenciamento de energia pode fornecer uma fonte de energia renovável e sustentável para dispositivos sem fio, além de eliminar a necessidade de baterias ou fontes de alimentação com fio. Isso pode melhorar a autonomia, a mobilidade e a flexibilidade desses dispositivos em diferentes aplicações, incluindo IoT, a indústria 4.0, a automação predial e a monitoração ambiental, entre outras (ALTINEL; KURT, 2019).

No geral, essas fontes de energia são amplamente disponíveis no ambiente, podem ser usadas para esse tipo de captação, porém podem apresentar uma baixa densidade energética ou uma grande variabilidade de disponibilidade dependendo do tipo de energia e o tipo de ambiente (ALTINEL; KURT, 2019; CHOI et al., 2020; HU et al., 2019). Dessa forma, a energia obtida no ambiente por um único sistema de colheita pode não fornecer quantidade suficiente de energia para viabilizar a operação. Nesse caso, diferentes transdutores de energia e sistemas podem ser utilizados em associação (ALTINEL; KURT, 2019).

No entanto, certas aplicações, como a identificação por radiofrequência (RFID) em sistemas passivos, usam a energia transmitida pelo leitor para alimentar as etiquetas e realizar a comunicação sem fio. Isso permite uma monitoração e controle contínuos sem a necessidade de uma fonte de alimentação externa para os sensores. Além disso, em algumas situações, uma fonte de alimentação auxiliar ou separada pode ser usada para alimentar os sensores e garantir o funcionamento contínuo dos dispositivos sem fio (JASH; BANERJEE; CHATTERJEE, 2017; KIM; LEE; KIM, 2018a)

No entanto, mesmo essa opção pode não ser viável em alguns casos, principalmente devido a restrições de tamanho ou de desenho de projeto. Por esses motivos, os métodos de colheita de energia têm ganhado destaque para aliviar os problemas de redes sem fio com restrições energéticas, explorando fontes alternativas disponíveis no ambiente (AKAN et al., 2018; MATIKO et al., 2013; SUDEVALAYAM; KULKARNI, 2011).

A modelagem das formas de colheita de energia é crucial em qualquer mecanismo de colheita, pois a política de transmissão ideal depende diretamente da forma de colheita de energia. Com o rápido desenvolvimento dos sistemas de comunicações sem fio, prevê-se que haverá sete trilhões de dispositivos sem fio em todo o mundo até o final da década de 2020, impondo pressões significativas no aumento da eficiência energética (EE) das redes IoT (AKAN et al., 2018; YANG et al., 2020).

Várias técnicas de transmissão de informações sem fio foram propostas para aplicações IoT, como ZigBee e WiFi. No entanto, a maioria delas opera em bandas não licenciadas de aplicações industriais, científicas e médicas, *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) e não podem garantir uma elevada qualidade de serviço, *Quality of Service* (QoS) para aplicações IoT, devido a elevada presença de ruído nesses espectros altamente utilizados (YANG et al., 2020).

Entre os vários serviços de comunicações, as aplicações de IoT devem crescer significativamente nos próximos anos, uma vez que podem incorporar de forma transparente e contínua um grande número de dispositivos finais heterogêneos, o que pode congestionar ainda mais os espectros de frequência dessas aplicações (MAO; KAWAMOTO; KATO, 2020).

Como a implantação massiva de dispositivos de baixo consumo de energia está cada vez mais viável devido a evolução de tecnologias de circuitos, tanto para demodulação e decodificação da informação como para retificação de sinal, a utilização de sistemas de coleta

do ambiente para aumentar a vida útil dos dispositivos é cada vez mais viável e compatível com aplicações comerciais (CHOI et al., 2020; PARK et al., 2020).

Para resolver o problema de consumo energético de dispositivos IoT, especialmente para dispositivos de baixa potência, que normalmente são alimentados por baterias, a maneira convencional é reduzir o consumo de energia por meio da utilização de algoritmos e protocolos de economia e eficiência energética, contudo essa abordagem é limitada (WANG et al., 2021).

Por isso, além de reduzir a demanda energética operacional, muitos pesquisadores buscam obter novas fontes de energia por meio da coleta de energia do ambiente. Por exemplo, as conversões de energia piezoelétrica, energia solar, energia eletromagnética (radiofrequência, acoplamento magnético) entre outras formas têm se mostrado eficazes para alimentar alguns dispositivos IoT de baixa potência, que hoje se caracterizam como uma ampla gama de dispositivos (WANG et al., 2021).

Além disso, outra maneira é converter a energia de RF coletada em energia elétrica que pode ser utilizada por dispositivos IoT, que é chamada de transferência de energia sem fio, *Wireless Energy Transfer* (WET) ou *Wireless Power Transfer* (WPT). Essa abordagem ainda pode ser incorporada em consonância com as estratégias de economia de energia tradicionais, como esquemas de roteamento com eficiência energética, controle de topologia¹ e protocolos de controle de acesso, como protocolos MAC² (WANG et al., 2021).

Enquanto isso, as comunicações máquina a máquina, *Machine-to-Machine* (M2M) ou dispositivo a dispositivo, *Device-to-device* (D2D) são intrínsecas aos sistemas IoT. Conseqüentemente, as comunicações D2D subjacentes às redes celulares têm sido consideradas como uma tecnologia promissora para suportar redes IoT, tanto em transmissão de informações quanto para a colheita de energia (YANG et al., 2020).

¹ O controle de topologia é o processo de ajustar a disposição dos nós e ligações em uma rede de sensores sem fio para otimizar o desempenho. Isso pode incluir reduzir o consumo de energia, aumentar a conectividade da rede e diminuir as interferências entre os nós. O objetivo é minimizar o consumo de energia mantendo ou melhorando o desempenho da rede, e pode ser alcançado ajustando a gama de transmissão dos nós, criando uma estrutura de rede hierárquica ou agrupando os nós juntos (WANG et al., 2021).

² O protocolo MAC (*Media Access Control*) é um protocolo de comunicação utilizado em redes sem fios para controlar o acesso ao meio compartilhado, a fim de evitar colisões e coordenar a comunicação entre dispositivos. É responsável por determinar que dispositivo é permitido transmitir num dado momento, e como os dispositivos utilizam a largura de banda disponível. Desempenha um papel importante na utilização eficiente do meio compartilhado em redes sem fios, especialmente em casos de elevado tráfego na rede (WANG et al., 2021).

Sistemas de demodulação e decodificação de dados mais eficientes têm sido cada vez mais pesquisados para aplicação em sistemas IoT, aliando a eficiência energética para operacionalizar dispositivos IoT, permitindo que mesmo pequenas quantidades de energia coletadas dos ambientes possam operacionalizar o funcionamento de aplicações em IoT (WANG et al., 2021).

Uma das principais vantagens de aplicações integradas com colheita de energia em sistemas IoT consiste na possibilidade de se beneficiar de espectros congestionados, como o WiFi de 2,4 GHz, por exemplo, que é uma banda ISM utilizada por diferentes tipos de serviços (HU et al., 2019; KRIKIDIS et al., 2014; WANG et al., 2021). Além de coletar energia dos sinais de rádio do ambiente, a colheita de energia dos sinais de rádio artificiais, ou seja, sinais que são transmitidos com o intuito de prover energia suficiente para ativar um determinado dispositivo, pode se caracterizar como uma eficiente forma de alimentação de dispositivos de baixo consumo energético.

Esse tipo de situação ocorre em sistemas RFID, por exemplo, em que o leitor envia um sinal de interrogação para alimentar as etiquetas e inventariar a quantidade dessas etiquetas que estão em distância passível de leitura das informações (KIM; LEE; KIM, 2018a; WANG et al., 2021). A energia do ruído artificial e da interferência poderão ser coletadas para reabastecer as baterias dos dispositivos, ampliando a vida útil destas ou mesmo viabilizando os sistemas sem esse tipo de componente. Com o intuito de maximizar a energia de RF colhida, pesquisas têm sido desenvolvidas em relação aos circuitos de retificação para aumentar a eficiência de conversão de energia (GONZALEZ AYESTARAN et al., 2019; WANG et al., 2021; ZAIDI; HASAN; GUI, 2018).

Como por exemplo, o desenvolvimento de sistemas híbridos de coleta de energia que visam aumentar a disponibilidade de energia por meio da utilização de coleta das diferentes fontes, integrando circuitos de retificação do sinal RF, com outras formas de colheita como acústica, solar ou vibrações. Algumas iniciativas procuram desenvolver protocolos específicos para esses tipos de aplicação (IoHEHT - *Internet of Hybrid Energy Harvesting Things*), como mostrado em (AKAN et al., 2018).

Existem alternativas potenciais para coletar energia, mas sua disponibilidade depende das variáveis e parâmetros ambientais que variam com o tempo e podem ser altamente aleatórios em termos de variação da sua disponibilidade e densidade energética (AKAN et al., 2018; MISHRA; ALEXANDROPOULOS; DE, 2018). Os limites contínuos nas capacidades

de extração de energia forçam os dispositivos sem fio a uma troca de energia entre a operação adequada do sistema e a vida útil da rede, por meio do qual um limite superior é colocado na confiabilidade da comunicações (AKAN et al., 2018; ANH et al., 2019).

Por esse motivo, as abordagens híbridas de coleta de energia possuem um grande potencial para estender a vida útil dos dispositivos sem fio, operando de maneira complementar. A utilização de múltiplas fontes de energias tem o potencial de aumentar a confiabilidade e eficiência de dispositivos, podendo ser viável mesmo que haja um aumento pontual na complexidade dos dispositivos (AKAN et al., 2018). Em Akan et al. (2018), são destacadas seis principais técnicas de colheita de energia que podem ser utilizadas em conjuntos com sistemas IoT, conforme mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. – Principais Técnicas de Colheita de Energia aplicadas em IoT

Técnicas	Descrição
Fotovoltaica	A coleta de energia de fontes de luminosas é um método de fornecimento de energia que reúne energia de luzes presentes no ambiente, seja de fontes naturais ou artificiais
Cinética	Transforma a energia mecânica em energia elétrica. Aerogeradores, anemômetros e materiais piezoelétricos.
Térmica	Baseado na conversão de gradientes de temperatura em energia elétrica.
Eletromagnética	A coleta de energia Eletromagnética (EM) inclui a captação de radiofrequência, sinais emitidos de estações base, roteadores de rede, smartphones e quaisquer outras fontes e conversão das ondas obtidas em energia contínua.
Campo Magnética	A coleta de energia de campo magnético é baseada em acoplar o fluxo de campo em torno dos condutores de transporte de corrente alternada CA. Ao contrário da colheita de sinais eletromagnéticos, que é feita em transmissões de campos distante, de colheita por campo magnético exige o acoplamento magnético em uma distância mais curta.
Campo elétrica	Colheita de energia por meio de variações eletrostáticas no meio em que o dispositivo esteja inserido.

Fonte: Adaptado de (AKAN et al., 2018).

Todos os métodos de colheita de energia elencados na Tabela 2.3 podem ser usados em aplicações como redes sem fio e monitoramento remoto. No entanto, a disponibilidade de fontes

naturais afeta drasticamente a durabilidade de sua operação, sendo a energia coletada por meio de radiofrequência, apesar de apresentar no geral uma baixa densidade energética, uma das formas de coleta considerada mais confiável (AKAN et al., 2018; GONZALEZ AYESTARAN et al., 2019; PONNIMBADUGE PERERA et al., 2018).

2.3. Transmissão Simultânea de Informação e Energia

A partir da necessidade de integrar a transmissão de informações e energia no mesmo sistema, surgiu o conceito de rede integrada de dados e energia, *Data and Energy Integrated Communication Network* (DEIN), que tem o objetivo de estabelecer padrões de arquitetura para transmissão de energia e dados utilizando o mesmo sistema de comunicações. Entre as tecnologias que compõem esse conceito, tem se destacado a transferência singular de informação e energia sem fio, para lidar com a informação e a energia contidas no sinal de forma integrada (HU; YANG, 2018; WANG et al., 2021).

Uma das principais vantagens para sistemas e dispositivos embarcados na utilização de tecnologias WPT é a possibilidade da alimentação direta do dispositivo por meio do sinal de rádio, permitindo o aumento da vida útil geral dos dispositivos. Sistemas SWIPT, além dessa possibilidade, permitem a coleta de energia simultaneamente com a decodificação das informações de sinais, permitindo assim o aproveitamento do ruído presente em canais de comunicações sem fio, podendo gerar ganhos de eficiência espectral, tempo de atraso, consumo de energia e gestão de interferências nos dispositivos (CHOI et al., 2020).

As ondas de rádio transportam energia e informações simultaneamente, no entanto, as transmissões de radiofrequência têm sido tradicionalmente tratadas separadamente. Em Clerckx et al. (2019) e em Krikidis, Sasaki e Timotheou (2014) é destacado que durante a última década, o interesse por técnicas de alimentação de dispositivos eletrônicos utilizando a coleta de energia de ondas RF tem crescido. Esses projetos fornecem uma variedade de soluções usando diferentes fontes de RF desde transmissão de TV, fontes de RF dedicadas, roteadores e estações rádio base de transmissões celulares.

Em Loubet, Takacs e Dragomirescu, (2019) é mostrada uma rede de sensores sem fios composta por uma rede *mesh* com dois tipos de nós: os nós de detecção ou sensoriamento,

chamados de nós sensores, *Sensing Nodes* (SNs) e os nós de comunicações, *Communication Nodes* (CNs). Os nós sensores são capazes de medir e monitorar parâmetros do ambiente e comunicar os dados coletados para os nós de comunicações a uma distância de vários metros a quilômetros.

Assim, para evitar qualquer manutenção e aumentar a vida útil, os nós de detecção são projetados para serem sem bateria e alimentados sem fio por uma fonte de energia RF acionada pelos nós de comunicações, por meio de uma interface de transmissão de energia sem fio (WPT) (LOUBET; TAKACS; DRAGOMIRESCU, 2019).

Sistemas SWIPT são altamente aplicáveis em IoT. Na literatura, os trabalhos de transferência de potência sem fio, concentram-se na eficiência de conversão de energia do retificador, enquanto a pesquisa de transferência de informação sem fio, *Wireless Information Transfer* (WIT), é focada em projetos de modelo de sistemas e restrições de orçamento de energia e principalmente no aumento da eficiência e capacidade de decodificação das informações (CLAESSENS et al., 2018).

A ubiquidade da tecnologia sem fio em aplicações residenciais, industriais e comerciais tem levado a uma crescente necessidade de dispositivos sem fio. No entanto, a capacidade limitada das baterias é um gargalo que restringe a durabilidade e portabilidade desses dispositivos. Nos últimos anos, tem havido um esforço significativo para desenvolver técnicas que permitam a transferência de energia sem fio e, assim, estender a vida útil dos dispositivos sem fio (ZHU et al., 2019a).

No contexto de projetos de sistemas WPT e WIT, em geral, nenhum deles leva em conta o impacto mútuo entre os subsistemas. Algumas pesquisas têm sido conduzidas nessa área, com o objetivo de analisar o efeito das formas de onda em ambos os subsistemas, porém, essas análises são amplamente limitadas a trabalhos teóricos e algumas suposições sobre o hardware, sem validação por meio de medidas (CLAESSENS et al., 2018).

Embora as comunicações móveis tenham se tornado uma tecnologia relativamente madura, a utilização de sistemas de transmissão de informação e energia simultaneamente ainda tem uma vasta gama de necessidades que precisam ser melhor exploradas (CHOI et al., 2020; GONZALEZ AYESTARAN et al., 2019; KRIKIDIS, 2015; RAJARAM et al., 2019).

Atualmente, não há um único padrão de sistema WPT de campo distante. Isso é altamente relevante em redes futuras com dispositivos onipresentes e autônomos de baixa

potência e energia limitada, comunicações massivas entre dispositivos IoT. Embora as ondas de rádio transportem energia e informação simultaneamente, as transmissões de RF desses elementos têm sido tradicionalmente tratadas separadamente (CLERCKX et al., 2019).

Um projeto unificado de transmissão de informação e energia sem fios teria a capacidade de fazer o melhor uso do espectro e da energia das ondas de RF e da infraestrutura de rede para comunicação e alimentação de dispositivos eletrônicos, permitindo que dispositivos de baixo consumo de energia sejam conectados e alimentados em qualquer lugar e em diferentes situações. (CLERCKX et al., 2019).

A integração de dispositivos WPT e as comunicações sem fio traz novos desafios e oportunidades, e exige uma mudança de paradigma no projeto de redes de comunicações. Como resultado, várias áreas de pesquisa podem ser exploradas, incluindo teoria da comunicações, teoria da informação, teoria do circuito, projeto de RF, processamento de sinal, projeto de protocolo, otimização, prototipagem e experimentação, testes de laboratório e de campo (CLERCKX et al., 2019).

As redes de comunicações tradicionais foram otimizadas para comunicações de dados. Portanto, é esperado que os protocolos de rede existentes, algoritmos de alocação de recursos e estruturas receptoras não sejam capazes de atender aos desafios únicos incorridos pela natureza do WPT e WIPT, como destacam (CHOI et al., 2020; CLERCKX et al., 2019; RAJARAM et al., 2019).

WIT e WPT são elementos que embasaram o desenvolvimento de tecnologias SWIPT e o projeto de redes SWIPT eficientes, fundamentalmente depende da capacidade de projetar WIT e WPT eficientes (CLERCKX et al., 2019). Os requisitos de engenharia e desafios de projeto da rede prevista são:

1. **Alcance:** Fornecimento de energia sem fio a distâncias de 5 a 100 m para carregamento interno e externo de dispositivos de baixo consumo;
2. **Eficiência:** Aumento da eficiência de transferência de potência de ponta a ponta;
3. **Sem linha de visada, *Non-Line-of-Sight* (NLoS):** Suporte de linha de visada, *Line-of-Sight* (LoS) e NLoS para ampliar as aplicações práticas de redes WIPT;
4. **Suporte de mobilidade:** para movimentações em ambientes internos de dispositivos e equipamentos;

5. **Acessibilidade ubíqua:** Suporte para acessibilidade de energia ubíqua dentro da área de cobertura da rede e alcance dos dispositivos;
6. **Segurança e saúde:** aplicações de sistemas de RF em conformidade com os regulamentos e legislações dos setores de segurança e saúde
7. **Consumo de energia:** Limitação do consumo de energia de dispositivos alimentados por RF;
8. **Integração entre comunicações sem fio e energia sem fio:** Interoperabilidade entre comunicações sem fio e energia sem fio por meio de um SWIPT unificado.

Tal projeto de sistema requer a caracterização da troca fundamental entre quanto de informação e quanta energia pode ser fornecida em uma rede sem fio e como os sinais devem ser projetados para atingir a melhor troca possível entre eles, garantindo além da operação a compatibilidade com outros sistemas de comunicações (CLERCKX et al., 2019).

Na prática, os projetistas de rede precisam encontrar um equilíbrio entre a informação e transferência de energia, levando a algoritmos de alocação de recursos, modelos de sistema e esquemas de gerenciamento de interferência significativamente diferentes, em comparação com as comunicações de dados sem fio convencionais (CLERCKX et al., 2019; KRIKIDIS, 2015).

Devido à sua capacidade de estender a vida útil das redes sem fio sem energia, os sistemas SWIPT estão se tornando uma das tecnologias com potencial de uso. Uma vez que utilizam sinais de rádio para transmitir informações e energia, e têm a possibilidade de serem integrados aos sistemas da Internet das Coisas (IoT), os sistemas SWIPT podem oferecer várias vantagens para os futuros sistemas de telefonia celular, especialmente para os usuários móveis (ILYAS et al., 2020).

As técnicas de transferência simultânea de energia e informação sem fio representam uma possível solução para a dicotomia entre a alta taxa de dados nos sistemas de comunicações móveis de quinta geração (5G), permitindo um equilíbrio entre o aumento da demanda por transmissão de dados e o consumo de energia, por exemplo, como mostrado em (ZHAI et al., 2019). Canais de comunicações sem fio com alta taxa de utilização e conseqüentemente ruidosos, com interferência, podem ser utilizados para o provimento energético parcial ou integral, diminuindo a necessidade de manutenções, devido ao aumento da vida útil graças a coleta oportuna de energia, ou mesmo dispensando o uso destas, como destacado em (CHEN et al., 2016b; GUO; WANG, 2013; ZHANG; LU; HUANG, 2019).

Diferente das fontes de energia como energia solar, eólica, cinética por vibrações, os sinais de RF podem ser controlados de modo a fornecer um suprimento de energia estável e confiável, como por exemplo, por meio da inserção de ruído artificial no canal e *power beacons* com o intuito de prover energia para os dispositivos (ZHAI et al., 2019).

2.4. SWIPT, WPCN, WPBC

Em sistemas SWIPT, a energia e as informações são transferidas simultaneamente, geralmente no enlace de descida, ou *downlink*, de um ou vários pontos de acesso para um ou vários receptores. Um dos desafios desse tipo de sistema é garantir a interoperabilidade de forma simultânea, entre a informação e coleta de energia, uma vez que os sistemas para ambos os propósitos possuem sensibilidades distintas aos distintos níveis de sinal (CLERCKX et al., 2019; HU; YANG, 2018; ZHAI et al., 2019).

Além do conceito de SWIPT, outra forma de rede com possibilidade de alimentação de dispositivos por meio de energia sem fio são as redes de comunicações com alimentação sem fio, *Wireless Powered Communication Networks* (WPCNs), nas quais a energia é transferida no enlace de descida e as informações são transferidas no enlace de subida. O receptor é um dispositivo de baixa potência que coleta energia no enlace de descida e a usa para enviar dados no enlace de subida, o sinal inicial pode ser utilizado inclusive como uma forma de sincronização entre o transmissor principal do sistema e os dispositivos secundários (CLERCKX et al., 2019).

Outro tipo de classificação é a comunicações por retroespalhamento alimentada sem fio, *Wirelessly Powered Backscatter Communication* (WPBC): A energia é transferida no enlace descida e as informações são transferidas no enlace de subida, toda a energia é fornecida pelo transmissor. O principal exemplo desse tipo de rede são as aplicações RFID passivas, em que modulação de retroespalhamento de uma etiqueta RFID é usada para refletir e modular o sinal de RF de entrada para comunicações com um leitor. Como as etiquetas passivas possuem circuitos relativamente simples e de baixa necessidade energética, as comunicações de retroespalhamento se beneficiam de um consumo de energia menor do que as comunicações de rádio convencionais (CLERCKX et al., 2019).

2.5. Técnicas de Implementação de SWIPT

A interferência entre o canal de energia e o canal de informação deve ser minimizada para atingir um melhor desempenho de sistemas SWIPT. A fim de aproveitar ao máximo a técnica SWIPT, diversas pesquisas têm sido realizadas sobre como incorporá-la a outras tecnologias de comunicações, como destacado em (ZHU et al., 2019a).

É possível adotar uma abordagem prática para resolver o problema da potência de RF recebida, que consiste em dividir a mesma em duas partes separadas e distintas: uma para a coleta de energia e outra para a decodificação das informações transmitidas. Algumas arquiteturas de receptor comumente adotadas na literatura para obter essa divisão de sinal são as seguintes (ZHU et al., 2019b):

SWIPT de Comutação de Tempo, *Time Switching* (TS): para receptores TS, a transmissão é dividida em dois *slots* de tempo ortogonais, um para transferir energia sem fio e outro para transmitir informações (CLERCKX et al., 2019; YANG et al., 2017). O receptor alterna entre o circuito de coleta de energia colocalizado e o circuito de decodificação de informações para coletar energia e decodificar e demodular informações em intervalos de tempo sucessivos (CLERCKX et al., 2019).

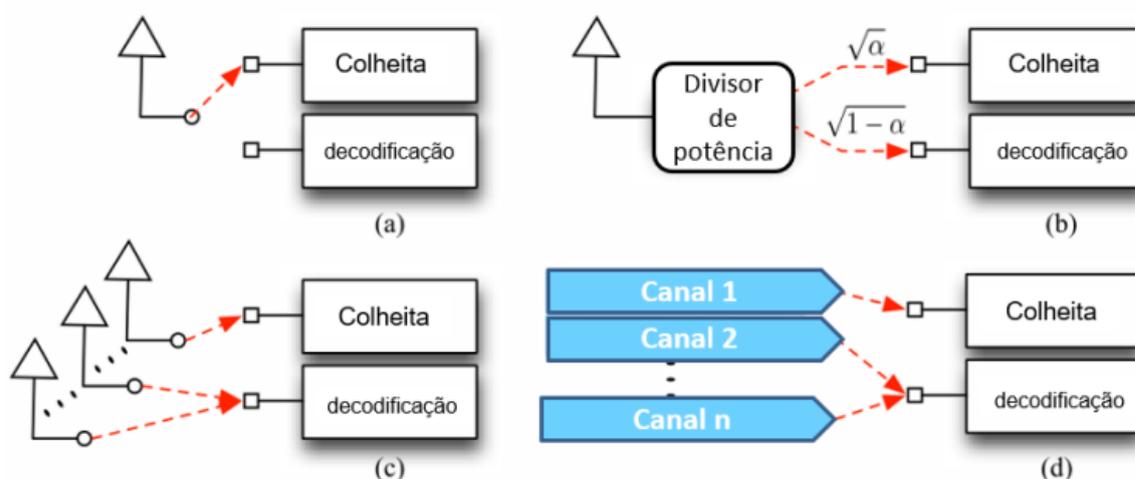
Embora a estrutura do receptor TS permita uma implementação de *hardware* transceptor simples, ela requer sincronização de tempo para ordenação dos períodos para operacionalização da informação e energia. Nessas circunstâncias, a sobrecarga de sinalização de controle associado pode ser complexa principalmente em sistemas multiusuário (SONG et al., 2018).

SWIPT por divisão de energia, *Power Splitting* (PS): um receptor com um circuito divisor de energia divide o sinal recebido em uma antena em dois sinais com níveis de potência distintos, usando uma unidade de divisão de potência, se caracterizando como uma técnica efetivamente simultânea de divisão de energia para informação e potência (CLERCKX et al., 2019; KRIKIDIS et al., 2014).

SWIPT por comutação de antena, *Antenna Switching* (AS) os arranjos de antenas são usados para coletar energia e realizar a retificação para energia em corrente contínua, isso é

feito por meio de sistemas complexos que agrupam as antenas disponíveis no sistema, por meio de chaveamentos, direcionando o sistema. Inspirada por esta abordagem, a técnica SWIPT-AS alterna dinamicamente cada elemento da antena entre decodificação e retificação. (KRIKIDIS et al., 2014; KRIKIDIS; SASAKI; TIMOTHEOU, 2014). Na Figura 2.3 são mostradas as principais técnicas de SWIPT.

Figura 2.3 – Técnicas de implementação de SWIPT. (a) Comutação de tempo. (b) Divisão de energia. (c) Comutação de antenas. (d) Comutação Espacial.



Fonte: adaptado de (CLERCKX et al., 2019).

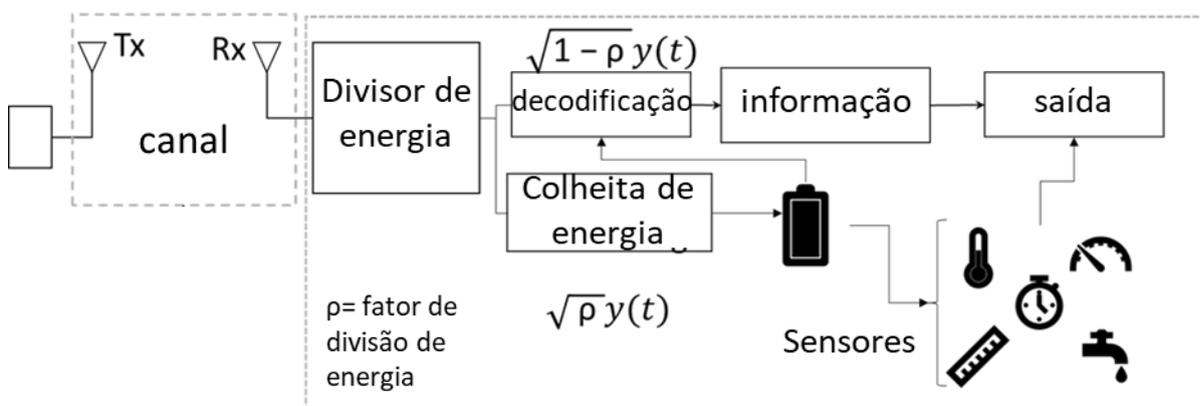
A otimização da proporção dos dois fluxos de energia geralmente é necessária para atingir um equilíbrio entre a demodulação e decodificação de informações e o desempenho de coleta de energia. Além disso, perda de inserção, ruído adicional e interferência relacionada ao circuito podem ser introduzidos pelo processo SWIPT-PS (CLERCKX et al., 2019; GU et al., 2020).

A técnica de SWIPT-AS requer a solução de um problema de otimização em cada alteração expressiva do canal de comunicações para decidir a atribuição ótima dos elementos da antena para a decodificação da informação e captação de energia (SONG et al., 2014).

SWIPT por comutação espacial, *Spatial Switching* (SS), a técnica de SWIPT-SS pode ser aplicada em configurações MIMO e realizando a transmissão simultânea de informação e energia no domínio espacial, explorando os múltiplos graus de liberdade, *Degree of Freedom* (DoF) da interferência de canal, cada grau de liberdade oferece uma possibilidade adicional para transmitir informação sem aumentar a interferência. Por exemplo, usando diferentes

frequências para transmitir dados, logo, aumenta-se a capacidade de transmissão de dados sem causar interferência com outras comunicações que estão acontecendo simultaneamente na mesma frequência. A utilização de todos os graus de liberdade disponíveis é considerada importante para alcançar a máxima eficiência espectral e capacidade de comunicação em sistemas sem fio. (KRIKIDIS et al., 2014). Na Figura 2.4 é mostrada uma ilustração acerca o funcionamento de SWIPT PS.

Figura 2.4 – Exemplificação de sistemas SWIPT por divisão de energia.



Fonte: adaptado de (OLIVEIRA; FONTGALLAND; ANDRADE, 2021).

Na saída de cada canal externo há uma chave que conduz a saída do canal para o circuito de decodificação convencional ou para o circuito de retificação. A atribuição de canal digital e alocação de potência em diferentes canais eletrônicos é um problema de otimização combinatória não linear, como destacado por (KRIKIDIS et al., 2014).

Em sistemas SWIPT, pode-se aumentar a energia do sinal para facilitar a captação de energia em receptores com restrições energéticas. No entanto, esse método também aumenta a suscetibilidade à escuta (*eavesdrop*) devido à natureza de transmissão dos canais sem fio. Além disso, o número crescente de dispositivos de colheita de energia também pode representar uma ameaça à segurança em futuras redes de comunicações sem fio devido à quantidade de dados transmitidos por essas redes (LIU; LIU, 2017; YE et al., 2019; ZHANG; LU; HUANG, 2019).

Em uma rede projetada para aplicações SWIPT, sinais comumente indesejados, como as interferências que causam uma maior degradação do sinal para decodificação e demodulação de informações, podem ser benéficos para aplicações de coleta e energia de sinais de RF (KIM; LEE; KIM, 2018a). A alocação de energia desempenha um papel fundamental na coordenação

da interferência e nas comunicações D2D e em comunicações celulares. Embora vários estudos tenham sido conduzidos sobre a alocação de energia D2D, a maioria desses estudos não leva a presença de SWIPT em consideração como destacam (HUANG; XING; GUIZANI, 2020).

Dois mecanismos principais de alocação de potência são propostos para alocar simultaneamente a potência de transmissão e escolher a razão de divisão de potência para comunicações D2D, SWIPT-TS e SWIPT-PS, comutação de tempo e a divisão de energia (HUANG; XING; GUIZANI, 2020).

Tecnologias SWIPT possuem uma série de vantagens, principalmente para aplicações IoT, contudo ainda é necessário o desenvolvimento de tecnologias auxiliares para esse tipo de sistema. Nesse tipo de sistema, por exemplo, o comportamento das perdas de propagação do canal de comunicações é de suma importância, pois no geral, circuitos de retificação para coleta de energia e de decodificação e demodulação de informações apresentam uma sensibilidade para sua ativação e operação diferentes. Circuitos de decodificação comuns conseguem captar sinais na ordem de -80 dBm e de retificação na ordem de -30 dBm, dessa forma, entender o comportamento da relação entre os sinais transmitidos e os recebidos no sistema é necessário para o desenvolvimento desse tipo de sistema (UWAECHIA; MAHYUDDIN, 2020).

3. MODELOS DE PROPAGAÇÃO

A propagação no canal de comunicações sem fio pode estar sujeita a um conjunto de fatores como, reflexões, difrações, refrações, espalhamento por multipercurso e sombreamentos. Esses fenômenos afetam diretamente como o sinal transmitido chega ao receptor. Os modelos de predição de perdas de propagação ou modelos de canal de comunicações surgiram com o intuito de prever os níveis de sinais com mais precisão entre o transmissor e o receptor.

3.1. Principais Fenômenos

A reflexão ocorre quando as ondas de rádio que se propagam em um meio colidem com outro meio com diferentes propriedades eletromagnéticas. A energia das ondas pode ser parcialmente absorvida pelas superfícies nas quais a onda incide, resultando em uma onda refletida que é atenuada. A amplitude e a fase da onda refletida estão fortemente relacionadas à impedância intrínseca da superfície, ao ângulo de incidência e à polarização do campo elétrico (GARG, 2007; KAR et al., 2016).

A difração é um fenômeno pelo qual as ondas propagadas sofrem desvios desencadeados por obstáculos em sua trajetória de propagação. Esse fenômeno ocorre quando as ondas se propagam através de uma abertura ou ao longo de uma borda, ocasionando a mudança na direção de propagação. A difração é mais pronunciada quando a abertura ou borda é comparativamente menor do que o comprimento de onda. Existem dois tipos principais de difração: a difração de Fraunhofer e a difração de Fresnel, de acordo com a distância entre a fonte de sinal e os obstáculos causadores desse fenômeno, ou seja a região em que se encontra a propagação do sinal (FAROOQ; ZHU, 2019).

A difração de Fraunhofer ocorre quando a distância entre a fonte de ondas e a abertura ou borda é muito maior do que a distância entre a abertura ou borda e o ponto de observação. Isso geralmente resulta em padrões de interferência estacionários e a intensidade de difração é

proporcional à intensidade da onda incidente (FAROOQ; ZHU, 2019).

A difração de Fresnel ocorre quando a distância entre a fonte de ondas e a abertura ou borda é comparativamente menor do que a distância entre a abertura ou borda e o ponto de observação. Isso geralmente resulta em padrões de interferência que variam com o tempo e a intensidade de difração é proporcional à intensidade da onda incidente elevada à potência do índice de refração. Em comunicações sem fio, a difração é um fenômeno importante a ser considerado, pois pode afetar a direção de propagação das ondas de rádio e causar perda de potência. As técnicas de antenas de alta ganho e a colocação estratégica de estações base podem ser usadas como fatores mitigantes desse tipo de efeito (FAROOQ; ZHU, 2019).

O espalhamento é um fenômeno que ocorre quando uma onda incidente (como uma onda eletromagnética) encontra um objeto que impede sua propagação retilínea. A onda incidente é desviada e se espalha em várias direções, formando uma nova onda. Existem três tipos principais de espalhamento: espalhamento difuso, espalhamento direcional e espalhamento especular (FAROOQ; ZHU, 2019; GARG, 2007; KAR et al., 2016).

O espalhamento difuso é quando a onda incidente é desviada em várias direções, sem um padrão específico. É o tipo mais comum de espalhamento e é o que é responsável pela propagação de ondas em ambientes com muitos obstáculos, como as ondas de rádio em uma cidade (FAROOQ; ZHU, 2019; GARG, 2007; KAR et al., 2016).

O espalhamento direcional é quando a onda incidente é desviada em uma direção específica e é comum em superfícies metálicas. E o espalhamento especular é quando a onda incidente é refletida de volta como uma onda plana, como num espelho. É mais comum em superfícies lisas e polidas. Cada tipo de espalhamento tem suas próprias características e propriedades, e pode ser utilizado de diferentes formas em aplicações tais como comunicações sem fio, radares e sistemas de navegação (FAROOQ; ZHU, 2019; GARG, 2007; KAR et al., 2016).

3.2. Características dos Modelos de Propagação

Para o projeto, simulação e planejamento de sistemas sem fio, a aplicação de modelos de perdas de propagação pode apresentar uma série de vantagens para o projeto de sistemas de

comunicações sem fios (AMORIM et al., 2017). Existem duas aplicações principais para modelos de perdas de propagação:

- Projeto de sistemas de comunicações sem fio de forma paramétrica;
- Modelos geométricos ou geográficos que são desenvolvidos levando-se em consideração as características específicas de um determinado local.

Os modelos de canais de comunicações representam como um sinal se propaga através de meio físico, ou seja, o canal. Por meio de representações matemáticas e simulações são utilizados parâmetros que influenciam no comportamento dos sinais que se propagam por um determinado meio. Modelos de canais mais complexos, no geral, utilizam uma quantidade maior de parâmetros, como altura de antenas, frequência da portadora, presença de obstáculos, distância entre transmissor e receptor (JOUNG; KURNIAWAN; SUN, 2017; KAR et al., 2016).

Quanto maior o número de parâmetros de entrada de um modelo, maior poderá ser a acurácia deste modelo, porém a complexidade e a demanda computacional para processamento do modelo podem aumentar significativamente. O maior número de parâmetros, exige um conhecimento profundo sobre o local em que o sistema será instalado e das características operacionais do sistema (AMORIM et al., 2017; SONG et al., 2018). Os modelos de canais de Comunicações podem ser divididos em três tipos principais (SONG et al., 2018):

- Modelos de canal empírico;
- Modelos de canal determinísticos;
- Modelos de canal estocásticos.

Nos modelos empírico, a principal vantagem é que as respostas ao impulso podem ser mais condizentes com determinadas aplicações reais. Além disso, as simulações do sistema utilizam as respostas ao impulso armazenadas que são reproduzíveis, pois os dados permanecem disponíveis e podem ser reutilizados indefinidamente, mesmo para simulações de diferentes sistemas (SILVA; HANCKE, 2016).

Esta é uma distinção importante dos testes de campo de sistemas inteiros, onde não pode haver garantia de que a resposta ao impulso permaneça constante ao longo do tempo. As desvantagens de usar respostas ao impulso armazenadas são duas, principalmente (AMORIM et al., 2017; MARAVIĆ; KUSUMA; VETTERLI, 2003; SILVA; HANCKE, 2016):

- O grande esforço em adquirir e armazenar os dados;

- O fato de que os dados caracterizam uma determinada área de um ambiente de propagação.

Por sua vez os modelos determinísticos usam informações geográficas e morfológicas de um banco de dados para uma solução determinística e m simulações computacionais e medições experimentais, e levam em conta fatores como a topologia do ambiente, a posição e orientação dos dispositivos transmissores e receptores, e as características do espectro eletromagnético.(SAMIMI; RAPPAPORT; MACCARTNEY, 2015). A filosofia básica é a mesma para as respostas ao impulso: determinar a resposta ao impulso em uma demarcada localização geográfica. Ambos os métodos são, portanto, frequentemente incluídos como modelos específicos (UWAECHIA; MAHYUDDIN, 2020).

A principal vantagem é que as simulações em computador, para os modelos determinísticos, são mais fáceis de realizar do que as campanhas de medição. Além disso, certos tipos de métodos computacionais permitem que os efeitos de diferentes mecanismos de propagação sejam tratados isoladamente (AMORIM et al., 2017). As desvantagens dos modelos de canal determinísticos em comparação com os modelos de respostas ao impulso armazenada são:

- o grande esforço computacional;
- resultados menos precisos, devido a imprecisões nos bancos de dados subjacentes e à natureza aproximada dos métodos de computação numérica.

Por conseguinte, os modelos de canais Estocásticos são baseados na função de densidade de probabilidade, *Probability Density Function* (PDF), ou seja, baseiam-se na representação probabilística da variação do canal a resposta ao impulso. A PDF é uma função contínua que atribui um valor de probabilidade a cada ponto no conjunto de valores. Ela expressa a probabilidade de um evento ocorrer em um intervalo específico, logo, é utilizada para descrever a distribuição da variação do canal. Permite que sejam feitas previsões sobre o comportamento do canal e sejam tomadas decisões para maximizar a confiabilidade e a eficiência da comunicação (UWAECHIA; MAHYUDDIN, 2020). Esses métodos não tem o objetivo de prever a resposta ao impulso em um local específico, mas, do canal como um todo (SHI et al., 2018).

As principais vantagens dos modelos estocásticos são, capturar as variações aleatórias no canal, considerando as condições ambientais. Permitir uma análise de desempenho de

sistemas de comunicação sem a necessidade de medidas em campo. Simular o desempenho de sistemas de comunicação em diferentes condições. Como desvantagens destacam-se: A necessidade de validação experimental. A dificuldade de modelar e avaliar o desempenho de sistemas de comunicação em condições extremas e A complexidade de sua formulação (KIM; LEE; KIM, 2018a).

O exemplo mais simples dessa abordagem é o modelo de desvanecimento de Rayleigh que é utilizado para caracterizar a intensidade do sinal captado no receptor em cada local, mas descreve a intensidade do sinal em uma grande área. Modelos estocásticos de banda larga podem ser criados com o mesmo intuito. A PDF do modelo de canal Rayleigh é dada por uma distribuição de Rayleigh, que é uma distribuição de probabilidade para a amplitude de uma onda aleatória. Uma das aplicações deste modelo é utilizado para descrever canais de propagação multipercurso (KIM; LEE; KIM, 2018b).

De modo geral, os modelos estocásticos são usados para o projeto e comparação de sistemas, enquanto os modelos específicos do local são preferíveis para planejamento de rede e implantação de sistemas de comunicações (KIM; LEE; KIM, 2018b). Além disso, as abordagens determinísticas e estocásticas podem ser combinadas para aumentar a eficiência de um modelo: por exemplo, a potência média em grande escala pode ser obtida a partir de modelos determinísticos, enquanto as variações dentro de uma área média são modeladas por meio da utilização de modelos estocásticos (KIM; LEE; KIM, 2018a).

Em síntese, os modelos de canal são ferramentas importantes para o projeto e desenvolvimento de sistemas de comunicação sem fio, pois auxiliam no entendimento e predição de fatores físicos que afetam o desempenho da comunicação. Com o entendimento das condições do canal e dos fatores físicos que influenciam na propagação do sinal é possível otimizar o desempenho (KIM; LEE; KIM, 2018a).

3.3. Tipos de Modelos de Propagação

Existem diferentes tipos de modelos de propagação, que podem ser classificados de acordo com suas características e tipos de aplicações (AMORIM et al., 2017; EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). Em relação à largura de banda os modelos de propagação podem ser divididos entre modelos de banda estreita e os modelos de banda larga, pois levam

em consideração a largura de banda dos sinais transmitidos pelos canais de comunicações. Exemplos de modelos de banda estreita são os modelos de desvanecimento de pequena e de grande escala. Para um canal de banda estreita não seletivo em frequência, a resposta ao impulso pode ser representada pela expressão $h(t, \tau) = \alpha(t)\delta(\tau)$.

As variações na intensidade do sinal em uma pequena área são normalmente caracterizadas por um processo aleatório, com uma função de autocorrelação que é determinada pelo espectro Doppler. Contudo, para o canal com desvanecimento Rayleigh, o ganho complexo $\alpha(t)$ é caracterizado por um processo gaussiano complexo (JO et al., 2020). A amplitude complexa é modelada como uma variável estocástica gaussiana complexa de média zero e circularmente simétrica (MEIJERINK; MOLISCH, 2014; MOLISCH, 2011).

Outra categoria de modelos de propagação de banda estreita são os modelos de perdas de percurso, em inglês *Path Loss Models*, que consideram a intensidade de sinal recebida em termos de desvanecimento de pequena quanto de grande escala. Existem diversos de modelos de perda de percursos, desde modelos determinísticos até modelos empíricos desenvolvidos para serem usados em situações mais específicas (BERTOLDO et al., 2019; HOOMOD; ALMEJIBLI; JABBOORY, 2018; MOLISCH, 2011).

Os modelos de banda larga, no geral, se subdividem quanto aos perfis de atrasos de potência, tempo de atraso, além de perfis de chegadas de raios e aglomerações, *clusters* de raios transmitidos entre o transmissor e o receptor (ALHASSOUN; DURGIN, 2019; KONONOV; BALANIS, 2010; MOLISCH, 2011; RAO et al., 2015).

3.4. Modelos de Propagação Empíricos para Ambientes Internos

Um dos modelos mais simples é o modelo de propagação em espaço livre, que leva em consideração uma linha de visada direta, representado pela equação de propagação de espaço livre de Friis (ALDHAIBANI; RAHMAN; ALWARAFY, 2020; GARG, 2007), como pode ser observado em (3.1),

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r, \quad (3.1)$$

em que P_r é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, λ é o comprimento de onda, d é a distância entre o transmissor e o receptor, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da

antena transmissora.

Entre os modelos de predição de perdas de propagação, um dos mais utilizados e um dos primeiros a serem desenvolvidos de maneira empírica é o modelo de Okamura-Hata, que será detalhado no presente capítulo, por questões históricas, uma vez que ele não foi projetado para ambientes internos de propagação. Esse modelo possui uma base empírica desenvolvida em medições em ambientes de alta densidade urbana no Japão. Devido ao seu caráter de usar uma base de dados empírica, o modelo Okamura-Hata apresenta diferentes equações para regiões urbanas, suburbanas e rurais, em que a frequência da onda portadora prevista para este modelo varia entre 150 MHz e 2,2 GHz (HOOMOD; AL-MEJIBLI; JABBOORY, 2018), como exemplificado em (3.2),

$$L = 69,55 + 26,16 \log f_c + (44,9 - 6,55 \log h_b) \log d - 13,82 \log h_b - a(h_m), \quad (3.2)$$

Em que L apresenta as perdas de propagação, f_c a frequência da portadora, d a distância entre o transmissor e o receptor, h_b a altura da do transmissor e $a(h_m)$ é o fator de correção da altura de antenas de dispositivos móveis em relação à base, esse fator de correção pode ser representado como mostrado nas Fórmulas de (3.3) a (3.7).

Para áreas de maior adensamento urbano:

$$a(h_m) = 8,29[\log(1,54h_m)]^2 - 11 \quad f_c \leq 200 \text{ MHz}, \quad (3.3)$$

$$a(h_m) = 3,2[\log(11,7h_m)]^2 - 4,97 \quad f_c \geq 200 \text{ MHz}. \quad (3.4)$$

Para áreas menores e consequentemente com adensamento urbano menor:

$$a(h_m) = [1,1 \log(f_c) - 0,7]h_m - [1,56 \log(f_c) - 0,8]. \quad (3.5)$$

Para regiões suburbanas pode ser representado como:

$$L_s = L_{urbano} - 2 \left[\left(\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \right]. \quad (3.6)$$

Para regiões Rurais:

$$L_r = L_{urbano} - 4,78(\log f_c)^2 + 18,33 \log f_c - 40,94, \quad (3.7)$$

em que f_c representa a frequência da onda portadora em MHz, d a distância entre a estação base e o dispositivo, que pode variar entre 1 e 20 km, h_b representa a altura da antena da estação base em metros, podendo variar entre 30 e 200 m, h_m representa a altura do dispositivo móvel

entre 1 e 10 m (GRAGLIA et al., 2009; SILVA; HANCKE, 2016).

O modelo Okamura-Hata em sua forma original foi proposto para aplicações externas, para comunicações móveis principalmente. Seguindo sua proposição inicial, já não representa muitas das situações presentes em sistemas de comunicações modernos. Assim como há diversos modelos de propagação voltados para diferentes situações para aplicações externas ou *outdoor*, também há diversos modelos voltados para aplicações internas, *indoor*. Como o versátil modelo de Log-Distância, ITU-R, Motley-Keenan.

O modelo de Log-distância é baseado em resultados experimentais e apresenta uma alta flexibilidade em suas aplicações, pois pode ser utilizado tanto em aplicações internas quanto externas, ele independe da frequência e do ganho das antenas, usando como base a distância e a potência, como mostrado em (3.8) (JO et al., 2020; PICALLO et al., 2019; ZHANG; XIN; ZHANG, 2013)

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \log \frac{d}{d_0}, \quad (3.8)$$

em que $P_r(d)$ é a potência recebida em uma determinada distância d da fonte transmissora, $P_r(d_0)$ é a potência recebida em um ponto de referência a uma distância d_0 , n é o coeficiente de adensamento do local da medição. Alguns exemplos de valores que n pode assumir são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Coeficiente de adensamento de ambiente do modelo de Log-distância

Ambiente	<i>n</i>
Espaço Livre	2
Área Urbana	2,7 – 3,5
Área urbana pouco obstruída	3 – 5
Interno com linha de visada	1,6 – 1,8
Interno sem linha de visada	4 – 6

Fonte: adaptado de (ZHANG; XIN; ZHANG, 2013).

Um modelo focado para ambientes internos é o modelo ITU-R P.1238-1, desenvolvido pela União Internacional de Telecomunicações, *International Telecommunication Union* (ITU). Uma de suas principais características é levar em consideração a influência de ambientes internos com uma propagação através de múltiplos pavimentos de uma edificação, como pode ser observado em (3.9),

$$L = 20 \log f + N \log(d) + L_f(n_f) - 28, \quad (3.9)$$

em que L_f é um fator de penetração do sinal nos pisos depende diretamente do valor de n_f ; N é o fator do coeficiente de perdas em relação à distância e também é fornecido na descrição do padrão ITU-R P.1238-1, f é a frequência expressa em MHz geralmente, porém esse modelo prevê sua utilização entre 900 MHz e 100 GHz. Os ambientes internos previstos pelo padrão de definição do modelo consistem em ambientes residenciais, comerciais e escritórios (ITU, 2017).

O modelo Motley-Keenan foi desenvolvido para ambientes internos com base no modelo de Log-Distância e foi integrado ao conjunto de modelos de propagação COST 231, sendo também conhecido como COST-231 Motley-Keenan, representado em (3.10) (BERTOLDO et al., 2019; KAR et al., 2016),

$$L = L_o + 10n \log(d) + \sum_{\{i=1\}}^i k_{f,i} L_{f,i} + \sum_{\{j=1\}}^j k_{w,i} L_{w,i}, \quad (3.10)$$

em que, L_o é a perda de propagação a 1 m de distância da fonte transmissora; d é a distância percorrida pelo sinal; n é o coeficiente de propagação, com base nos ambientes a serem transpostos; $L_{f,i}$ são as perdas de propagação através do piso i ; $k_{f,i}$ é o número de pisos atravessados; $L_{w,i}$ são as perdas de propagação através das paredes j ; $k_{w,i}$ é o número de paredes atravessadas. O modelo Motley-Keenan é otimizado principalmente para as frequências de 1,8; 2,4 e 5,2 GHz, o coeficiente de perdas de propagação é mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Coeficiente de perdas por propagação em obstáculos

Obstáculos	1,8 GHz	2,4 GHz	5,2 GHz
Concreto espesso	13	17	36
Vidraça	2	13	15
Parede com janela	2 - 13	13 - 17	15 - 36

Fonte: Adaptado de (KAR et al., 2016).

Na Tabela 3.2 são mostrados alguns dos valores dos coeficientes adotados na aplicação do modelo Motley-Keenan, uma de suas principais desvantagens é a necessidade de um conhecimento amplo de informações do ambiente, apesar de ele não depender diretamente da frequência, este fator influencia na seleção do coeficiente de perdas de propagação em obstáculos.

Em muitos sistemas de comunicações a compreensão dos modelos de propagação pode permitir um desenvolvimento mais acurado das aplicações, prevendo de forma assertiva como o sistema e a relação transmissor-canal-receptor irão se comportar, permitindo assim um desenvolvimento do sistema de comunicações como um todo.

4. PROBLEMAS DE FLUXO DE REDES MULTICOMÓDITE

Neste capítulo são abordados os principais conceitos e trabalhos relativos aos problemas de redes de fluxo multicomódite, um dos principais e mais flexíveis modelos de otimização, utilizado em diferentes áreas, sobretudo em logística e transportes, assim como em algumas aplicações de sistemas de comunicações. O presente capítulo é dividido em duas seções, na Seção 4.1 são abordados os aspectos e conceitos gerais sobre os problemas de fluxo multicomódite.

Na Seção 4.2 são abordados alguns dos principais trabalhos que formam o estado da arte sobre o tema, essa seção é dividida em outras duas subseções, na Subseção 4.2.1 são abordados os trabalhos relativos a aplicações em redes de comunicações que utilizam algoritmo MCF. Na Subseção 4.2.2 são citados trabalhos que utilizam MCF principalmente na área de logística e transportes, que são os primeiros problemas relacionados a multicomódite e suas variações.

4.1. Aspectos Gerais dos Problemas de Fluxo de Rede Multicomódite

Problemas de fluxo de redes multicomódite, *Multicommodity Network Flows*, (MCNF) ou apenas (MCF), são utilizados para modelagem de problemas de otimização, sobre tudo nas áreas de logística, telecomunicações e problemas de fluxos para alocação de recursos (SALIMIFARD; BIGHARAZ, 2022). A modelagem desse tipo de problema foi introduzida por Ford e Fulkerson (1958), para tratar de soluções para o transporte ferroviário de pessoas e mercadorias.

Os problemas de fluxo em rede mais comuns, consideram o transporte de um elemento ao longo dos arcos da rede. Os problemas MCF levam em consideração a existência de múltiplos elementos a serem transportados, ou seja, múltiplas *commodities*, ao longo da rede, entre os nós de origem e destino, por meio dos arcos presentes na malha formada pelo conjunto

de nós e arcos interligando este conjunto de nós.

Os problemas de otimização multicomódite, no geral, apresentam além da função objetivo, que buscam maximizar o fluxo na rede ou diminuir os custos dos transporte, também apresentam restrições, relativas a conservação do fluxo entre os nós da rede, restrições de capacidade e restrições demanda. Essas restrições são modeladas de acordo com as características dos problemas analisados (FU et al., 2022; ZHANG et al., 2020).

Dessa forma, os problemas MCF consistem em otimizar os problemas fluxo de comódites pela rede, levando-se em consideração a demanda de cada nó de destino, a capacidade de fornecimento de cada nó de origem, além das restrições de capacidades e os custos de transporte entre o nó de origem e um nó de destino.

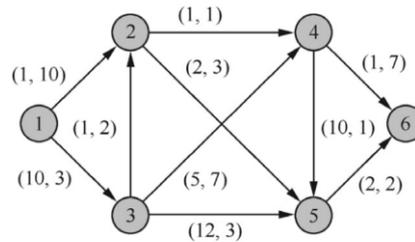
Outro pioneiro na busca da resolução desse tipo de problema foi Hu (1963), que a partir dos trabalhos de Elias; Feinstein e Shannon (1956) e Hakimi (1962) estabeleceu a prova matemática para a maximização de fluxo de duas *commodities* em uma rede, por meio de uma variação do método de maximização de fluxo proposto em (FORD; FULKERSON, 1958). Chamado de método de ciclo de fluxo, primeiramente é feita a análise do fluxo completo de uma das comódite por toda a rede e posteriormente é realizada a análise do fluxo para a segunda comódite.

Apesar de sua complexidade poder crescer de forma substancial e da mesma forma sua demanda computacional para a resolução dos problemas de otimização, problemas *multicommodity* podem ser decompostos como a soma de problemas *single-commodity*, permitindo uma simplificação sistêmica de soluções (ZHANG et al., 2020).

De forma geral, problemas de fluxo de mulicomódite podem ser modelados como problemas lineares, *Linear Problems* (LPs) de fluxo de rede, em que uma rede é definida como um conjunto de nós N , conectados por meios de arcos com capacidade não negativa e finita. O problema MCF também pode ser formulado como um problema de programação linear inteira, em que a meta é maximizar o fluxo total de comódite, sujeito a restrições de capacidade de transporte, demanda de comódites e outras restrições específicas do problema. O problema é complexo, pois envolve o balanceamento de várias restrições simultaneamente, além de ter que levar em conta diferentes tipos de comódites que podem ter demandas e restrições diferentes. Além disso, pode haver custos diferentes associados com cada tipo de comódite, e portanto, a escolha de rotas para cada comódite pode ser diferente. (ARIF et al., 2020; CHAKRABORTY

et al., 2021; DA SILVEIRA FARIAS; BORENSTEIN, 2017; DAI; ZHANG; SUN, 2017; JIA et al., 2018; YANG; WU; JIA, 2017; ZHANG et al., 2018a).

Figura 4.1 – Representação de grafo de fluxo de rede.



Fonte: Adaptado de (DAI; ZHANG; SUN, 2017).

Conforme mostrado na Figura 4.1, os problemas MCF podem ser modelados como uma rede, em que a commodity deve ser transportada entre um nó de origem e o nó de destino. Os valores contidos em cada um dos arcos, são a revelação de custo e capacidade entre a ligação entre os nós. Essas commodities podem representar chamadas telefônicas em uma rede de telecomunicações, solicitações de acesso a um servidor. Os sinais contendo informação e energia, veículos em uma frota logística (KAZEMI et al., 2021; NISHI et al., 2020; YAN et al., 2021).

Cada commodity possui um conjunto único de características e elas não são intercambiáveis, ou seja, não é possível satisfazer a demanda por determinada commodity por meio de outra. No geral, o objetivo do problema MCF é manter um determinado nível de fluxo da commodity por meio de um determinado arco da rede minimizando os custos.

Os problemas MCF são bastante flexíveis, dependendo de como se define cada *commodity*. Existem três maneiras principais: uma commodity pode se originar em um subconjunto de nós na rede e ser destinada a outro subconjunto de nós, ou pode se originar em um nó único e ser destinada a um subconjunto de nós, ou pode se originar em um único nó e ser destinada a um único nó. Essa flexibilidade permite que eles sejam utilizados em diferentes situações e modelados com diferentes níveis de complexidade. No geral, os problemas MCF são considerados Problemas Numéricos NP Difícil (JIA et al., 2018; KRISHNENDU; BHARATH; BHATIA, 2019). De (4.1) a (4.4) é mostrado uma forma generalista de representar os problemas MCF (SARITHA; VINOD CHANDRA, 2019; TRDLIČKA; HANZÁLEK, 2012; YANG; WU; JIA, 2017; ZHANG et al., 2018a),

$$\min Z(x) = \sum_{k \in K} \sum_{i,j \in A} c_{ij}^k q^{\{k\}} x_{ij}^k, \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$\sum_{ij \in A} x_{ij}^k - \sum_{ji \in A} x_{ji}^k = b_i^k, \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (4.2)$$

$$\sum_{ij \in A} q^k x_{ij}^k \leq d_{ij}, \quad \forall ij \in A \quad (4.3)$$

$$x_{ij}^k \geq 0, \quad \forall ij \in A, \forall k \in K, \quad (4.4)$$

em que, A é o conjunto de arcos na rede, $\forall ij \in A$; N é o conjunto de nós da rede; $\forall i \in N$; K é o conjunto de comódites; k é uma comódite específica, $\forall k \in K$; x representa a variável de decisão; x_{ij}^k é a uma fração da comódite k , transportada pelo arco ij , $\forall k \in K, \forall ij \in A$; $q^{\{k\}}$ é a quantidade total da comódite k , $\forall k \in K$; c_{ij}^k representa o custo do arco ij sobre o fluxo da comódite k ; d_{ij} é a capacidade do arco i, j ; b_i^k é o suprimento do nó i da comódite k .

Em (4.1) é representada a função objetivo que apresenta a minimização dos custos por arco para transportar uma quantidade da comódite pelo conjunto de arcos da rede, por meio do somatório dos produtos entre o custo do fluxo por um arco, pela quantidade transportada pelo arco. Em (4.2) é representada a restrição de conservação de fluxo nos arcos entre as fontes e os destinos. Em (4.3) denota os valores fluxos de diferentes comódites e em (4.4) é a restrição de não negatividade.

A forma apresentada de (4.1) a (4.4) é conhecida como a forma nó-arco da representação de problemas MCF. Existe outra forma bastante comum, proposta por Tomlin (1966), conhecida como forma arco-caminho, em que o fluxo da rede é devido em caminho de fluxo e ciclos de fluxos, de acordo com as premissas dessas forma de tratamento de problemas MCF, qualquer vetor de fluxo em um arco pode ser expresso como um fluxo de caminho simples. Como pode ser observado de (4.5) a (4.8),

$$\min Z(f) = \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} P C_p^c f_p \quad (4.5)$$

sujeito a:

$$\sum_{p \in P^k} f_p = d^k, \quad \forall k \in K, \quad (4.6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^k} (\delta_a^p) f_p \leq u_a, \quad \forall a \in A, \quad (4.7)$$

$$f_p \geq 0 \quad \forall p \in P^k, \quad \forall k \in K, \quad (4.8)$$

em que P^k representa o conjunto de todos os caminhos possíveis entre o nó de origem e o nó de destino de cada uma das comódites, f_p é uma variável de decisão de um caminho p de uma comódite k para $p \in P^k$, d^k é a demanda pela comódite k e PC_p^k é o custo do caminho p usando o arco com custo c_{ij}^k , δ_a^p é um indicador binário, que é igual a 1 quando passa pelo arco a e 0 caso contrário.

Em (4.1) é mostrada a restrição em que o total dos fluxos entre o nó de origem e o nó de destino deve ser igual à demanda pela comódites k , em (4.7) é mostrada a restrição de capacidade dos arcos, em que o fluxo deve ser igual ou menor que a capacidade total de cada arco, em (4.8) é representada a restrição de não negatividade para f_p .

Quanto mais complexo o modelo de predição de perdas de propagação, mais parâmetros serão levado em consideração e mais complexa a sua representação. O modelo MCF proposto nesse trabalho, ao invés de representar dessa forma, representa um conjunto de equações para otimização dos parâmetros, baseados em modelagem MCF. Apesar de parecer mais complexo que outros modelos, sua implementação, principalmente em nível de algoritmo, pode ser feita de forma mais objetiva.

A modelagem descrita nas equações (4.1) a (4.4) representa um canal de Comunicações que inclui componentes tais como enlaces, frequências de ondas portadoras, desvanecimento, refração, difração, permitindo uma representação mais próxima aos modelos tradicionais já analisados. Este modelo tem demonstrado melhor desempenho em comparação a outros modelos analisados.

Uma das principais características dos problemas MCF consiste na capacidade de distinção entre diferentes comódite na solução final, dessa forma, muitos problemas com aplicações reais podem ser representados por meio desse tipo de problema. Deste modo, Salimifard e Bigharaz (2022) elencam três principais áreas de aplicação de sistemas MCF: Logística, principalmente para solução de problemas de transporte e engenharia de tráfego; Comunicações e rede de computadores e por fim setores econômicos diversos como agricultura.

4.2. Estado da Arte

Devido a característica de poder expressar o resultado de diferentes comódites na versão de problemas de otimização, problemas MCNF têm sido empregados em aplicações no meio industrial e comercial, pois podem ser utilizados em problemas que necessitam de algum tipo de *trade-off*, ou seja, em que há decisões concorrentes, em que uma decisão acarreta a influência sobre alguma variável dependente, como por exemplo, transportar em um modal com maior volume de carga, porém mais lento, ou transportar um volume menor em um modal mais rápido.

4.2.1. MCF aplicados em redes de comunicações

No âmbito das aplicações MCF em redes de comunicações, a principal problemática abordada na literatura é com relação à alocação de recurso e otimização dos caminhos de rede. Com o surgimento da internet das coisas, muitas aplicações passaram a ter recursos e condições heterogêneas, tornando a modelagem e otimização desse tipo de sistema de comunicações potencialmente mais complexas (ABDELWAHAB et al., 2014; AHMAD et al., 2017).

No geral, a transferência de uma mensagem por meio de uma rede de telecomunicações requer algoritmos de roteirização e encaminhamento para encontrar um caminho ideal ou otimizado para atender a demanda dos usuários. Beljadid; Hafid e Boushaba, (2013) propuseram um modelo para calcular o impacto das falhas dos sistemas de comunicações no usuário, utilizando MCNF. Por sua vez, Samani e Wang (2018) propuseram a utilização da modelagem MCF para maximização da confiabilidade para sessões de transmissão ao vivo (*streaming*), por meio do gerenciamento da largura de banda e melhoria da qualidade de serviço.

A demanda de utilização de serviços de rede é um tipo de problema em que aplicação de modelos MCF apresenta diversos tipos de aplicações. Como na minimização da utilização máxima da rede, ou seja, diminuir as situações em que a capacidade de máxima da rede seja utilizada, garantindo ainda uma racionalidade nos custos do sistema (ZHANG et al., 2018b,

2018c).

Além de problemas relativos a falhas e confiabilidade de sistemas de comunicações, a modelagem MCF também pode ser utilizada em problemas de otimização de fluxo de rede, como mostrado em Masri; Krichen e Guitouni (2015). Neste trabalho foi utilizado MCF como um método de busca de vizinhança³, utilizando o método das múltiplas partidas do sinal, em que é simulado o nó de origem a partir de diferentes pontos, para resolver o fluxo de informações utilizando um único caminho. Por sua vez, Venkatadri, Elaskari e kurdi (2017) desenvolveram um problema de rede multicomódite baseado na formulação do caminho do arco para o problema de formação de células multiperíodo⁴.

Em Teyeb et al. (2014) propuseram para minimizar a carga de tráfego entre centrais de dados, *data centers*. Bialoń (2017) foi apresentada uma abordagem similar, porém utilizou MCF para a diminuição de congestionamentos de redes para aplicações de redes definidas por software. Ainda na temática de rede definida por software, há a aplicação de modelos MCF com a utilização de algoritmo genético para a resolução de problemas multiobjetivos em aplicações desse tipo de rede, como mostrado em (FARRUGIA; BRIFFA; BUTTIGIEG, 2018, 2019).

Uma categoria de utilização de problemas MCF é a minimização dos custos. Zhang e Fan (2017) focaram na modelagem do efeito da interdição do fluxo na rede por meio da alteração dos custos para transportar as comódites por cada arco da rede, em que os custos são os efeitos de perdas causados pelo transporte. Gebremariam e Bikdash (2013) aplicaram o MCF para minimizar custos de transportes enquanto utilizavam o método do caminho de desacoplamento, ou seja, utilizar caminhos auxiliares para garantir o atendimento da demanda no nó de destino.

Ainda dentro do contexto de minimização de custos, Balakrishnan; Li e Mirchandani (2017), desenvolveram um projeto de rede *multicommodity* de custo mínimo com modelo de requisitos de serviço de ponta a ponta, considerando restrições de taxa de transmissão e latência.

³ os métodos de busca de vizinhança funcionam procurando a melhor solução em um conjunto limitado de soluções adjacentes a uma solução atual. O intuito é iterar sobre estas soluções adjacentes para encontrar a melhor solução global, que é considerada ótima para o problema em questão (FU et al., 2022).

⁴ Os problemas de formação de células multiperíodo são desafios enfrentados na implementação de redes celulares, por exemplo. Em que envolvem a alocação de recursos em múltiplos períodos, com o intuito de maximizar o desempenho da rede. Estes problemas são geralmente formulados como otimizações combinatórias, em que a alocação de recursos, como espectro de frequência, potência de transmissão e largura de banda, precisam ser considerados em cada período (*slot*) de tempo (SONG; JEON, 2018).

Hung e Chien (2019) utilizam uma abordagem similar para o desenvolvimento de um modelo multicusto-multicomódite, para aplicações no gerenciamento de redes de telecomunicações em que possa haver uma maior variação entre os custos incorridos em cada arco da malha.

Aliado aos problemas de minimização de custos ou maximização dos fluxos em problemas de redes, a modelagem MCF também pode ser aplicada em problemas em que as restrições possam apresentar um elevado nível de complexidade computacional, devido ao elevado número de restrições. Em Sallam et al. (2018) foi utilizada essa modelagem nas aplicações de cadeias de funções de serviços, *Service Function Chains* (SFC), para o gerenciamento servidores, com a presença de funções físicas de rede, *Physical Network Functions* (PNF) e funções virtuais de rede, *Virtual Network Functions* (VNF), os autores utilizaram a modelagem multicomódite para o otimizar a gestão de recursos presentes e disponíveis em servidores de rede de internet, de forma a maximizar a disponibilidade dos serviços, como mostrado em (4.9) a (4.12)

$$\max \lambda, \quad (4.9)$$

sujeito a:

$$\sum_{p \in P_{\alpha_i}} x_p \geq \lambda, \forall \alpha_i, \quad (4.10)$$

$$\sum_{\alpha_i} \sum_{e \in p, p \in P_{\alpha_i}} x_p \geq \lambda, \forall \alpha_i, \quad (4.11)$$

$$x_p \geq 0, \forall p \in P_{\alpha_i} \quad (4.12)$$

em que, 4.4 é a função objetivo que tem o intuito de maximizar a taxa de transmissão de dados λ , 4.10 é o fluxo total da comódite α_i sob todos os caminhos possíveis. 4.11 assegura que o montante do fluxo de todas as comódite não exceda o limite de capacidade da rede, x_p denota a quantidade de fluxo sobre o caminho p .

Uma abordagem similar foi desenvolvida em Chemodanov et al. (2020), também focando nas estruturas de servidores, porém considerando um maior efeito da distribuição geográfica da infraestrutura de telecomunicações e questões relativas a computação de borda, *edge computing* e IoT, em que a sensibilidade à latência das comunicações deve ser considerada como um fator crítico. Utilizando MCF no desenvolvimento de sua aplicação os autores obtiveram melhoras significativas no desempenho em termos de latência das comunicações

entre os elementos da rede, graças a alocação otimizada, de acordo com as restrições de fluxo e demanda dos elementos presentes na rede.

4.2.2. *Logística, transporte e aplicações diversas*

Os problemas de fluxo de rede multicomódite surgiram com o objetivo de otimizar justamente problemas de logística e transportes. Problemas de redes de telecomunicações, alocação de recursos computacionais, entre outras aplicações de problemas MCF são derivações desse tipo de problemas presentes em logística (JIA et al., 2018; SALIMIFARD; BIGHARAZ, 2022).

O setor de transportes é altamente competitivo e afeta as operações de diferentes tipos de negócios. Logo, a otimização do fluxo de mercadorias entre diferentes tipos de modais de transporte (rodoviário, ferroviário, aquaviário, aeroviário...), pode ser crucial para gerar valor aos clientes e competitividade das organizações, neste contexto, além disso, o tráfego em estradas proveniente de um número crescente de veículos cria problemas relacionados à mobilidade, como congestionamento, problemas ambientais como poluição do ar, poluição sonora e acidentes de trânsito. Assim, a utilização de ferramentas de otimização como MCF fornecem uma estrutura para auxiliar na tomada de decisões (FARAHANI et al., 2013; KUMAR; KAUR, 2011).

Dessa forma, problemas como a utilização de programação e roteirização de veículos em problemas de fluxo multicomódite são amplamente utilizados, como devolvido em Psaraftis (2011), em que foi proposto um sistema de programação dinâmica para problemas de coleta e entrega de várias comódites para situações com apenas um ou múltiplos veículos realizando a entrega. Embora tenha sido observado que a demanda computacional aumenta significativamente, especialmente quando são considerados múltiplos veículos com capacidades diferentes, foi comprovado que a solução de problemas subótimos ⁵é eficaz na

⁵ As soluções subótimas são alternativas ao ótimo global, que não são ideais porém atendem aos requisitos

satisfação de boa parte das demandas práticas em aplicações.

O conceito de fluxo de multicomódites também é usado na indústria do petróleo, como por exemplo para determinar o transporte ideal de comódites como gasolina, querosene de aviação e diesel em uma rede de dutos conectando campos de petróleo, refinarias, portos e clientes. Nesse caso, eles desenvolveram um modelo dinâmico de uma rede de dutos multicomódites que leva em consideração os efeitos dinâmicos da pressão, velocidade e densidade do fluido no transporte de commodities, com bombas interconectadas. Além disso, eles estenderam um modelo híbrido que previa interfaces de contaminação em cada segmento de tubulação (NOGUERA; LEIRENS, 2010).

Além disso, os autores estenderam um modelo híbrido que prevê interfaces de contaminação em cada segmento de tubulação. Com base na definição de um problema de alocação multicomódites com custos fixos de atribuição, foi desenvolvida uma formulação de programação linear inteira. Uma abordagem em camadas de duas etapas foi usada, incluindo cenários de agregação de requisitos parciais no primeiro estágio e decomposição no próximo nível para a resolução final do problema (NOGUERA; LEIRENS, 2010).

Além de problemas relativos à otimização em rede, problemas MCF também podem ser usados para resolução de problemas de alocação de mão de obra, como desenvolvido em Mesquita et al. (2015) para realizar a distribuição da escala de trabalho de motoristas de ônibus urbano, considerando padrões de folga como uma das restrições, para a redução dos custos operacionais. Foi desenvolvido um modelo de atribuição/cobertura e dois problemas multicommodities diferentes foram integrados na forma de programação linear inteira mista.

Em Jin (2012), foi abordado o efeito de ondas cinemáticas em problemas de fluxo multicomódite para a gestão de fluxo de tráfego em redes rodoviárias. As ondas cinemáticas em um arco de um sistema podem ser determinadas por sua condição inicial e o estado estacionário predominante, permitindo uma simplificação computação de sistemas dinâmicos, dessa forma, desenvolvendo uma forma viável para a resolução de problemas complexos de gestão de tráfego.

Posteriormente o mesmo autor analisou os efeitos da variação de velocidade no

e objetivos de uma determinada aplicação com resultados aceitáveis e satisfatórios. Essas soluções, no geral, requerem menos tempo de processamento ou recursos computacionais em comparação com a solução ótima global. São comumente utilizadas em problemas de otimização que são muito complexos ou não são facilmente resolvidos com precisão, como em problemas de malhas logísticas de grande porte (FU et al., 2022).

transporte das *commodities*, o que pode representar a utilização de diferentes modais de transporte presentes na mesma rede de transporte, como por exemplo, realizar parte do transporte por via terrestre, aérea e marítima, situação corriqueira no desenvolvimento do transporte global (JIN, 2017).

Em Bevrani et al. (2020), foi realizado um estudo aprofundado sobre os efeitos da integração do transporte multimodal no modelo MCF. Os autores consideraram fatores como velocidade, capacidade de carga dos veículos e outros elementos que podem afetar a confiabilidade e precisão do modelo. Uma das principais contribuições deste trabalho foi a inclusão de funções de redução de fluxo, considerando as transferências de *commodities* entre diferentes modais de transporte. Além disso, o trabalho também destacou a importância da análise dos efeitos da integração do transporte multimodal na rede de transporte.

Seguindo essa tendência de análise de múltiplos modais de transporte, Wright et al. (2017) analisaram a influência de modelos macroscópicos de redes de transportes de larga escala, que consideradas as distâncias percorridas, desde a fonte da matéria prima até o destino, como resultado foi desenvolvido um sistema de simulação para os aspectos macroscópicos de redes de transporte globais.

Em Karimi e Bashiri (2018) foi considerado além dos efeitos do transporte multimodal, os impactos da presença *hubs* logísticos na rede de transporte. O *hub* logístico é um ponto intermediário crítico na rede de transporte, em que ocorre a concentração do fluxo de *comódites* vindo do nó de origem para o *hub*. Isto requer uma maior capacidade de fluxo no arco entre esses dois pontos. Por outro lado, a distribuição do fluxo da *comódites* a partir do *hub* para os nós de destino é mais dispersa, exigindo uma capacidade de fluxo menor, contudo oferecendo, em geral, uma ampla gama de opções de transporte e maior flexibilidade para atender as demandas dos nós de destino.

Além dos aspectos de larga escala, a aplicação de problemas MCF é comumente encontrada em situações de transporte específicas, como a desenvolvida em Yaghini e Akhavan (2012), os autores focaram na aplicação de MCF no planejamento dos valores de frete no transporte ferroviário, levando em consideração, trechos reais de transporte, em que as mercadorias seriam transportadas, como principal contribuição, os autores desenvolveram um sistema que auxilia na tomada de decisão de quando utilizar determinados trechos, com base no volume a ser transportado e as características dos arcos entre a origem e o destino, mas considerando as decisões tanto em nível estratégico, tático e operacional, além de fatores como

bloqueios de vagões, distribuição de vagões vazios ao longo da composição.

Além da flexibilidade de poderem ser aplicados em diferentes situações, os problemas de fluxo multicomódites podem ser resolvidos utilizando métodos de decomposição, métodos heurísticos ou métodos exatos. Em Karsten et al. (2015) foi desenvolvido aplicado o MCF com uma rede de grafos para problemas de transporte de mercadorias por via marítima, foi considerada uma restrição de tempo de trânsito da comódite em um determinado arco da rede, de forma a representar sanções e encargos devido a atrasos de mercadorias.

Os trabalhos, desenvolvidos utilizando fluxo de multicomódites, além de buscar a implantação em um determinado tipo de problema específicos, também são comumente empregado em situações relativas aos métodos de resolução utilizados para resolver esse tipo de problema computacional.

Como por exemplo, em Quilliot, Liberalino e Bernay (2014), é apresentado um algoritmo para otimização do transporte corporativo de trabalhadores, de forma a buscar otimização do tempo de transporte e dos custos. O problema foi modelado utilizando MCF em uma rede dinâmica. Para a resolução foram utilizadas técnicas de decomposição e agregação hierárquica em conjunto com a meta-heurística de procedimento de pesquisa adaptável aleatória gulosa, ou em inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP), que consiste em criar uma solução inicial e depois efetuar uma busca por soluções ótimas locais. Para a técnicas GRASP só é considerado um resultado como solução quando ele atende a todas as restrições do problema.

Uma abordagem similar utilizando GRASP, para resolução dos problemas multicomódite, foi utilizada em Ríos-Mercado, López-Pérez e Castrillón-Escobar (2013), aplicado em uma indústria de bebidas engarrafadas, considerando variações nas demandas de pedidos e a heterogeneidade da frota, acarretando na variação na capacidade e custos de transporte.

Em Cortés et al. (2013) foi desenvolvido um algoritmo utilizando uma abordagem focada em custos como uma função côncava, ou seja, os custos por unidade com o aumento do volume de itens transportados diminui até certo ponto, chegando a um momento de inflexão em que os custos passariam a aumentar em decorrência do aumento do volume.

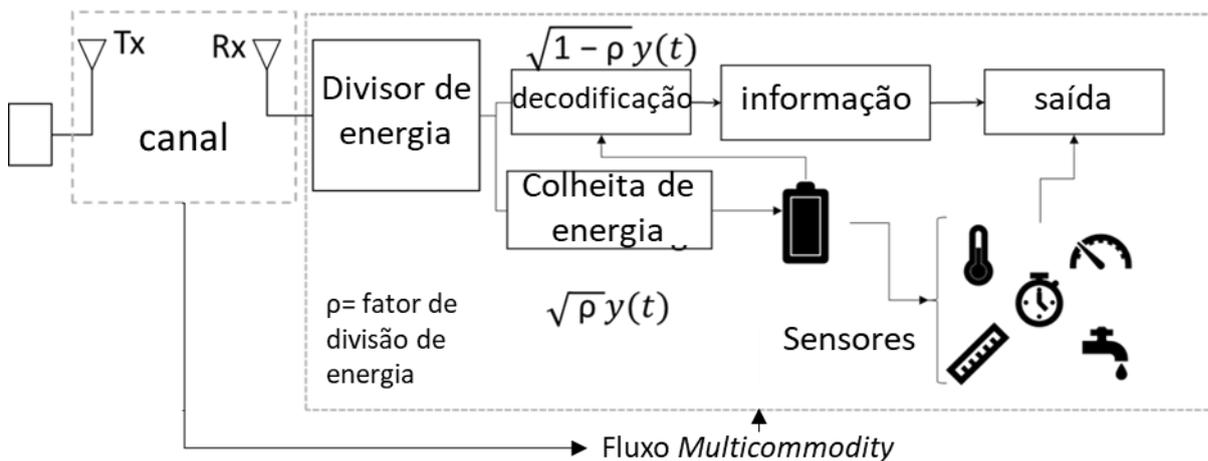
5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da tese.

5.1. Materiais e Métodos Computacionais Utilizados

A presente pesquisa se divide em duas etapas principais, análise computacional e medições empíricas. Primeiramente uma análise computacional com base na modelagem de problemas de fluxo multicomódite (MCF), fazendo as considerações em relação a aplicações de transmissão simultânea de informações e energia (SWIPT). No caso, as *commodities* foram modeladas como a informação e energia excedente, além da necessidade da realização da decodificação da informação, conforme mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Modelo de SWIPT de divisão de potência



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Em termos gerais, as equações para problemas de fluxo de rede multicomódites são expressas usando o conceito de fluxo de rede, que é uma representação matemática de um sistema composto por um conjunto de nós conectados por arestas, através das quais os fluxos de diferentes comódites circulam. Cada comódite pode ter diferentes origens, destinos e

demandas, e pode ser transportada por diferentes rotas no sistema.

No caso foi considerado um sistema SWIPT de divisão de potência aplicado em um ambiente interno, obtendo-se em (5.1)

$$\max: Z \left(x_{i,j}^{\{k\}} \right) = \sum \sqrt{1 - \rho} \vec{y}_{i,j}^{\{k\}} p_{i,j}$$

sujeito a: (5.1)

$$\sum \left(\sqrt{\rho} \vec{y}_{i,j}^{\{k\}} \right) > 0, \forall (i, j) \in A, \forall k \in K, \quad (5.2)$$

$$\sum \left(\eta_{i,j} + \sqrt{\rho} \vec{y}_{i,j}^{\{k\}} p_{i,j} \right) \leq 32,44 + 10n \log(d) + 10n \log(f) \geq 0, \quad (5.3)$$

$$\forall (i, j) \in A, \forall k \in K,$$

$$\vec{y}_{i,j}^{\{k\}} > 0, \forall (i, j) \in A > 0, \forall k \in K > 0. \quad (5.4)$$

O objetivo principal é maximizar a captação de energia do sinal RF, garantindo a decodificação e demodulação da informação. Em que, ρ , representa o fator de divisão de potência do sinal. $y_{i,j}^{\{k\}}$ é o sinal recebido carregando a *commodity* k pelo arco i, j , que podem representar os enlaces do sistema, que pode ser representada em 5.5

$$y_{i,j}^{\{k\}} = x_{i,j}^{\{k\}} \mathbf{H}_{i,j} + \boldsymbol{\eta}_{i,j}, \quad (5.5)$$

em que: $x_{i,j}^{\{k\}}$, representa o sinal transmitido contendo as *commodities* k no arco i, j , $\mathbf{H}_{i,j}$, é a matriz do canal, $\boldsymbol{\eta}_{i,j}$, é o ruído como uma variável gaussiana circularmente simétrica.

A modelagem de fluxo multicomódite é utilizada no desenvolvimento de problemas de redes de telecomunicações, de forma consolidada. Na presente tese, foi utilizada a modelagem multicomódite para avaliar o desvanecimento do canal de comunicações sem fio, focando-se em ambientes industriais internos, balizando-se na implantação de aplicações SWIPT-IoT.

Além da simulação e resolução numérica das equações e fórmulas das MCNF, para se chegar no a resultado do perfil de perdas de percurso do ambiente analisado, foram realizadas medições práticas emulando o ambiente e as rotinas operacionais de um ambiente industrial, onde se planeja a possível instalação de sensores e dispositivos IoT.

Essas emulações foram feitas por meio da disposição de anteparos metálicos, com múltiplas medições na linha de visada ou nas proximidades do transmissor e do receptor. Também foram realizadas medições com a manutenção da linha de visada, ou obstrução da

linha de visada de forma total ou parcial. Os anteparos foram posicionados de forma a gerar efeitos de perturbação nas ondas como reflexão, difração e efeito de gume de faca.

Para realizar a simulação e resolução computacional das equações do modelo, foram utilizados software de solução numérica compatível com GNU Octave, além da linguagem de programação Python e bibliotecas com licenciamento aberto, como Numpy, Matplotlib e o *solver* Pulp, em um computador com 8 Gb de memória RAM, processador Intel Core i5 modelo 7200U.

Em termos, computacionais o algoritmo para a representação do fluxo máximo entre a origem (Tx) e o destino (Rx), pode ser representado conforme mostrado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 Representação de Fluxo Máximo

1. Inicialize o fluxo da rede $y_{ij} = 0$ e os custos de cada arco a_{ij} (perdas de percurso), defina a capacidade máxima de transmissão de dados e energia para cada arco e as demandas de cada comódite (fator ρ de divisão entre retificação de sinal e demodulação e decodificação)
2. Encontre o caminho de custo mínimo entre a origem e destino de cada comódite (no geral, linha de visada).
3. Encontre (estimativa) demais caminhos que influenciam na recepção do sinal no destino.
4. Determine o fluxo que pode ser transportado ao longo do caminho de custo mínimo encontrado no passo 2.

a. Se

a capacidade máxima do arco não for suficiente para atender à demanda da comódite, ajuste a quantidade de fluxo de acordo com a capacidade máxima.

Ao atender a comódite de decodificação e demodulação da informação, excedente de energia para retificação.

5. Atualize o fluxo y_{ij} e o custo associado aos arcos a_{ij} , considerando a quantidade de fluxo transportado no passo 4. Se houver sobra de capacidade em algum arco, o custo associado a esse arco pode ser reduzido.
-

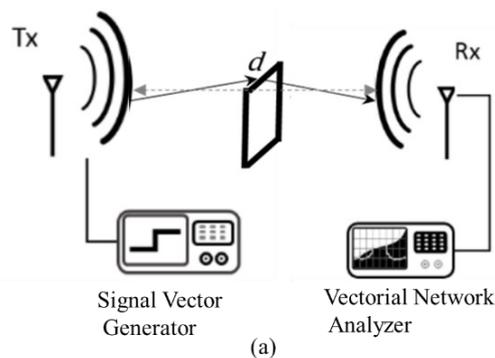
-
6. Repita os passos 2 a 4 até que todas as comódites tenham suas demandas atendidas ou que não seja possível transportar mais fluxo na rede.
 7. Calcule o custo total de transporte de comódites na rede, somando os custos a_{ij} de cada arco multiplicados pela quantidade de fluxo y_{ij} transportado.
 8. Fornecer o resultado da otimização, mostrando o valor esperado após considerar as perdas de propagação.
-

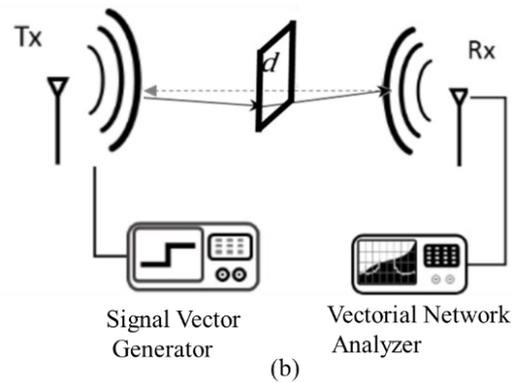
As frequências analisadas foram de 915 MHz, 2,4; 3 e 3,5 GHz, que representam desde aplicações de frequências Industriais, Científicas e Médicas, *Industrial Scientific and Medic (ISM)*, a aplicações de redes móveis. O modelo proposto foi comparado com outros modelos utilizados para avaliação de perdas de percurso em ambientes internos, como o ITU-R P.1238, COST 231 Motley-Keenan.

5.2. Materiais e Métodos de Medições

Foram realizadas medições utilizando um Analisador de Rede Vetorial (VNA - *Vector Network Analyzer*), da fabricante Rohde & Schwarz modelo ZVB20, além de um Gerador de Sinal Vetorial também da fabricante Rohde & Schwarz modelo SMVB100A. Na Figura 5.2 são mostrados exemplos das configurações de medições utilizadas

Figura 5.2 – Estrutura para Medição





(c)

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Conforme mostrado na Figura 5.2a e 5.2b, foram utilizadas duas antenas de referências modelos HL-040 e A.H. Systems 270.3.A. Foi utilizada uma placa metálica, para introduzir efeitos como difração, sombreamento, reflexão e interrupção da linha de visada, as antenas assim como a placa metálica tiveram sua distância alternada entre 1 e 5 metros, também foram medidas as perdas para potências de transmissão de 0, 1, 10, 20 e 30 dBm. A partir dos dados de medição foram inseridos no modelo computacional para avaliação dos resultados.

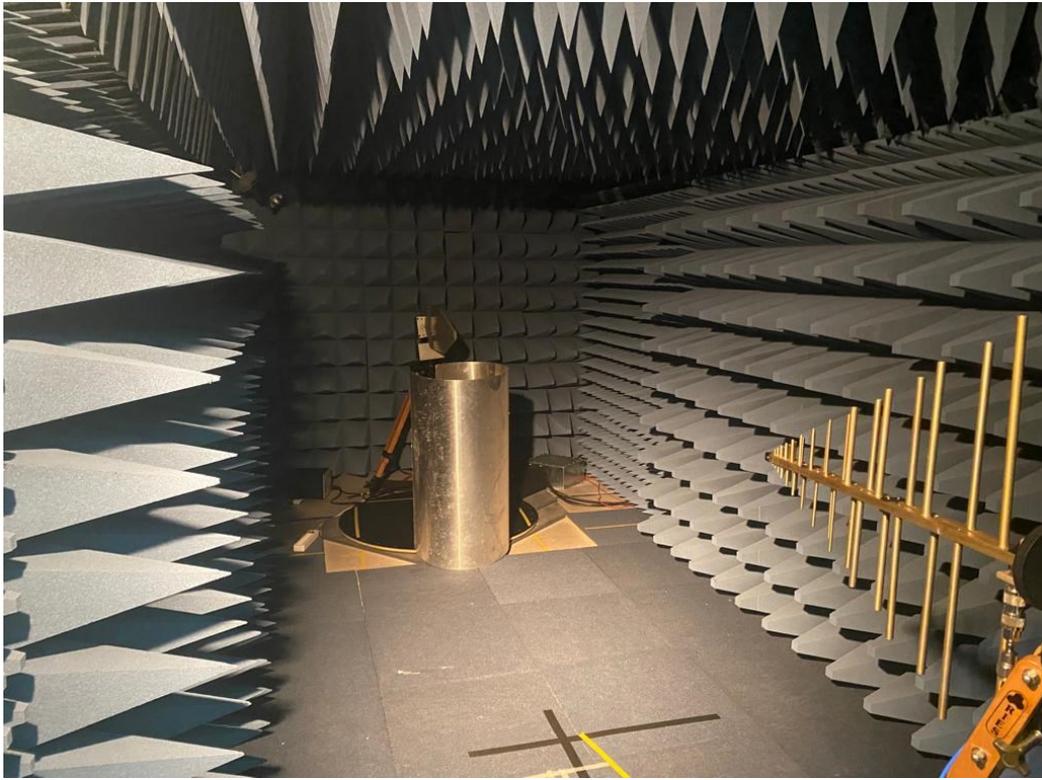
Para a medição do indicador de força de sinal recebido, *Received Signal Strength Indication* (RSSI), o VNA foi substituído pelo analisador de espectro da fabricante Rohde & Schwarz, modelo FSL6, com frequência de até 6 GHz, na estrutura de medição descrita. Foram realizadas medições sem obstruções, com linha de visada entre a antena transmissora (Tx) e a antena receptora (Rx), além da inserção de anteparos metálicos para realizar medições com presença de fenômenos de propagação como, reflexão, difração e obstrução da linha de visada.

A medição do RSSI foi realizada nas frequências de 950 MHz, 2,4, 3 e 3,5 GHz, com as potências de transmissão variando entre -30, -20, -10, -1, 0, 1, 10, 20, 30 dBm, com o intuito de analisar a distribuição de probabilidade empírica, dos valores medidos de RSSI. Em (5.1) é mostrada a forma de cálculo do RSSI utilizado, conforme (SHANG et al., 2014)

$$RSSI = P_t - P_L(d), \quad (5.1)$$

em que, P_t é potência transmitida e $P_L(d)$ é perda de percurso para a distância d . Também foram realizadas medições na câmara anecoica, ETS Lindgren, modelo 81 377, as medições na câmara foram realizadas com o objetivo de se obter valores de referência, para traçar o perfil de perdas em ambientes controlados.

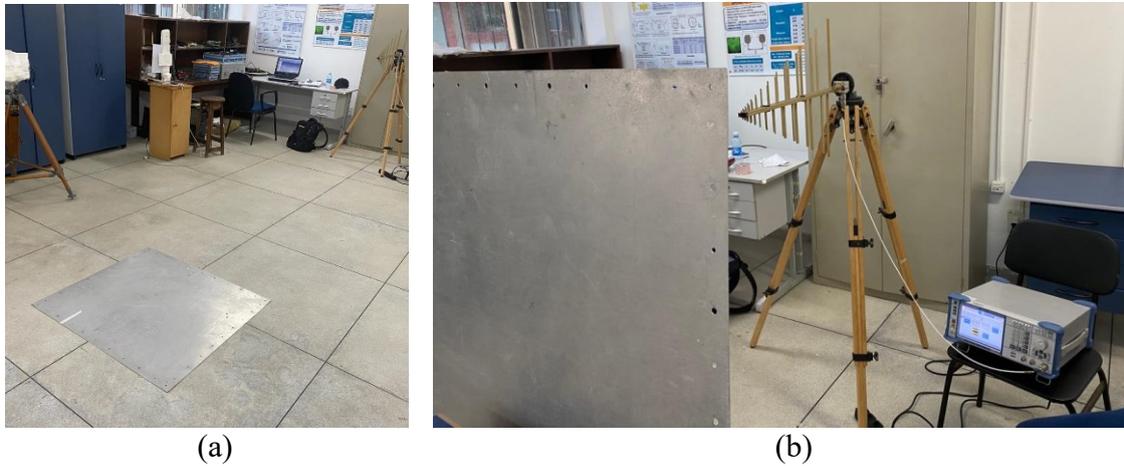
Figura 5.3 Medição de valores de referência em câmara anecoica



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Conforme mostrado na Figura 5.3, as antenas Tx e Rx foram posicionadas em linha de visada e foram feitas medições variando-se a posição das antenas uma relação a outra, além da inserção de anteparos para medições, tanto com linha de visada, quanto com obstrução parcial das antenas. A cada variação de posição, as medições tanto na câmara anecoica, como no ambiente interno do laboratório foram repetidas diversas vezes para a obtenção de valores médios das medições em diferentes configurações de frequência, potência e distância entre as antenas.

Figura 5.4 Medições em ambiente interno



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Figura 5.4, são apresentados exemplos de medições realizadas em condições simuladas de ambientes industriais internos. A partir da agregação dos dados medidos, variáveis foram usadas para ajustar o modelo MCF, tornando-o mais próximo dos valores observados. O modelo desenvolvido nesta pesquisa é semideterminístico, considerando a existência de incertezas no comportamento do canal, mesmo que o modelo MCF seja usado para prever as perdas de propagação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, são mostrados os resultados obtidos. Na Seção 6.1 são mostrados os resultados referentes as perdas de propagação comparando os valores medidos com os valores simulados. Na Seção 6.2 são mostrados os resultados e discussões referentes a indicação da intensidade de sinal recebido, RSSI.

6.1. Resultados da Análise de Perdas de Propagação

Com base nas medições e simulações computacionais foram obtidos os valores em comparação com os modelos de perdas de propagação para ambientes internos: ITU-R P.1238, Motley-Keenan.

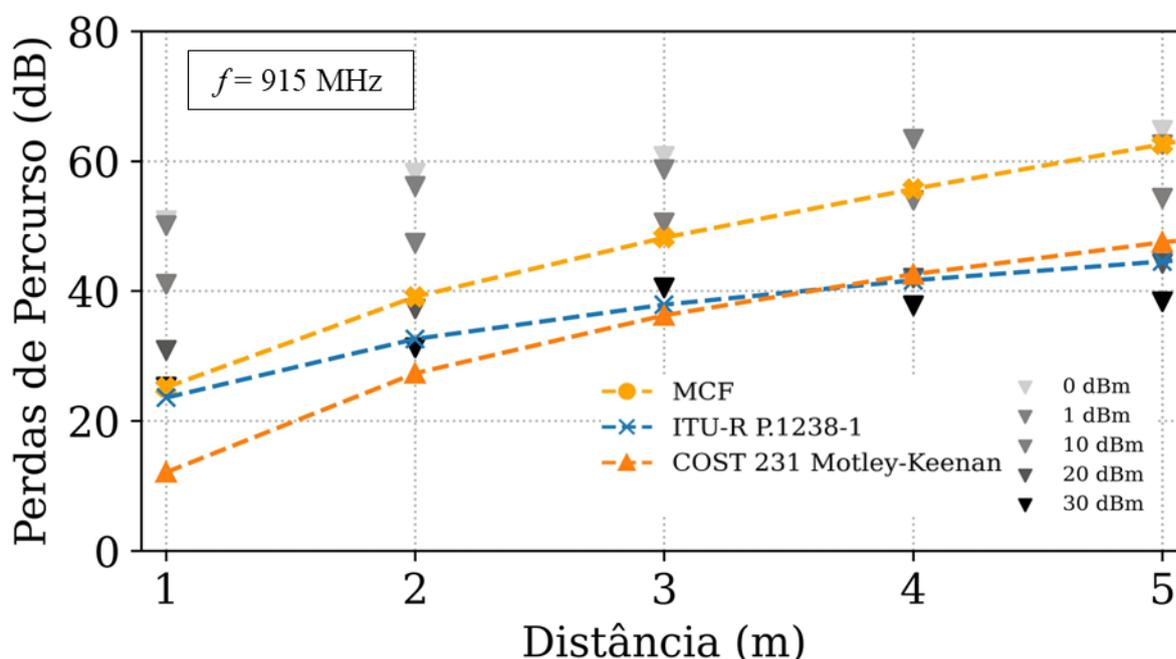
O modelo ITU-R P.1238 é utilizado para predição da propagação de sinal em ambientes internos de edifícios, como escritórios, hospitais e aeroportos. Ele leva em consideração fatores como a geometria do ambiente, a presença de paredes e pisos, a posição das antenas e a frequência do sinal (ITU, 2017).

O modelo COST Motley-Keenan é utilizado para prever a propagação de sinal em ambientes internos de edifícios residenciais e comerciais de baixo e médio porte. Ele também leva em consideração fatores como a geometria do ambiente, a presença de paredes e pisos, a posição das antenas e a frequência do sinal (KAR et al., 2016). Ambos os modelos foram utilizados para a comparação com um modelo proposto porque já são utilizados na avaliação do desempenho da situação analisada.

Ambos os modelos têm características distintas que os tornam adequados para diferentes tipos de ambientes internos. O modelo ITU-R P.1238 é baseado em dados experimentais de propagação em vários tipos de ambiente, incluindo áreas urbanas e rurais. Ele leva em consideração a presença de edifícios e árvores no ambiente, bem como outros fatores como frequência, distância, altura das antenas e características do terreno. Este modelo é particularmente útil para ambientes internos complexos, como hospitais e aeroportos, que têm muitas paredes e divisões. Por outro lado, o modelo COST Motley-Keenan é uma extensão do modelo de propagação de Okumura-Hata e é amplamente utilizado para prever a propagação de sinal em edifícios residenciais e comerciais de baixo e médio porte (BERTOLDO et al.,

2019; ITU, 2017). Os resultados obtidos para a frequência de 915 MHz são apresentados na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 915 MHz



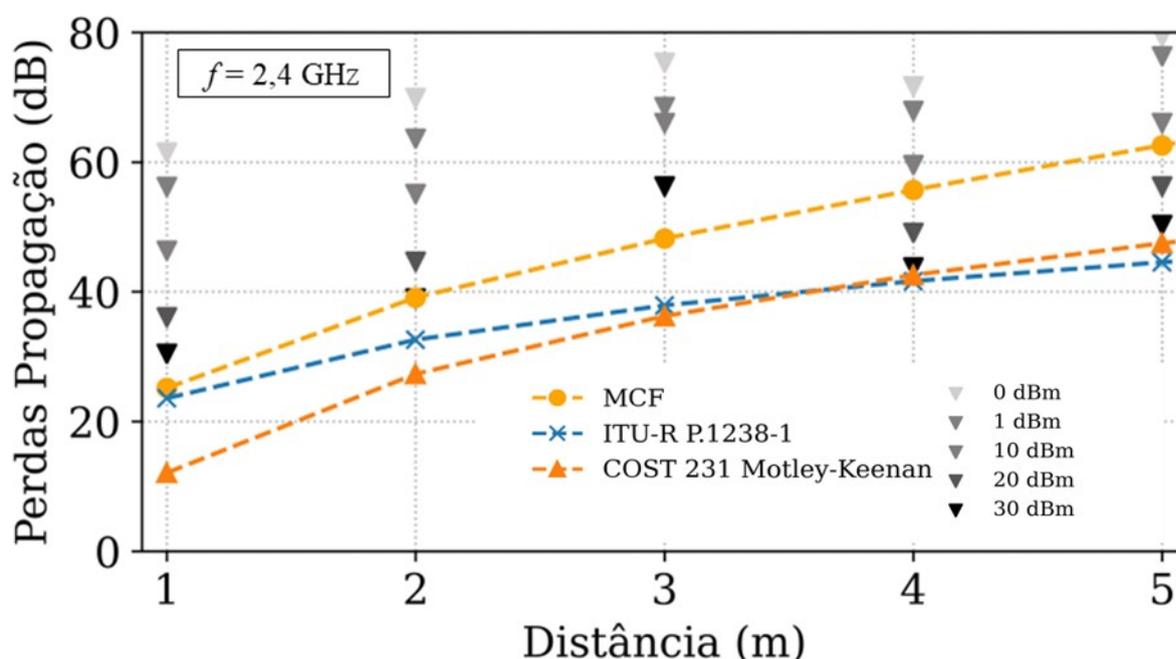
Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Como pode ser observado na Figura 6.1, são mostrados os valores medidos de perda de percurso para diferentes potências de transmissão, sendo elas 0, 1, 10, 20 e 30 dBm, representadas pelas cores em escala de cinza, conforme descrito na legenda. Cada ponto na figura representa a média das medições para as distâncias apresentadas no eixo das abcissas. Os modelos ITU-R P.1238-1 e COST 231 Motley-Keenan são representados pelas curvas apresentadas na figura. Além disso, o modelo proposto, baseado em fluxo de redes multicomódite, é representado pela sigla MCF.

Como pode ser observado, para a frequência de 915 MHz, o modelo MCF proposto apresenta uma maior proximidade dos pontos medidos em comparação com as curvas dos modelos ITU-R P.1238-1 e COST 231 Motley-Keenan. Essa observação sugere que o modelo MCF proposto é capaz de capturar de forma mais precisa as características de propagação do sinal em relação aos outros modelos analisados para essa frequência específica. Na Figura 6.2, é apresentada uma comparação entre as medições realizadas e as previsões obtidas pelos modelos avaliados, incluindo o modelo proposto na pesquisa. As curvas representam a variação

dos valores medidos e esperados para cada um dos modelos analisados.

Figura 6.2 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 2,4 GHz



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Conforme mostrado na Figura 6.2, a análise dos resultados para a frequência de 2,4 GHz, demonstra um comportamento similar ao observado para 915 MHz. Como pode ser visualizado, os valores medidos de perda de percurso apresentam uma proximidade maior com o modelo MCF em comparação com os modelos ITU-R P.1238-1 e COST 231 Motley-Keenan.

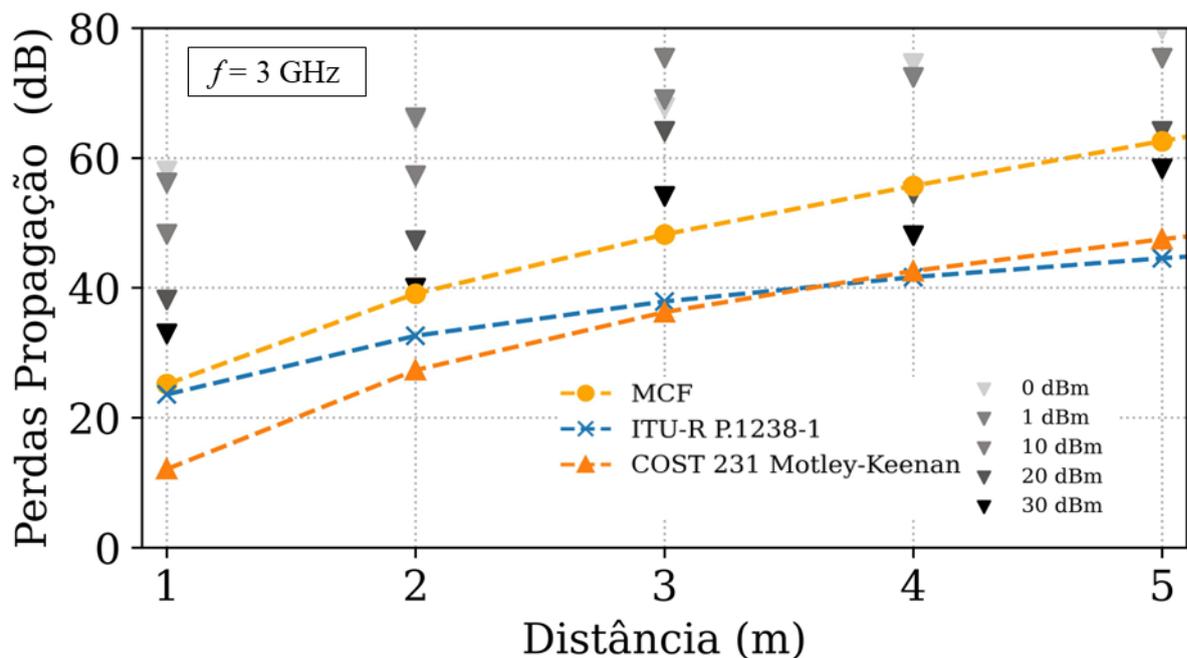
Entretanto, é importante notar que para a frequência de 2,4 GHz, os valores medidos de perda de percurso apresentam valores maiores quando comparados com os valores obtidos para a frequência de 915 MHz. Esse comportamento pode ser atribuído à maior utilização dessa faixa do espectro eletromagnético para aplicações industriais, científicas e médicas, ISM. A presença de dispositivos que operam nessa faixa de frequência, tais como redes Wi-Fi, pode afetar a qualidade do sinal, aumentando a interferência e ruído presentes no canal de transmissão.

Dessa forma, é fundamental que sejam realizadas medições em frequências semelhantes e em ambientes com presença de redes Wi-Fi próximas para a validação dos modelos de propagação de sinal. Essa abordagem permite simular situações comuns em ambientes internos industriais, comerciais ou corporativos, tornando as condições de medição mais próximas das

condições reais de aplicação dos modelos.

No presente estudo, o roteador da rede local estava localizado a cerca de 1,5 m do ambiente de medição, o que pode ter influenciado nos resultados obtidos para a frequência de 2,4 GHz. Deve-se considerar que a presença de dispositivos que operam nessa faixa de frequência pode gerar interferência e afetar a qualidade do sinal, o que pode ser um fator determinante para o desempenho dos modelos em ambientes reais. Assim, a análise do desempenho dos modelos de propagação em ambientes reais deve ser realizada com cautela, levando em consideração as condições específicas do ambiente de aplicação e as interferências presentes no canal de transmissão. Na Figura 6.3 são mostrados os resultados para as medições da frequência de 3 GHz.

Figura 6.3 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 3 GHz



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

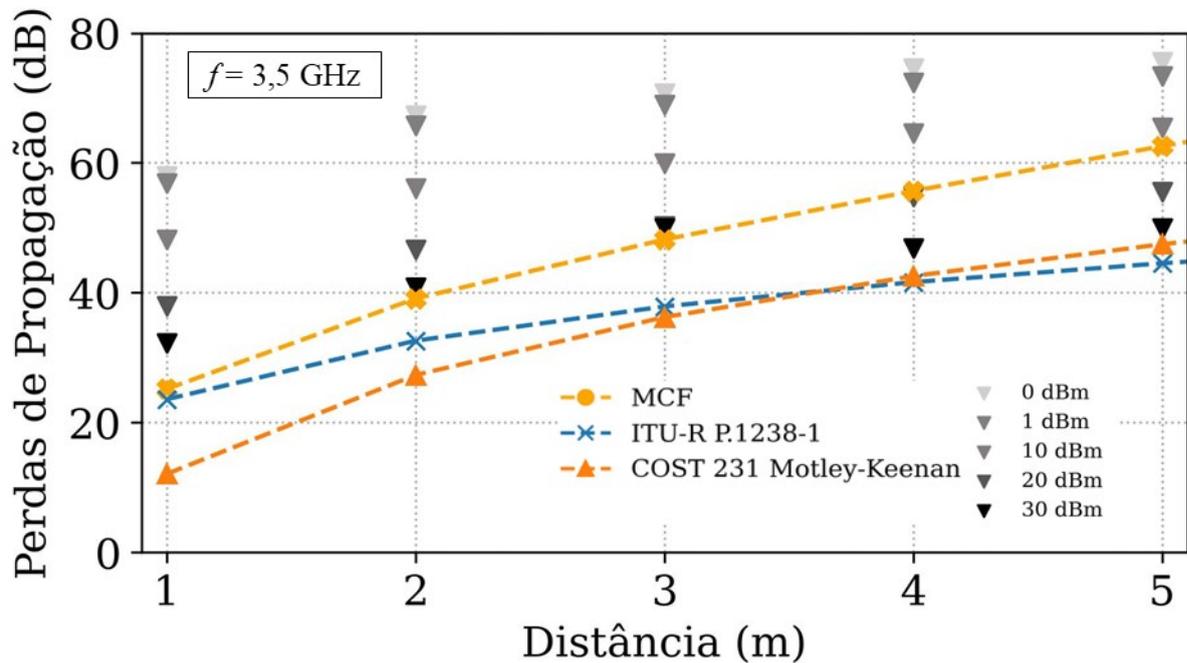
Como pode ser observado na Figura 6.3, para a frequência de 3 GHz, os resultados das medições mostram um comportamento similar aos das outras frequências avaliadas, com os valores medidos apresentando maior proximidade com o modelo MCF proposto, quando comparados com os modelos ITU-R P.1238-1 e COST 231 Motley-Keenan.

No entanto, ao analisar os dados de medição nas distâncias de 4 e 5 metros para as

frequências de 2,4 GHz e 3 GHz, com potência de transmissão de 30 dBm, observou-se um comportamento intermediário entre o modelo MCF e os modelos ITU-R P.1238-1 e COST 231 Motley-Keenan. Vale ressaltar que a maior concordância entre os dados experimentais e a curva predita pelo modelo ocorre para as distâncias menores, de 1, 2 e 3 metros, reforçando a importância da avaliação em diferentes distâncias para uma caracterização mais precisa do canal de comunicação.

Na Figura 6.4 são mostrados os resultados referentes às medições para a frequência de 3,5 GHz. De maneira semelhante às outras frequências, o modelo MCF apresentou maior proximidade com os pontos medidos para a distância de 1 metro, especialmente para as potências de transmissão mais elevadas, como 20 e 30 dBm. Isso sugere que o modelo MCF é capaz de prever adequadamente as perdas de propagação nessa faixa de frequência, mesmo em situações de alta potência de transmissão.

Figura 6.4 – Resultados de medições das perdas de propagação para a frequência de 3,5 GHz



Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Analisando-se as medições realizadas para as distâncias de 2 e 3 metros, em todas as potências de transmissão avaliadas para as frequências de 915 MHz, 2,4 GHz, 3 GHz e 3,5 GHz, observa-se uma maior aderência dos pontos medidos com o modelo MCF em relação aos demais modelos analisados. Embora alguns pontos medidos tenham ficado acima da curva do

modelo, de forma geral, os dados de medição apresentaram uma maior proximidade com o modelo MCF, evidenciando sua maior adequação para a aplicação em questão. Em resumo, os resultados obtidos para todas as frequências e distâncias avaliadas apontam para uma maior confiabilidade e precisão do modelo MCF em comparação com os modelos ITU-R P.1238-1 e COST 231 Motley-Keenan.

Existem diversas técnicas para se avaliar os erros entre uma série de dados e seus respectivos valores previstos, ou seja, no geral, os objetivos das técnicas de medição de erros entre valores previstos e efetivamente medidos, consistem na análise da diferença entre a predição e a medição, por meio de alguma métrica, como por exemplo, o erro médio ou raiz quadrada do erro médio (JOMEHEI et al., 2022; KHAN et al., 2021).

Entre as técnicas de avaliação de erros mais comuns estão: o Erro Médio Absoluto (MAE – *Mean Absolute Error*), o Erro Médio Quadrático (MSE – *Mean Squared Error*), a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE – *Root Mean Squared Error*) e o Erro Médio Quadrático Logarítmico (MSLE – *Mean Squared Logarithmic Error*) (DALIYA; RAMESH; KO, 2021).

Cada uma dessas formas de análise de erros apresenta uma maior ou menor sensibilidade em relação a variação dos valores. Desse modo, quando possível, é interessante utilizar mais de uma forma de avaliação. Como mostrado respectivamente nas Fórmulas de 6.1 a 6.4 (DALIYA; RAMESH; KO, 2021; JOMEHEI et al., 2022; KHAN et al., 2021).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i|, \quad 6.1$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad 6.2$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}, \quad 6.3$$

$$MSLE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log(Y_i + 1) - \log(\hat{Y}_i + 1))^2, \quad 6.4$$

em que, Y_i é o valor medido, \hat{Y}_i é o valor previsto pelos modelos analisados e n é o tamanho da amostra. Na Tabela 6.1 são mostrados os resultados médios da análise das métricas de erro utilizando as técnicas MAE, MSE, RMSE e MSLE.

Tabela 6.1 Comparação das métricas de erro entre os modelos analisados

Modelo	Freq (GHz)	MAE	MSE	RMSE	MSLE
MCF	0,915	10,7541	12,9757	3,6022	0,0925
ITU-R P.1238-1	0,915	13,0498	13,4561	3,6683	0,1365
Motley-Keenan	0,915	16,4468	17,9028	4,2312	0,3619
MCF	2,4	14,6470	15,8195	3,9774	0,1336
ITU-R P.1238-1	2,4	20,8032	22,2848	4,7207	0,2594
Motley-Keenan	2,4	24,6706	25,8768	5,0869	0,5321
MCF	3	15,1726	16,4190	4,0520	0,1388
ITU-R P.1238-1	3	22,6428	24,6791	4,9678	0,2868
Motley-Keenan	3	27,0558	27,8774	5,2799	0,5643
MCF	3,5	13,9174	15,2386	3,9037	0,1298
ITU-R P.1238-1	3,5	20,7053	21,7691	4,6657	0,2555
Motley-Keenan	3,5	24,5728	25,5518	5,0549	0,5331

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 6.1 são mostrados os valores médios das métricas de erro, para todas as situações de potência, distâncias e frequências analisadas, consistindo em um resumo da Tabela A, com os dados completos no Apêndice A.

Utilizando diferentes técnicas de análise de erro o método MCF apresentou menores valores para cada uma das métricas analisadas, ou seja, apresentou os menores erros entres os valores previstos e efetivamente medidos. Dessa forma, caracterizando-se como um dos mais adequados para a situação prevista.

6.2. Resultados de Medições da Indicação de Nível de Sinal Recebido, RSSI

O indicador de intensidade do sinal recebido, em inglês, *Received Signal Strength Indicator*, RSSI, representa a perda de energia ocorrida no processo de transmissão do sinal. Dessa forma o valor do RSSI está diretamente associado ao nível de atenuação do sinal, logo, quanto menor o valor do RSSI, maior atenuação do sinal.

O RSSI é frequentemente utilizado para avaliar a intensidade do sinal recebido por um receptor de rádio. Trata-se de uma medida do nível de potência do sinal recebido em um

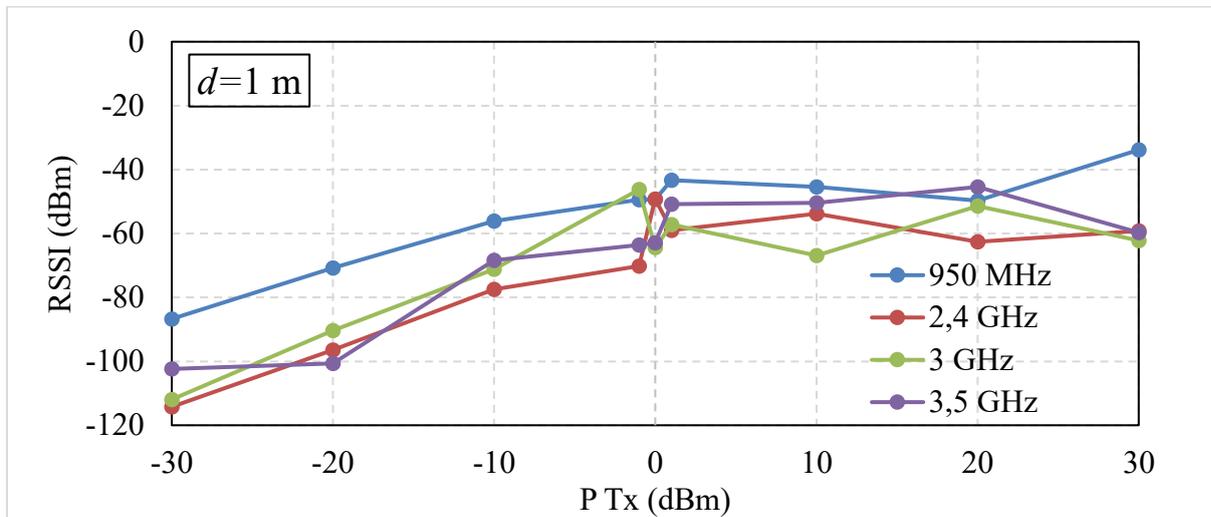
determinado ponto do espaço, expresso em dBm. O RSSI é um indicador importante em aplicações sem fio, como redes Wi-Fi e Bluetooth, pois permite avaliar a qualidade do sinal e a distância entre transmissor e receptor (SHANG et al., 2014).

No entanto, é importante salientar que o RSSI é influenciado por diversos fatores, como a atenuação do sinal pelo meio de propagação, interferências eletromagnéticas, obstáculos físicos, entre outros. Por isso, é fundamental avaliar o RSSI em conjunto com outras métricas, como a taxa de erro de bit (BER) e o atraso de transmissão (latência), a fim de obter uma visão mais completa da qualidade da transmissão de dados em uma determinada aplicação (SHANG et al., 2014).

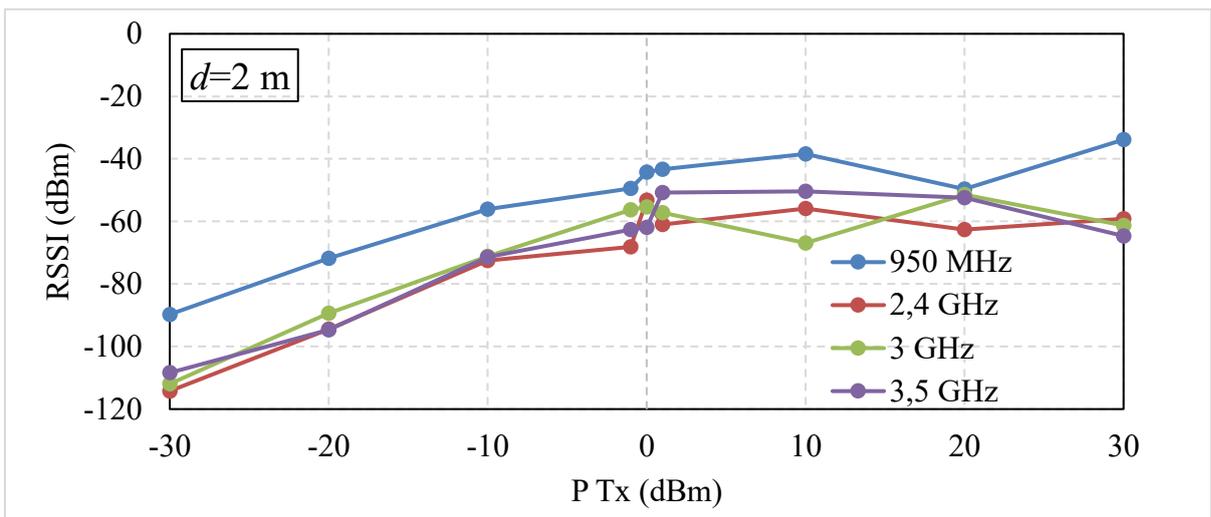
Para a realização das medições do RSSI, foram conduzidas três situações distintas. A primeira delas consistiu na medição em linha de visada direta entre as antenas em questão. A segunda situação envolveu a colocação de um anteparo metálico no chão, de forma a avaliar o efeito da superfície em que o sinal é propagado. Já a terceira situação consistiu na colocação de um anteparo metálico interrompendo a linha de visada entre as antenas, com o objetivo de avaliar a influência de obstáculos na propagação do sinal de rádio. Tais medidas foram adotadas com o intuito de obter um conjunto amplo e representativo de dados, a fim de avaliar o desempenho do sistema em diferentes condições e cenários.

Para o cenário de linha de visada, foram realizadas medições variando-se a distância entre a antena transmissora (Tx) e a antena receptora (Rx) em distâncias de $d = 1, 2, 3, 4$ e 5 metros, a fim de obter dados mais abrangentes e precisos sobre a variação do sinal RSSI em diferentes distâncias. Para as medições de RSSI, foram consideradas diferentes potências de transmissão, variando de -30 dBm até 30 dBm. Foram realizadas medições para cada uma dessas potências, a fim de se obter um conjunto amplo de dados para análise. Na Figura 6.5 são mostrados os valores medidos de RSSI para o modo de medição com linha de visada para as frequências de 950 MHz, $2,4$ GHz, 3 e $3,5$ GHz.

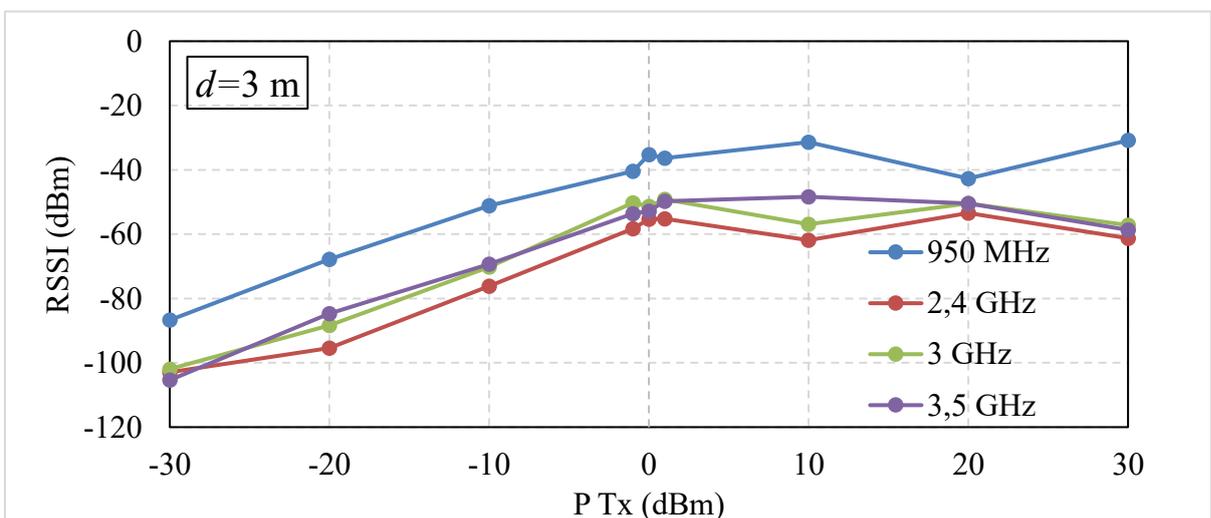
Figura 6.5 – RSSI para modo de medição com linha e visada.



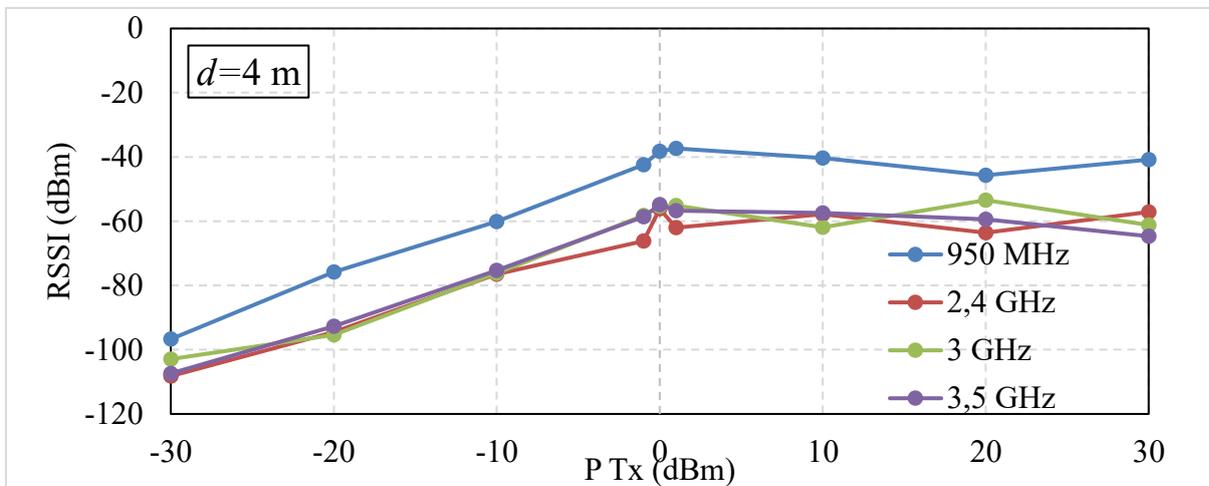
(a)



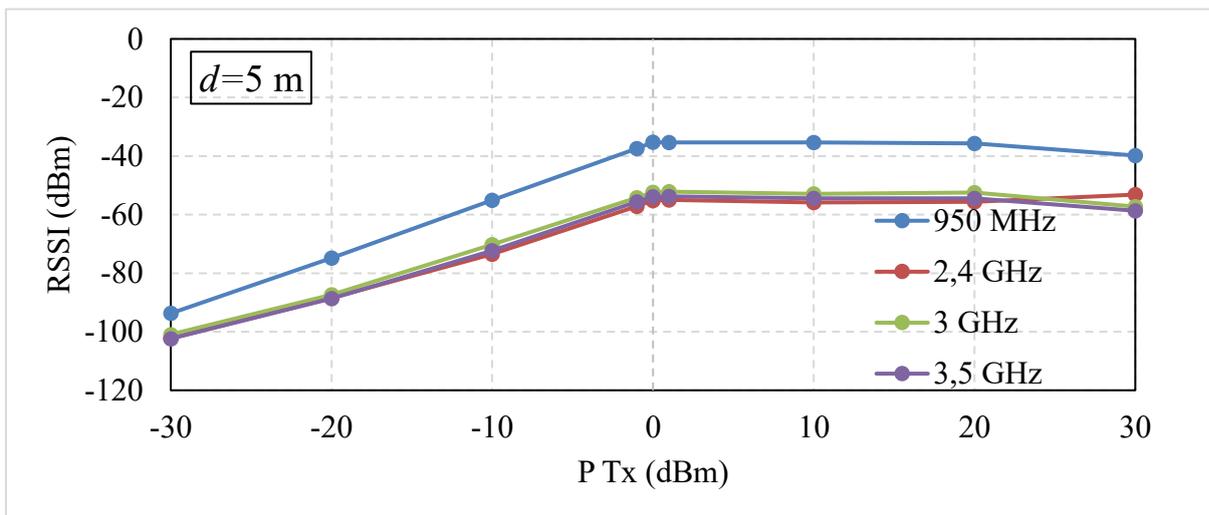
(b)



(c)



(d)



(e)

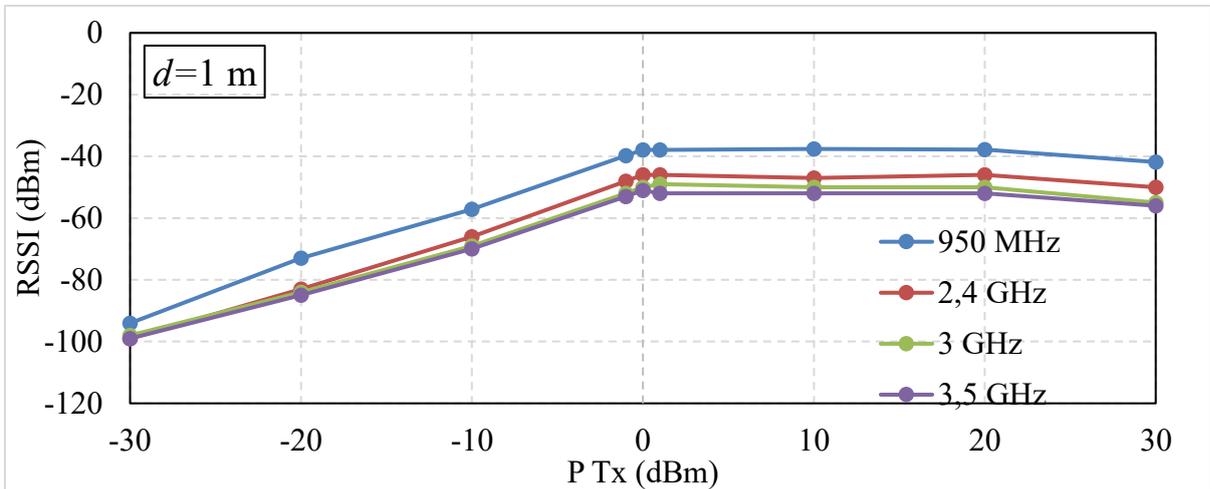
Fonte: autoria própria (2022).

Na Figura 6.5 são apresentados os resultados das medições de RSSI para as situações de visada direta. Na Figura 6.5a, encontram-se as medições para a distância de 1 metro entre as antenas transmissora e receptora (Tx e Rx), enquanto na Figura 6.5b, c, d e e, são apresentados os resultados para 2, 3, 4 e 5 metros de distância, respectivamente. Observa-se que, em regiões muito próximas, como para 1 e 2 metros, é possível verificar um comportamento instável, condizente com o comportamento esperado para a região de Fraunhofer.

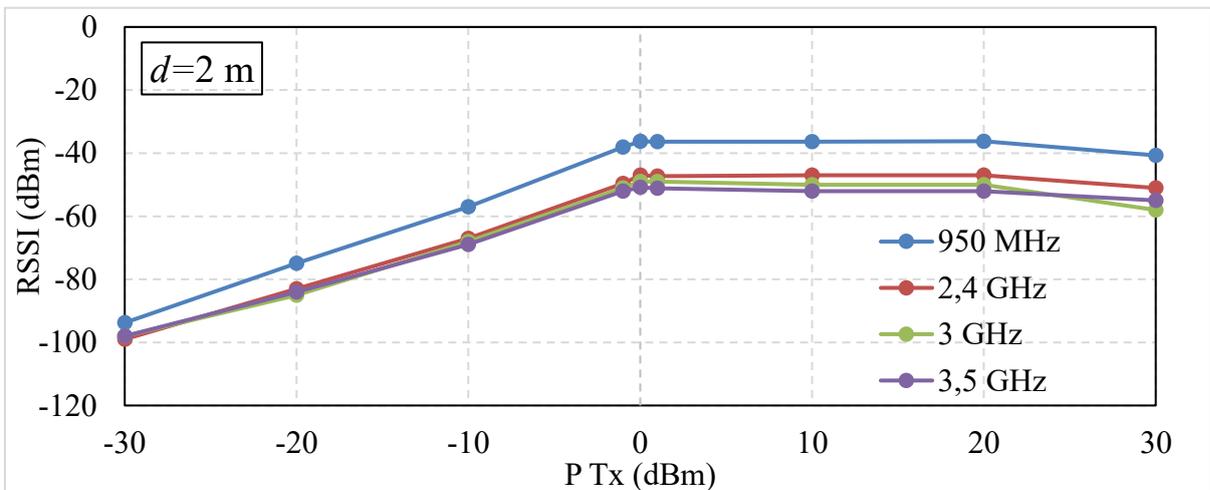
Outra observação importante é que, a partir da potência de transmissão de 0 dBm, não há um ganho expressivo de RSSI, indicando um possível limite de saturação do sinal. Isso

sugere que, em certas situações, aumentar a potência de transmissão pode não ser efetivo na melhoria do sinal de RSSI.

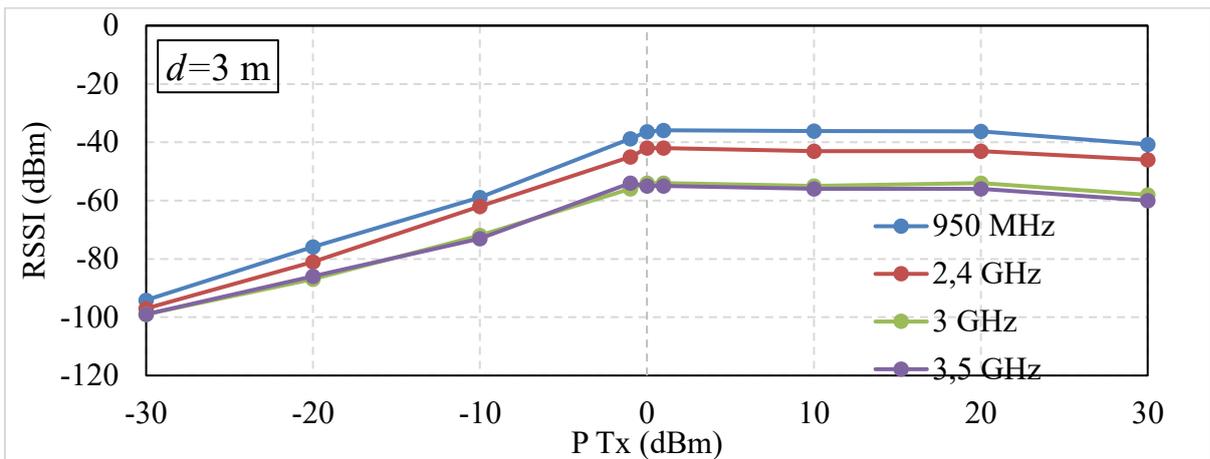
Figura 6.6 – RSSI modo de medição com anteparo metálico no chão.



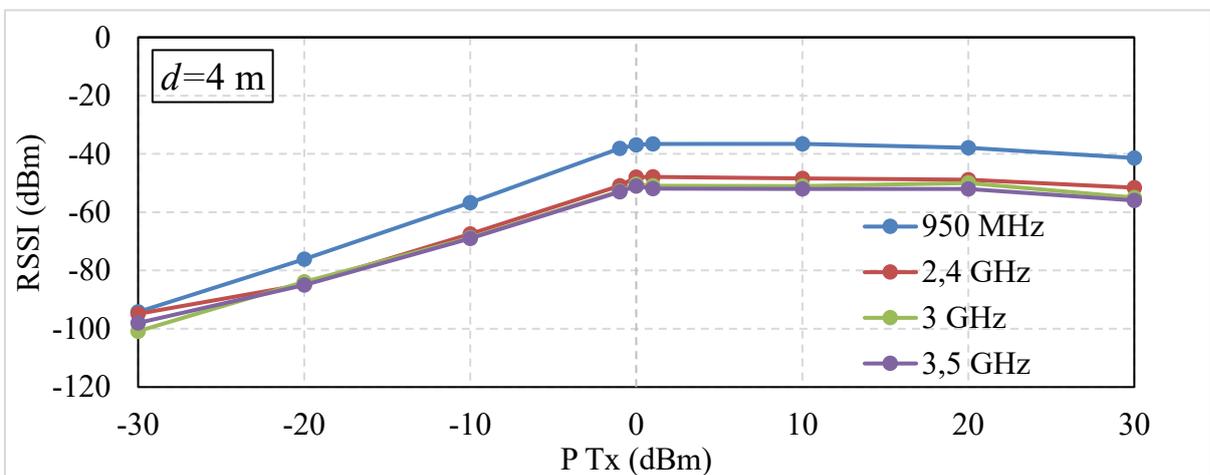
(a)



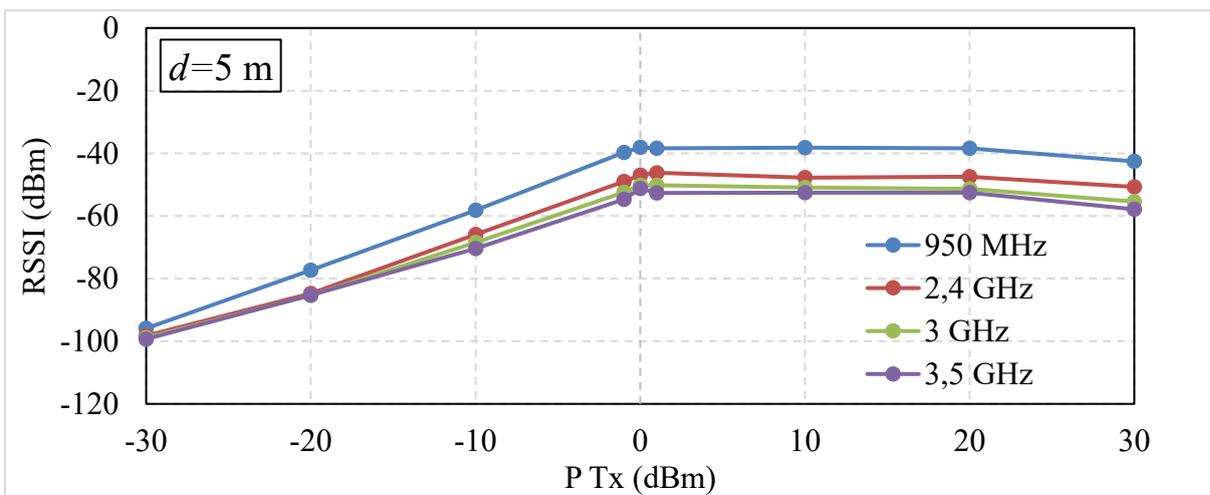
(b)



(c)



(d)

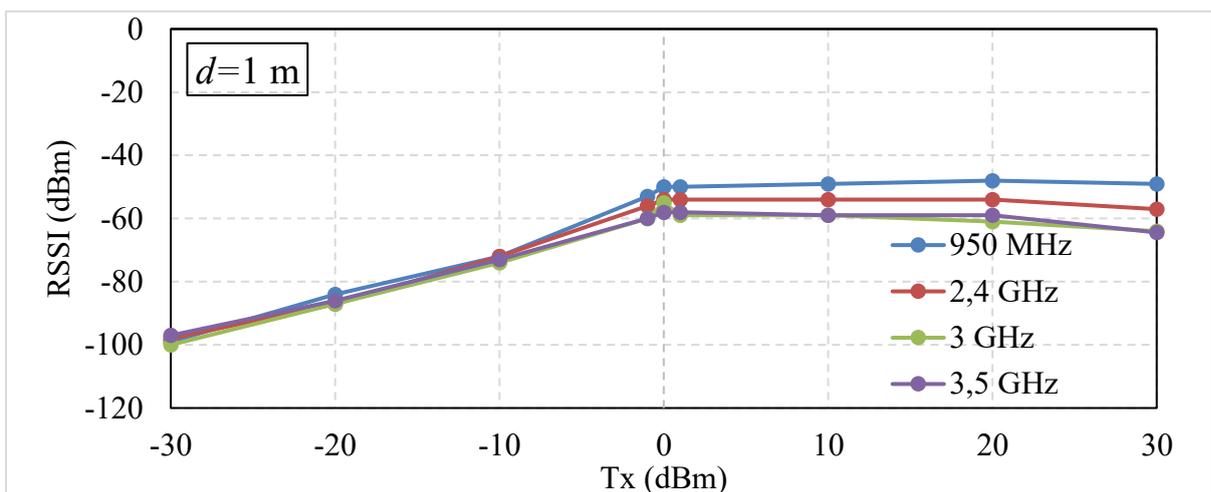


(e)

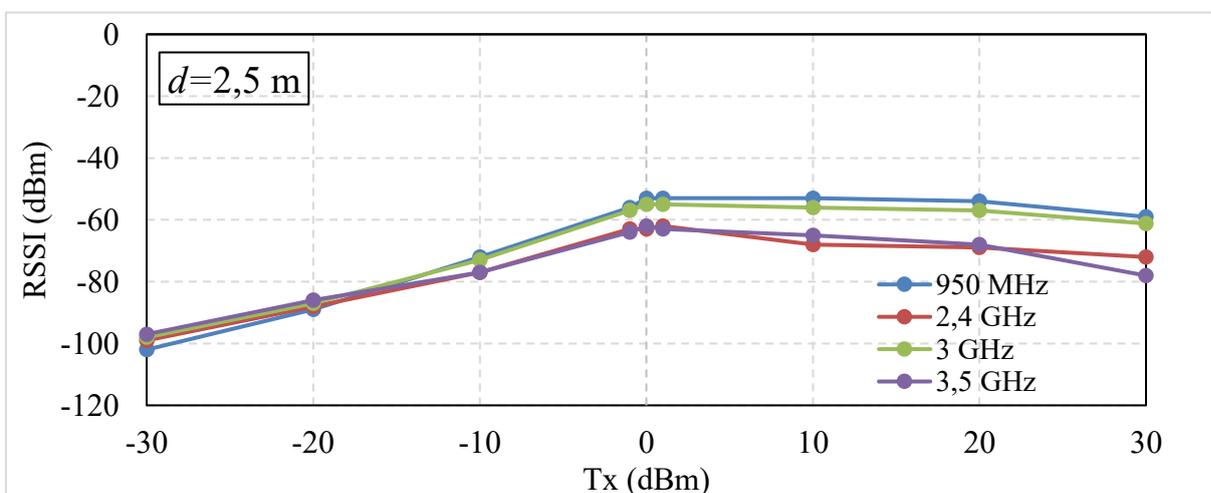
Na Figura 6.6 são apresentados os resultados das medições de RSSI realizadas com a

presença de uma chapa metálica no chão, na qual foram realizadas variações de distância entre 1 e 5 m, enquanto a distância entre Tx e Rx permaneceu fixa. Observa-se que, para as diferentes frequências analisadas, a altura da antena transmissora e receptora não influenciou significativamente nos valores de RSSI medidos, independentemente da posição da placa metálica.

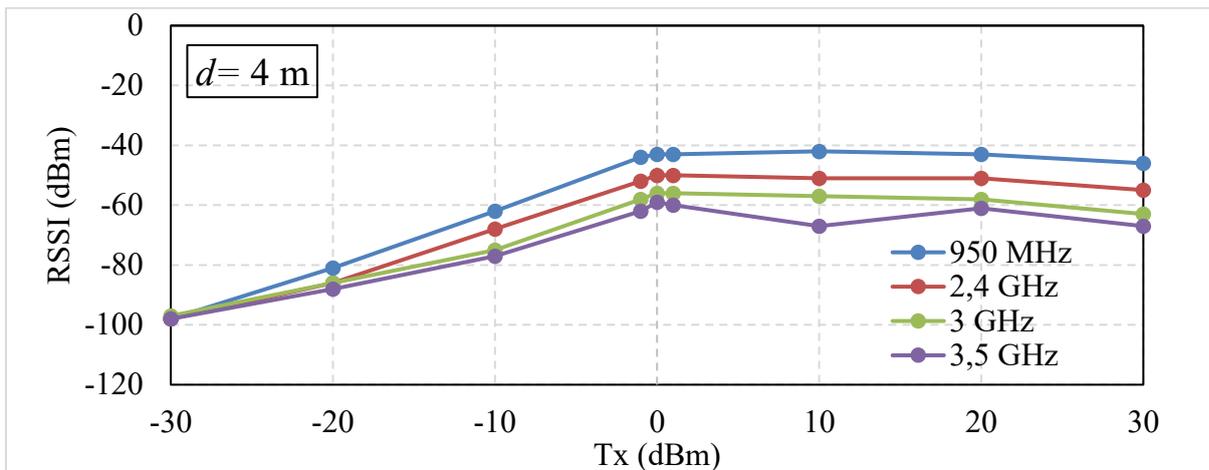
Figura 6.7 – RSSI para interrupção de linha de visada.



(a)



(b)



(c)

Na Figura 6.7 são apresentados os resultados das medições de RSSI com a interposição de uma placa vertical que interrompe a linha de visada entre as antenas transmissora e receptora. As medições de RSSI foram realizadas em distâncias variadas (1, 2,5 m e 4 m), permitindo a comparação entre diferentes posicionamentos do transmissor e receptor, bem como sua posição intermediária.

As potências de transmissão foram variadas de -30 a 30 dBm, e as frequências analisadas foram 950 MHz, 2,4 GHz, 3 GHz e 3,5 GHz. Além disso, foram realizadas medições com a interposição parcial de uma placa metálica na linha de visada, em diferentes posições, a fim de avaliar o impacto da obstrução na intensidade do sinal RSSI recebido. Essas medições foram realizadas com o objetivo de avaliar a robustez do sinal RSSI em diferentes condições e para diferentes frequências e potências de transmissão, para se avaliar o efeito da obstrução da linha de visada.

Com base nos resultados obtidos, constatou-se que, a uma distância de 1 metro entre o transmissor e o receptor, todos os modos de medição apresentaram diminuição do RSSI em relação à linha de visada. Além disso, observou-se que, para a frequência de 3,5 GHz e a uma distância de 4 metros, houve uma influência mais significativa na interrupção da linha de visada. Esses resultados indicam a importância de considerar a frequência e a distância em situações onde há obstrução na linha de visada em sistemas de comunicação sem fio.

Considerando os resultados apresentados, pode-se observar que a medição do RSSI apresenta variações significativas de acordo com a distância entre as antenas e a presença de anteparos metálicos. Na Figura 6.5, que representa a situação de linha de visada, pode-se notar que as medições apresentam um comportamento estável para distâncias maiores e que, para potências de transmissão acima de 0 dBm, não há um ganho expressivo de RSSI. Já na Figura

6.6, que mostra a medição com anteparo metálico no chão, pode-se notar que a posição da placa não influencia significativamente nos valores de RSSI.

Por fim, na Figura 6.7, que apresenta a medição com anteparo metálico interrompendo a linha de visada, é possível notar uma redução significativa nos valores de RSSI, evidenciando a influência da presença de obstáculos metálicos na propagação do sinal. Em geral, os resultados indicam que a medição do RSSI é altamente sensível à presença de obstáculos, o que deve ser levado em consideração no planejamento de redes sem fio.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta tese tem como objetivo geral, o desenvolvimento de um modelo de canal de comunicações sem fio, para a predição de perdas de propagação para ambientes industriais internos, considerando a utilização de sistemas de transmissão simultânea de informação e energia (SWIPT) por meio da utilização de algoritmos de fluxo de rede multicomódite.

O objetivo de modelar o canal de comunicações sem fio foi alcançado por meio da aplicação de uma metodologia de modelagem baseada em problemas de fluxo de rede multicomódite. Esta metodologia levou em consideração as restrições impostas pelo ambiente de aplicação previsto na tese, que é o de ambientes internos industriais.

Foram realizadas simulações computacionais baseadas no modelo *multicommodity*, alimentado com valores de entrada correspondentes a situações de aplicação previstas na pesquisa. As simulações foram realizadas utilizando a linguagem Python e uma linguagem compatível com o ambiente de desenvolvimento GNU Octave. A pesquisa envolveu a realização de experimentos em um ambiente controlado de laboratório para emular situações encontradas em ambientes industriais internos. Infelizmente, não foi possível realizar medições diretamente nesses ambientes devido a limitações de acesso e de controle das operações. No entanto, a emulação das condições gerais previstas na tese foi possível com base nos parâmetros avaliados durante a pesquisa.

O modelo baseado em problemas de fluxo *multicommodity*, desenvolvido nesta tese, foi comparado com outros modelos utilizados em aplicações de ambientes internos. Entre eles, modelo COST 231 Motley-Keenan, modelo ITU-R P.1238-1 e do modelo de log-distância. Foram consideradas as frequências de aplicações industriais, científicas e médicas (ISM) de 950 MHz, 2,4; 3 e 3,5 GHz, para potências de transmissão de 0, 1, 10, 20 e 30 dBm e distâncias em ambientes internos variando entre 1 e 5 m. As potências relativamente elevadas analisadas em distâncias internas curtas, foram utilizadas com o intuito de viabilizar futuras aplicações de transmissão simultânea de informação e energia.

Para analisar o indicador de força de sinal recebido (RSSI), também foram consideradas as potências de -30, -20, -10 e -1 dBm com as medições realizadas foi possível constatar que os valores medidos de RSSI e a energia recebida pela antena receptora (Rx), apresentaram uma

distribuição estatística normal, permitindo assim a utilização de ferramentas estatísticas adequadas para esse tipo de distribuição, para o tratamento das informações, simplificando análise dos dados obtidos.

A comparação dos resultados de medições dos modelos COST 231 Motley-Keenan, ITU-R P.1238-1 e Log-Distance com o modelo de fluxo multicommodity desenvolvido nesta tese indicou que o modelo proposto apresentou uma performance superior para as aplicações avaliadas. A avaliação foi realizada por meio de métricas como o Erro Médio Absoluto (MAE), Erro Médio Quadrático (MSE), Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) e Erro Médio Quadrático Logarítmico (MSLE), as quais mostraram que o modelo proposto ofereceu uma maior precisão na previsão dos valores medidos em relação aos modelos comparativos. Para todas essas métricas de avaliação de erros o modelo proposto apresentou valores mais favoráveis, ou seja, entre os modelos analisados, o modelo *multicommodity* apresentou os menores erros de predição das perdas de propagação, para as condições de medições.

Os modelos utilizados em aplicações de ambientes internos, no geral, não preveem a utilização de distâncias tão curtas como as analisadas e para o nível de potência utilizado nas medições. Contudo, essas condições são as que podem viabilizar as aplicações IoT SWIPT, condições as quais são atendidas pelo modelo desenvolvido na presente tese.

Dessa forma, pode-se concluir que o modelo desenvolvido apresentou uma maior adequação para as situações propostas de aplicação. O desenvolvimento de aplicações de *internet* das coisas, para ambientes industriais internos com transmissões simultâneas de informação e energia (SWIPT).

7.1. Sugestões de Trabalhos Futuros

A temática abordada na presente tese pode seguir por diferentes caminhos para o desenvolvimento de novas abordagens de pesquisas relativas a formas de resolução dos problemas *multicommodity* ou desenvolvimento de *hardware*, como antenas, sensores e circuitos de coleta de energia, para ambientes industriais internos ou para outros tipos de aplicações, situações e ambientes.

No que tange a resolução dos problemas *multicommodity*, sugere-se para trabalhos futuros abordar, os seguintes tópicos:

- Utilização de algoritmos de aprendizagem profunda, *Deep Learning*, para simplificação da resolução de problemas de otimização *multicommodity*;
- Aplicação de métodos heurísticos ou meta-heurísticos por meio de aprendizagem de máquina para resolução dos problemas *multicommodity*;
- Modelagem e adaptação do problema *multicommodity* para outros ambientes de aplicação;
- Análise para outras frequências de aplicações 5G, ou 6G;
- Análise de aplicabilidade em outras tecnologias, como em tecnologias de banda ultra-larga, *ultra wide band*, UWB.

No contexto do desenvolvimento de *hardware*, as principais ações a serem desenvolvidas são sobretudo com relação aos seguintes tópicos:

- Desenvolvimento de circuitos de coleta de energia com capacidade de divisão de potência simultânea, SWIPT-PS;
- Desenvolvimento de sistema de *Rectenna* considerando a aplicações SWIPT para ambientes industriais internos;
- Desenvolvimento de sistemas de coleta de energia para as frequências ISM, abordadas na tese, como também para outras faixas de frequência, cobrindo os espectros de aplicações 5G, 6G entre outras.

REFERÊNCIAS

ABDELWAHAB, S. et al. Enabling smart cloud services through remote sensing: An internet of everything enabler. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 3, p. 276–288, 2014.

AHMAD, W. et al. Reliability modeling and analysis of communication networks. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 78, p. 191–215, jan. 2017.

AKAN, O. B. et al. Internet of Hybrid Energy Harvesting Things. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 2, p. 736–746, 2018.

AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M. Internet of Things : A Survey on Enabling. v. 17, n. 4, p. 2347–2376, 2015.

ALDHAIBANI, A. O.; RAHMAN, T. A.; ALWARAFY, A. Radio-propagation measurements and modeling in indoor stairwells at millimeter-wave bands. **Physical Communication**, v. 38, p. 100955, 2020.

ALHASSOUN, M.; DURGIN, G. D. Spatial Fading in Backscatter Channels: Theory and Models. **2019 16th IEEE Annual Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2019**, p. 1–6, 2019.

ALTINEL, D.; KURT, G. K. Modeling of multiple energy sources for hybrid energy harvesting iot systems. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 6, p. 10846–10854, 2019.

AMORIM, R. et al. Radio Channel Modeling for UAV Communication over Cellular Networks. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 6, n. 4, p. 514–517, 2017.

ANATEL. **Plano Nacional de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil**. 2016. ed. Rio de Janeiro: ANATEL, 2016.

ANH, T. T. et al. Efficient training management for mobile crowd-machine learning: A deep reinforcement learning approach. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 8, n. 5, p. 1345–1348, 2019.

ARIF, A. et al. A Stochastic Multi-Commodity Logistic Model for Disaster Preparation in Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 11, n. 1, p. 565–576, 2020.

BALAKRISHNAN, A.; LI, G.; MIRCHANDANI, P. Optimal Network Design with End-to-End Service Requirements. **Operations Research**, v. 65, n. 3, p. 729–750, jun. 2017.

BELJADID, A.; HAFID, A.; BOUSHABA, M. **Reliability analytical measurement to design Wireless Mesh Networks**. 2013 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS). **Anais...IEEE**, dez. 2013Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ants.2013.6802890>>

BERTOLDO, S. et al. Empirical indoor propagation models for LoRa radio link in an office environment. **13th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2019**, n. EuCAP, p. 1–5, 2019.

BEVRANI, B. et al. A multi commodity flow model incorporating flow reduction functions. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 32, n. 3, p. 693–723, 8 set. 2020.

BIAŁOŃ, P. M. A randomized rounding approach to a k-splittable multicommodity flow problem with lower path flow bounds affording solution quality guarantees. **Telecommunication Systems**, v. 64, n. 3, p. 525–542, 23 mar. 2017.

CHAKRABORTY, K. et al. Entanglement Distribution in a Quantum Network: A Multicommodity Flow-Based Approach. **IEEE Transactions on Quantum Engineering**, v. 1, p. 1–21, 2021.

CHEMODANOV, D. et al. A Near Optimal Reliable Orchestration Approach for Geo-Distributed Latency-Sensitive SFCs. **IEEE Transactions on Network Science and Engineering**, v. 7, n. 4, p. 2730–2745, 1 out. 2020.

CHEN, X. et al. Smart channel sounder for 5G IoT: From wireless big data to active communication. **IEEE Access**, v. 4, p. 8888–8899, 2016a.

CHEN, Z. et al. Cooperative Transmission in Simultaneous Wireless Information and Power Transfer Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 10, p. 8710–8715, 2016b.

CHOI, B.-S. et al. Distributed Sensor Network Based on RFID System for Localization of Multiple Mobile Agents. **Wireless Sensor Network**, v. 03, n. 01, p. 1–9, 2011.

- CHOI, K. W. et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) for Internet of Things: Novel Receiver Design and Experimental Validation. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 4, p. 2996–3012, abr. 2020.
- CLAESSENS, S. et al. Enhanced Biased ASK Modulation Performance for SWIPT With AWGN Channel and Dual-Purpose Hardware. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 66, n. 7, p. 3478–3486, 2018.
- CLERCKX, B. et al. Fundamentals of wireless information and power transfer: From RF energy harvester models to signal and system designs. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 37, n. 1, p. 4–33, 2019.
- CORTÉS, P. et al. Optimal algorithm for the demand routing problem in multicommodity flow distribution networks with diversification constraints and concave costs. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 1, p. 313–324, nov. 2013.
- CULOT, G. et al. Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, v. 226, p. 107617, 2020.
- DA SILVEIRA FARIAS, E.; BORENSTEIN, D. Modeling the logistics design of a multi-commodity industry. **Gestao e Producao**, v. 24, n. 1, p. 148–160, 2017.
- DAI, W.; ZHANG, J.; SUN, X. On solving multi-commodity flow problems: An experimental evaluation. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30, n. 4, p. 1481–1492, 2017.
- DALIYA, V. K.; RAMESH, T. K.; KO, S. B. An optimised multivariable regression model for predictive analysis of diabetic disease progression. **IEEE Access**, v. 9, p. 99768–99780, 2021.
- EL CHALL, R.; LAHOUD, S.; EL HELOU, M. LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 2366–2378, 2019.
- ELIAS, P.; FEINSTEIN, A.; SHANNON, C. E. A note on the maximum a network. **IEEE Trans. Inf. Theory**, v. 2, n. 4, p. 117–119, 1956.
- FARAHANI, R. Z. et al. A review of urban transportation network design problems. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 2, p. 281–302, set. 2013.

FAROOQ, M. J.; ZHU, Q. Modeling, Analysis, and Mitigation of Dynamic Botnet Formation in Wireless IoT Networks. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, v. 14, n. 9, p. 2412–2426, 2019.

FARRUGIA, N.; BRIFFA, J. A.; BUTTIGIEG, V. **An Evolutionary Multipath Routing Algorithm using SDN**. 2018 9th International Conference on the Network of the Future (NOF). **Anais...IEEE**, nov. 2018Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/nof.2018.8597865>>

FARRUGIA, N.; BRIFFA, J. A.; BUTTIGIEG, V. **Solving the Multi-Commodity Flow Problem using a Multi-Objective Genetic Algorithm**. 2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). **Anais...IEEE**, jun. 2019Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/cec.2019.8790160>>

FORD, L. R.; FULKERSON, D. R. **A suggested computation for maximal multi-commodity network flows**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1958.

FU, Y. et al. Optimal and Suboptimal Dynamic Cache Update Algorithms for Wireless Cellular Networks. **IEEE wireless communications letters**, v. 11, n. 12, p. 2610–2614, 2022.

GARG, V. K. CHAPTER 3 Radio Propagation and Propagation Path-Loss Models. In: **Wireless Communications & Networking**. [s.l.] Morgan Kaufmann publishers, Elsevier, 2007. p. 47–84.

GEBREMARIAM, W.; BIKDASH, M. **LP-based flow rate control and modeling of capacity collapse propagation over long links**. 2013 Proceedings of IEEE Southeastcon. **Anais...IEEE**, abr. 2013Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/secon.2013.6567416>>

GONZALEZ AYESTARAN, R. et al. Wireless power transfer through simultaneous near-field focusing and far-field synthesis. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 67, n. 8, p. 5623–5633, 2019.

GRAGLIA, R. D. et al. Development of Divergence Conforming Bases for Plate Corner Singularities. p. 2, 2009.

GU, Q. et al. Optimal Resource Allocation in Wireless Powered Relay Networks with Nonlinear Energy Harvesters. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 9, n. 3, p. 371–375, 2020.

GUO, W.; WANG, S. Radio-frequency energy harvesting potential: a stochastic analysis. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 24, n. 5, p. 453–457, ago. 2013.

HAKIMI, S. L. Simultaneous Flows Through a Communication Network. **IRE Transactions on Circuit Theory**, v. 9, n. 2, p. 169–175, 1962.

HOOMOD, H. K.; AL-MEJIBLI, I.; JABBOORY, A. I. Analyzing Study of Path loss Propagation Models in Wireless Communications at 0.8 GHz. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1003, n. 1, p. 0–8, 2018.

HU, J.; YANG, K. **Data and Energy Integrated Communication Networks: An Overview**. [s.l: s.n.].

HU, T. C. Multi-Commodity Network Flows. **Operations Research**, v. 11, n. 3, p. 344–360, jun. 1963.

HU, Y. et al. SWIPT-Enabled relaying in IoT networks operating with finite blocklength codes. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 37, n. 1, p. 74–88, 2019.

HUANG, J.; XING, C. C.; GUIZANI, M. Power Allocation for D2D Communications with SWIPT. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 19, n. 4, p. 2308–2320, 2020.

HUNG, H. VAN; CHIEN, T. Q. Extended Linear Multicommodity Multicost Network And Maximal Concurrent Flow Problems. **SSRN Electronic Journal**, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019.

ILYAS, S. et al. A Wideband Tunable Power Divider for SWIPT Systems. **IEEE Access**, v. 8, p. 30675–30681, 2020.

ISLAM, S. M. R. et al. The internet of things for health care: A comprehensive survey. **IEEE Access**, v. 3, p. 678–708, 2015.

ITU. Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 900 MHz to 100 GHz. **Recommendation ITU-R P.1238-9**, 2017.

JASH, A.; BANERJEE, A.; CHATTERJEE, S. **CPW-fed small UWB monopole antenna for**

energy-harvesting applications. 2017 1st International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology, IEMENTech 2017. **Anais...2017**

JIA, X. et al. A Multicommodity flow-based detailed router with efficient acceleration techniques. **IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems**, v. 37, n. 1, p. 217–230, 2018.

JIN, W.-L. A kinematic wave theory of multi-commodity network traffic flow. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 8, p. 1000–1022, set. 2012.

JIN, W. L. Unifiable multi-commodity kinematic wave model. **Transportation Research Procedia**, v. 23, p. 137–156, 2017.

JO, H. S. et al. Path loss prediction based on machine learning techniques: Principal component analysis, artificial neural network and gaussian process. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 7, 2020.

JOMEHEI, M. G. et al. A Low-Power Logarithmic CMOS Digital-to-Analog Converter for Neural Signal Recording. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, v. 69, n. 1, p. 15–19, 2022.

JOUNG, J.; KURNIAWAN, E.; SUN, S. Channel correlation modeling and its application to massive MIMO channel feedback reduction. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 5, p. 3787–3797, 2017.

KAMBLE, S. S. et al. A performance measurement system for industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMES- A review and empirical investigation. **International Journal of Production Economics**, v. 229, p. 107853, 2020.

KANG, J.-M. et al. Dynamic Power Splitting for SWIPT With Nonlinear Energy Harvesting in Ergodic Fading Channel. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4662, n. c, p. 1–1, 2020.

KAR, K. et al. Motley Keenan model of in-building coverage analysis of IEEE 802.11n WLAN signal in electronics and communication engineering department of National Institute of Technology Durgapur. **International Conference on Microelectronics, Computing and Communication, MicroCom 2016**, p. 2–7, 2016.

KARIMI, B.; BASHIRI, M. Designing a Multi-commodity multimodal splittable supply chain network by logistic hubs for intelligent manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 17, p. 1058–1064, 1 jan. 2018.

KARSTEN, C. V. et al. The time constrained multi-commodity network flow problem and its application to liner shipping network design. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 76, p. 122–138, abr. 2015.

KAZEMI, A. et al. New partial aggregations for multicommodity network flow problems: An application to the fixed-charge network design problem. **Computers and Operations Research**, v. 136, n. July, p. 105505, 2021.

KHAN, N. et al. Batteries State of Health Estimation via Efficient Neural Networks with Multiple Channel Charging Profiles. **IEEE Access**, v. 9, p. 7797–7813, 2021.

KIM, Y.; LEE, T. J.; KIM, D. I. Joint Information and Power Transfer in SWIPT-Enabled CRFID Networks. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 7, n. 2, p. 186–189, 2018a.

KIM, Y.; LEE, T. J.; KIM, D. I. Joint Information and Power Transfer in SWIPT-Enabled CRFID Networks. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 7, n. 2, p. 186–189, 2018b.

KONONOV, V. G.; BALANIS, C. A. Analysis and simulation of the propagation channel complexity on signal fading. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 9, p. 895–898, 2010.

KRIKIDIS, I. et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer in modern communication systems. **IEEE Communications Magazine**, v. 52, n. 11, p. 104–110, 2014.

KRIKIDIS, I. Relay Selection in Wireless Powered Cooperative Networks with Energy Storage. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 33, n. 12, p. 2596–2610, 2015.

KRIKIDIS, I.; SASAKI, S.; TIMOTHEOU, S. Simultaneous wireless information and energy transfer for MIMO relay channel with antenna switching. **2014 IEEE International Conference on Communications, ICC 2014**, v. 62, n. 5, p. 3800–3805, 2014.

KRISHNENDU, S.; BHARATH, B. N.; BHATIA, V. Cache Enabled Cellular Network:

Algorithm for Cache Placement and Guarantees. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 8, n. 6, p. 1550–1554, 2019.

KUMAR, A.; KAUR, A. Application of Classical Transportation Methods for Solving Fuzzy Transportation Problems. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 11, n. 5, p. 68–80, out. 2011.

KUO, Y.-W. et al. Design of a wireless sensor network based IoT platform for wide area and heterogeneous applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 1748, n. c, p. 5187–5197, 2018.

LI, Y.; DAI, J.; CUI, L. The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model. **International Journal of Production Economics**, v. 229, p. 107777, 2020.

LIU, M.; LIU, Y. Power Allocation for Secure SWIPT Systems with Wireless-Powered Cooperative Jamming. **IEEE Communications Letters**, v. 21, n. 6, p. 1353–1356, 2017.

LOUBET, G.; TAKACS, A.; DRAGOMIRESCU, D. Implementation of a Battery-Free Wireless Sensor for Cyber-Physical Systems dedicated to Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Access**, v. 7, p. 1–1, 2019.

MAO, B.; KAWAMOTO, Y.; KATO, N. AI-Based Joint Optimization of QoS and Security for 6G Energy Harvesting Internet of Things. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 8, p. 7032–7042, 2020.

MARAVIĆ, I.; KUSUMA, J.; VETTERLI, M. Low-sampling rate UWB channel characterization and synchronization. **Journal of Communications and Networks**, v. 5, n. 4, p. 319–326, 2003.

MASRI, H.; KRICHEN, S.; GUITOUNI, A. A multi-start variable neighborhood search for solving the single path multicommodity flow problem. **Applied Mathematics and Computation**, v. 251, p. 132–142, jan. 2015.

MATIKO, J. W. et al. Review of the Application of Energy Harvesting in Buildings. **Measurement Science and Technology**, v. 1, p. 1–25, 2013.

MEIJERINK, A.; MOLISCH, A. F. On the physical interpretation of the Saleh-Valenzuela

model and the definition of its power delay profiles. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 62, n. 9, p. 4780–4793, 2014.

MESQUITA, M. et al. A decompose-and-fix heuristic based on multi-commodity flow models for driver rostering with days-off pattern. **European Journal of Operational Research**, v. 245, n. 2, p. 423–437, 1 set. 2015.

MISHRA, D.; ALEXANDROPOULOS, G. C.; DE, S. Energy Sustainable IoT with Individual QoS Constraints Through MISO SWIPT Multicasting. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 4, p. 2856–2867, 2018.

MOLISCH, A. F. **Wireless Communications 2nd Edition**. [s.l: s.n.].

NISHI, T. et al. Cell-Based Local Search Heuristics for Guide Path Design of Automated Guided Vehicle Systems With Dynamic Multicommodity Flow. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 17, n. 2, p. 966–980, abr. 2020.

NOGUERA, J. F.; LEIRENS, S. **Modelling and simulation of a multi-commodity pipeline network**. 2010 IEEE ANDESCON. **Anais...IEEE**, set. 2010Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/andescon.2010.5633298>>

OLIVEIRA, A. H. S.; FONTGALLAND, G.; ANDRADE, H. D. **Propagation Loss Model Based in Multicommodity Flow for Indoor Environments and SWIPT Applications**. 20th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering. **Anais...Lodz**: 2021

OSTERRIEDER, P.; BUDDE, L.; FRIEDLI, T. The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. **International Journal of Production Economics**, v. 221, 2020.

PARK, J. J. et al. Transmitter-Oriented Dual Mode SWIPT with Deep Learning Based Adaptive Mode Switching for IoT Sensor Networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 4662, n. c, p. 1–14, 2020.

PICALLO, I. et al. A Radio Channel Model for D2D Communications Blocked by Single Trees in Forest Environments. **Sensors**, v. 19, n. 21, p. 4606, 23 out. 2019.

PONNIMBADUGE PERERA, T. D. et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 20, n. 1, p. 264–302, 2018.

PSARAFTIS, H. N. A multi-commodity, capacitated pickup and delivery problem: The single and two-vehicle cases. **European Journal of Operational Research**, v. 215, n. 3, p. 572–580, dez. 2011.

QUILLIOT, A.; LIBERALINO, H.; BERNAY, B. **Scale Multi-commodity Flow Handling on Dynamic Networks**. (I. Lirkov, S. Margenov, J. Waśniewski, Eds.) Large-Scale Scientific Computing. **Anais...Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg**, 2014

RAJARAM, A. et al. Receiver Design to Employ Simultaneous Wireless Information and Power Transmission with Joint CFO and Channel Estimation. **IEEE Access**, v. 7, p. 9678–9687, 2019.

RAO, M. et al. MGF Approach to the Analysis of Generalized Two-Ray Fading Models. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 2015-Septe, n. c, p. 1–1, 2015.

RÍOS-MERCADO, R. Z.; LÓPEZ-PÉREZ, J. F.; CASTRILLÓN-ESCOBAR, A. A GRASP for a Multi-depot Multi-commodity Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Heterogeneous Fleet in the Bottled Beverage Industry. In: **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. [s.l: s.n.]. v. 8197 LNCSp. 143–157.

SALIMIFARD, K.; BIGHARAZ, S. **The multicommodity network flow problem: state of the art classification, applications, and solution methods**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2022. v. 22

SALLAM, G. et al. **Shortest Path and Maximum Flow Problems Under Service Function Chaining Constraints**. IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications. **Anais...IEEE**, abr. 2018Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8485996/>>

SAMANI, A.; WANG, M. **MaxStream: SDN-based Flow Maximization for Video Streaming with QoS Enhancement**. 2018 IEEE 43rd Conference on Local Computer

Networks (LCN). **Anais...IEEE**, out. 2018Disponível em:
<<https://doi.org/10.1109/lcn.2018.8638033>>

SAMIMI, M. K.; RAPPAPORT, T. S.; MACCARTNEY, G. R. Probabilistic Omnidirectional Path Loss Models for Millimeter-Wave Outdoor Communications. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 4, n. 4, p. 357–360, 2015.

SARITHA, R.; VINOD CHANDRA, S. S. Multimodal Foraging by Honey Bees Toward Optimizing Profits at Multiple Colonies. **IEEE Intelligent Systems**, v. 34, n. 1, p. 14–22, 1 jan. 2019.

SHANG, F. et al. A Location Estimation Algorithm Based on RSSI Vector Similarity Degree. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 10, n. 8, p. 371350, 1 ago. 2014.

SHI, L. et al. Optimal Combining and Performance Analysis for Two-Way EH Relay Systems with TDBC Protocol. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 8, n. 3, p. 713–716, 2018.

SILVA, B.; HANCKE, G. P. IR-UWB-Based Non-Line-of-Sight Identification in Harsh Environments: Principles and Challenges. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 12, n. 3, p. 1188–1195, 2016.

SONG, C. et al. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer: Weighted MMSE approaches. **2014 IEEE Globecom Workshops, GC Wkshps 2014**, v. 12, n. 5, p. 1151–1156, 2014.

SONG, C.; JEON, Y. Weighted MMSE Precoder Designs for Sum-Utility Maximization in Multi-User SWIPT Network-MIMO with Per-BS Power Constraints. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 67, n. 3, p. 2809–2813, 2018.

SONG, Q. et al. CSI Amplitude Fingerprinting-Based NB-IoT Indoor Localization. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 5, n. 3, p. 1494–1504, 2018.

SUDEVALAYAM, S.; KULKARNI, P. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. **IEEE Comm. Surveys & Tutorials**, v. 13, n. 3, p. 443–461, 2011.

SZYMANSKI, T. H. Achieving minimum-routing-cost maximum-flows in infrastructure wireless mesh networks. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference**,

WCNC, p. 2031–2036, 2012.

TAVARES, C. H. A. et al. Machine learning-based models for spectrum sensing in cooperative radio networks. **IET Communications**, v. 14, n. 18, p. 3102–3109, 2020.

TEYEB, H. et al. **Optimal Virtual Machine Placement in Large-Scale Cloud Systems**. 2014 IEEE 7th International Conference on Cloud Computing. **Anais...IEEE**, jun. 2014Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/cloud.2014.64>>

TOMLIN, J. A. Minimum-Cost Multicommodity Network Flows. **Operations Research**, v. 14, n. 1, p. 45–51, 12 ago. 1966.

TRDLIČKA, J.; HANZÁLEK, Z. In-network distributed algorithm for energy optimal routing based on dual decomposition of linear programming. **IEEE Transactions on Communications**, v. 60, n. 6, p. 1634–1645, 2012.

UWAECHIA, A. N.; MAHYUDDIN, N. M. A comprehensive survey on millimeter wave communications for fifth-generation wireless networks: Feasibility and challenges. **IEEE Access**, v. 8, p. 62367–62414, 2020.

VENKATADRI, U.; ELASKARI, S. M.; KURDI, R. A multi-commodity network flow-based formulation for the multi-period cell formation problem. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 1–4, p. 175–187, 18 jul. 2017.

VIZZIELLO, A.; SAVAZZI, P. Efficient RFID Tag Identification Exploiting Hybrid UHF-UWB Tags and Compressive Sensing. **IEEE Sensors Journal**, v. 16, n. 12, p. 4932–4939, 2016.

WANG, Y. et al. Energy-Efficient Data and Energy Integrated Management Strategy for IoT Devices Based on RF Energy Harvesting. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 8, n. 17, p. 13640–13651, 2021.

WRIGHT, M. A. et al. On node models for high-dimensional road networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 105, p. 212–234, nov. 2017.

XU, L. DA; HE, W.; LI, S. Internet of things in industries: A survey. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 4, p. 2233–2243, 2014.

YAGHINI, M.; AKHAVAN, R. Multicommodity Network Design Problem in Rail Freight Transportation Planning. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 43, p. 728–739, 2012.

YAN, J. et al. Multicommodity Flow Modeling for the Data Transmission Scheduling Problem in Navigation Satellite Systems. **Complex System Modeling and Simulation**, v. 1, n. 3, p. 232–241, 2021.

YANG, H. et al. Resource and Power Allocation in SWIPT-Enabled Device-to-Device Communications Based on a Nonlinear Energy Harvesting Model. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 11, p. 10813–10825, 2020.

YANG, M.; WU, Y.; JIA, Y. A Hybrid Data Association Framework for Robust Online Multi-Object Tracking. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 26, n. 12, p. 5667–5679, 2017.

YANG, Z. et al. The Impact of Power Allocation on Cooperative Non-orthogonal Multiple Access Networks with SWIPT. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 7, p. 4332–4343, 2017.

YE, J. et al. Secure UAV-to-UAV Systems with Spatially Random UAVs. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 8, n. 2, p. 564–567, 2019.

ZAIDI, S. K.; HASAN, S. F.; GUI, X. Evaluating the Ergodic Rate in SWIPT-Aided Hybrid NOMA. **IEEE Communications Letters**, v. 22, n. 9, p. 1870–1873, 2018.

ZANELLA, A. et al. Internet of things for smart cities. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014.

ZHAI, D. et al. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer at 5G New Frequencies: Channel Measurement and Network Design. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 37, n. 1, p. 171–186, jan. 2019.

ZHANG, J. et al. Minimizing the Maximum Link Utilization in Multicast Multi-Commodity Flow Networks. **IEEE Communications Letters**, v. 22, n. 7, p. 1478–1481, 2018a.

ZHANG, J. et al. Minimizing the Maximum Link Utilization in Multicast Multi-Commodity Flow Networks. **IEEE Communications Letters**, v. 22, n. 7, p. 1478–1481, jul. 2018b.

ZHANG, J.; XIN, L.; ZHANG, F. Propagation characteristics and modeling in indoor multi-floor environment. **Physical Communication**, v. 9, p. 246–256, 2013.

ZHANG, P.; FAN, N. Analysis of budget for interdiction on multicommodity network flows. **Journal of Global Optimization**, v. 67, n. 3, p. 495–525, 1 mar. 2017.

ZHANG, T. et al. A Dynamic Combined Flow Algorithm for the Two-Commodity Max-Flow Problem Over Delay-Tolerant Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 17, n. 12, p. 7879–7893, dez. 2018c.

ZHANG, Y. et al. Concurrent Multipath Routing Optimization in Named Data Networks. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 2, p. 1451–1463, 2020.

ZHANG, Z.; LU, Y.; HUANG, Y. Simultaneous Wireless Information and Power Transfer for Dynamic Cooperative Spectrum Sharing Networks. **IEEE Access**, v. 7, p. 823–834, 2019.

ZHOU, M. et al. Guest Editorial Special Section on Advances and Applications of Internet of Things for Smart Automated Systems. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 13, n. 3, p. 1225–1229, 2016.

ZHU, G. L. et al. Dual-Polarized Communication Rectenna Array for Simultaneous Wireless Information and Power Transmission. **IEEE Access**, v. 7, p. 141978–141986, 2019a.

ZHU, L. et al. 3-D Beamforming for Flexible Coverage in Millimeter-Wave UAV Communications. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 8, n. 3, p. 837–840, 2019b.

Apêndice A

Tabela A.0.1 Métricas de avaliação de erro dos modelos

Modelo	Freq (GHz)	Potência de transmissão (dB)	MAE	MSE	RMSE	MSLE
MCF	0,915	0	13,4410	15,7849	3,9730	0,1378
MCF	0,915	1	12,0390	14,7105	3,8354	0,1255
MCF	0,915	10	7,2978	8,9265	2,9877	0,0567
MCF	0,915	20	9,4529	11,1277	3,3358	0,0525
MCF	0,915	30	11,5398	14,3289	3,7854	0,0899
ITU	0,915	0	23,5362	23,6749	4,8657	0,2794
ITU	0,915	1	22,1341	22,3128	4,7236	0,2566
ITU	0,915	10	13,4090	13,6561	3,6954	0,1207
ITU	0,915	20	3,0511	4,0578	2,0144	0,0178
ITU	0,915	30	3,1186	3,5789	1,8918	0,0080
Motley-Keenan	0,915	0	26,4478	27,5264	5,2466	0,5888
Motley-Keenan	0,915	1	25,0458	26,2381	5,1223	0,5600
Motley-Keenan	0,915	10	16,3207	18,0247	4,2456	0,3661
Motley-Keenan	0,915	20	7,3673	9,8178	3,1333	0,1805
Motley-Keenan	0,915	30	7,0526	7,9067	2,8119	0,1142
Log-Distance	0,915	0	34,9661	35,2212	5,9347	1,0224
Log-Distance	0,915	1	33,5641	33,8578	5,8187	0,9804
Log-Distance	0,915	10	24,8389	25,2006	5,0200	0,6971
Log-Distance	0,915	20	14,3616	15,0458	3,8789	0,3810
Log-Distance	0,915	30	10,0155	11,0336	3,3217	0,2483
MCF	2,4	0	25,3898	26,5996	5,1575	0,2784
MCF	2,4	1	20,3619	21,5118	4,6381	0,2070
MCF	2,4	10	12,4651	14,4878	3,8063	0,1135
MCF	2,4	20	7,4817	7,7163	2,7778	0,0375
MCF	2,4	30	7,5364	8,7818	2,9634	0,0318
ITU	2,4	0	35,4849	35,6057	5,9670	0,4978
ITU	2,4	1	30,4570	30,5361	5,5260	0,3977
ITU	2,4	10	22,5602	22,7976	4,7747	0,2523

ITU	2,4	20	12,3953	12,8726	3,5878	0,0979
ITU	2,4	30	3,1186	9,6120	3,1003	0,0514
Motley-Keenan	2,4	0	38,3966	39,0882	6,2521	0,8641
Motley-Keenan	2,4	1	33,3687	33,9913	5,8302	0,7352
Motley-Keenan	2,4	10	25,4719	26,3262	5,1309	0,5365
Motley-Keenan	2,4	20	15,3069	16,6904	4,0854	0,3090
Motley-Keenan	2,4	30	10,8091	13,2880	3,6453	0,2159
Log-Distance	2,4	0	46,9148	47,1034	6,8632	1,3983
Log-Distance	2,4	1	41,8870	42,0223	6,4825	1,2289
Log-Distance	2,4	10	33,9902	34,2261	5,8503	0,9600
Log-Distance	2,4	20	23,8252	24,1787	4,9172	0,6265
Log-Distance	2,4	30	19,3274	20,1903	4,4934	0,4768
MCF	3	0	23,0477	23,7869	4,8772	0,2350
MCF	3	1	23,1180	23,6956	4,8678	0,2289
MCF	3	10	16,4213	18,7958	4,3354	0,1536
MCF	3	20	7,9715	9,9284	3,1509	0,0553
MCF	3	30	5,3044	5,8884	2,4266	0,0214
ITU	3	0	33,1428	33,1931	5,7613	0,4442
ITU	3	1	33,2131	33,3150	5,7719	0,4405
ITU	3	10	26,1653	27,3699	5,2316	0,3164
ITU	3	20	17,5741	18,2393	4,2707	0,1622
ITU	3	30	3,1186	11,2782	3,3583	0,0709
Motley-Keenan	3	0	36,0544	36,4802	6,0399	0,7898
Motley-Keenan	3	1	36,1248	36,4660	6,0387	0,7784
Motley-Keenan	3	10	29,0770	30,5434	5,5266	0,6130
Motley-Keenan	3	20	20,4858	21,3218	4,6175	0,3890
Motley-Keenan	3	30	13,5371	14,5755	3,8178	0,2510
Log-Distance	3	0	44,5727	44,6478	6,6819	1,3051
Log-Distance	3	1	44,6431	44,7211	6,6874	1,2939
Log-	3	10	37,5952	38,4672	6,2022	1,0656

Distance						
Log-Distance	3	20	29,0040	29,3766	5,4200	0,7603
Log-Distance	3	30	22,0554	22,3587	4,7285	0,5455
MCF	3,5	0	23,0841	24,1067	4,9099	0,2409
MCF	3,5	1	21,3439	22,5667	4,7504	0,2213
MCF	3,5	10	12,7006	14,4483	3,8011	0,1185
MCF	3,5	20	6,0743	7,4145	2,7230	0,0408
MCF	3,5	30	6,3841	7,6569	2,7671	0,0275
ITU	3,5	0	33,1792	33,2050	5,7624	0,4485
ITU	3,5	1	31,4390	31,4827	5,6109	0,4173
ITU	3,5	10	22,7957	22,8300	4,7781	0,2584
ITU	3,5	20	12,9940	13,0488	3,6123	0,1060
ITU	3,5	30	3,1186	8,2789	2,8773	0,0473
Motley-Keenan	3,5	0	36,0909	36,6275	6,0521	0,7976
Motley-Keenan	3,5	1	34,3507	34,9847	5,9148	0,7605
Motley-Keenan	3,5	10	25,7074	26,4556	5,1435	0,5513
Motley-Keenan	3,5	20	15,9057	17,0550	4,1298	0,3301
Motley-Keenan	3,5	30	10,8092	12,6361	3,5547	0,2259
Log-Distância	3,5	0	44,6092	44,7022	6,6860	1,3138
Log-Distância	3,5	1	42,8690	42,9929	6,5569	1,2627
Log-Distância	3,5	10	34,2256	34,3454	5,8605	0,9776
Log-Distância	3,5	20	24,4240	24,5819	4,9580	0,6558
Log-Distância	3,5	30	19,3275	19,6495	4,4328	0,4905

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Apêndice B

Tabela B.0.1 Média de medição de RSSI para modo sem barreiras entre Tx e Rx

Freq (GHz)	Tx(dBm)	Rx(dBm)	RSSI (dBm)
0,95	-30	-63,72	33,72
0,95	-20	-54,82	34,82
0,95	-10	-45,11	35,11
0,95	-1	-36,42	35,42
0,95	0	-35,26	35,26
0,95	1	-34,34	35,34
0,95	10	-25,37	35,37
0,95	20	-15,67	35,67
0,95	30	-9,83	39,83
2,4	-30	-72,23	42,23
2,4	-20	-68,47	48,47
2,4	-10	-63,48	53,48
2,4	-1	-56,15	55,15
2,4	0	-55,17	55,17
2,4	1	-53,97	54,97
2,4	10	-45,85	55,85
2,4	20	-35,62	55,62
2,4	30	-23,17	53,17
3	-30	-70,93	40,93
3	-20	-67,38	47,38
3	-10	-60,2	50,2
3	-1	-53,25	52,25
3	0	-52,35	52,35
3	1	-51,17	52,17
3	10	-42,89	52,89
3	20	-32,43	52,43
3	30	-27,24	57,24
3,5	-30	-72,38	42,38
3,5	-20	-68,66	48,66
3,5	-10	-62,35	52,35
3,5	-1	-54,59	53,59
3,5	0	-53,87	53,87
3,5	1	-52,76	53,76
3,5	10	-44,38	54,38
3,5	20	-34,42	54,42
3,5	30	-28,67	58,67

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Apêndice C

Tabela C.0.1 - Resumo dados médios de medição de RSSI variação do anteparo abaixo da linha de visada.

Freq (GHz)	Tx(dBm)	Rx(dBm) 5m	Rx(dBm) 4 m	Rx(dBm) 3 m	Rx(dBm) 2 m	Rx(dBm) 1 m	RSSI 5 m	RSSI 4 m	RSSI 3 m	RSSI 2 m	RSSI 1 m
0,95	-30	-65,89	-64,22	-64,12	-63,76	-64,04	35,89	34,22	34,12	33,76	34,04
0,95	-20	-57,32	-56,12	-55,84	-54,97	-52,95	37,32	36,12	35,84	34,97	32,95
0,95	-10	-48,12	-46,71	-48,89	-46,97	-47,11	38,12	36,71	38,89	36,97	37,11
0,95	-1	-38,75	-37,12	-37,82	-37,04	-38,76	37,75	36,12	36,82	36,04	37,76
0,95	0	-38,11	-36,96	-36,41	-36,26	-37,96	38,11	36,96	36,41	36,26	37,96
0,95	1	-37,35	-35,63	-34,89	-35,40	-36,93	38,35	36,63	35,89	36,40	37,93
0,95	10	-28,15	-26,57	-26,12	-26,32	-27,61	38,15	36,57	36,12	36,32	37,61
0,95	20	-18,42	-17,92	-16,22	-16,21	-17,78	38,42	37,92	36,22	36,21	37,78
0,95	30	-12,57	-11,35	-10,71	-10,68	-11,89	42,57	41,35	40,71	40,68	41,89
2,4	-30	-68,24	-64,87	-67,98	-69,00	-69,00	38,24	34,87	37,98	39,00	39,00
2,4	-20	-64,80	-64,83	-61,97	-63,00	-63,00	44,80	44,83	41,97	43,00	43,00
2,4	-10	-55,93	-57,48	-52,61	-57,00	-56,00	45,93	47,48	42,61	47,00	46,00
2,4	-1	-47,97	-49,98	-44,03	-48,65	-47,00	46,97	48,98	43,03	47,65	46,00
2,4	0	-46,93	-47,98	-42,05	-47,00	-46,00	46,93	47,98	42,05	47,00	46,00
2,4	1	-45,20	-46,89	-41,12	-16,25	-45,00	46,20	47,89	42,12	17,25	46,00
2,4	10	-37,73	-38,46	-33,13	-37,00	-37,00	47,73	48,46	43,13	47,00	47,00
2,4	20	-27,45	-28,89	-23,02	-27,00	-26,00	47,45	48,89	43,02	47,00	46,00
2,4	30	-20,77	-21,57	-16,04	-21,00	-20,00	50,77	51,57	46,04	51,00	50,00
3	-30	-68,83	-70,83	-69,02	-68,00	-68,06	38,83	40,83	39,02	38,00	38,06
3	-20	-65,35	-63,88	-67,01	-65,00	-64,02	45,35	43,88	47,01	45,00	44,02
3	-10	-58,43	-58,75	-62,32	-58,00	-59,00	48,43	48,75	52,32	48,00	49,00

Freq (GHz)	Tx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	RSSI	RSSI	RSSI	RSSI	RSSI
		5m	4 m	3 m	2 m	1 m	5 m	4 m	3 m	2 m	1 m
3	-1	-51,44	-51,83	-55,01	-50,00	-51,08	50,44	50,83	54,01	49,00	50,08
3	0	-50,18	-50,43	-54,04	-49,00	-50,00	50,18	50,43	54,04	49,00	50,00
3	1	-49,18	-49,93	-53,03	-48,00	-48,06	50,18	50,93	54,03	49,00	49,06
3	10	-40,89	-41,00	-45,01	-40,00	-40,03	50,89	51,00	55,01	50,00	50,03
3	20	-31,29	-30,00	-34,03	-30,00	-30,00	51,29	50,00	54,03	50,00	50,00
3	30	-25,39	-25,00	-28,02	-28,00	-25,00	55,39	55,00	58,02	58,00	55,00
3,5	-30	-69,30	-68,00	-69,60	-68,00	-69,00	39,30	38,00	39,60	38,00	39,00
3,5	-20	-65,30	-65,00	-66,42	-64,01	-65,00	45,30	45,00	46,42	44,01	45,00
3,5	-10	-60,43	-59,00	-63,43	-59,00	-60,00	50,43	49,00	53,43	49,00	50,00
3,5	-1	-53,73	-52,00	-53,12	-51,00	-52,00	52,73	51,00	52,12	50,00	51,00
3,5	0	-51,23	-51,02	-55,10	-50,83	-51,00	51,23	51,02	55,10	50,83	51,00
3,5	1	-51,68	-50,89	-54,20	-50,12	-51,03	52,68	51,89	55,20	51,12	52,03
3,5	10	-42,53	-42,00	-46,00	-42,00	-42,00	52,53	52,00	56,00	52,00	52,00
3,5	20	-32,56	-32,00	-36,00	-32,00	-32,00	52,56	52,00	56,00	52,00	52,00
3,5	30	-27,83	-26,00	-30,00	-25,00	0,60	57,83	56,00	60,00	55,00	29,40

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Apêndice D

Tabela D.0.1 Medição RSSI com barreira em linhas de visada.

Freq (GHz)	Tx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	RSSI	RSSI	RSSI
		1 m	2,5 m	4 m	1 m	2,5 m	4 m
0,95	-30	-69,85	-72,11	-68,72	39,85	42,11	38,72
0,95	-20	-64,45	-69,25	-61,20	44,45	49,25	41,20
0,95	-10	-62,71	-62,40	-52,80	52,71	52,40	42,80
0,95	-1	-52,56	-55,25	-43,72	51,56	54,25	42,72
0,95	0	-50,51	-53,89	-43,63	50,51	53,89	43,63
0,95	1	-49,73	-52,37	-42,44	50,73	53,37	43,44
0,95	10	-39,53	-43,61	-32,76	49,53	53,61	42,76
0,95	20	-28,38	-34,51	-23,14	48,38	54,51	43,14
0,95	30	-19,62	-29,60	-16,78	49,62	59,60	46,78
2,4	-30	-68,39	-69,90	-68,94	38,39	39,90	38,94
2,4	-20	-67,60	-68,75	-66,77	47,60	48,75	46,77
2,4	-10	-62,32	-67,51	-58,24	52,32	57,51	48,24
2,4	-1	-55,50	-62,71	-51,51	54,50	61,71	50,51
2,4	0	-54,80	-63,91	-50,71	54,80	63,91	50,71
2,4	1	-53,75	-61,88	-49,40	54,75	62,88	50,40
2,4	10	-44,15	-58,82	-41,28	54,15	68,82	51,28
2,4	20	-34,21	-49,22	-31,51	54,21	69,22	51,51
2,4	30	-27,95	-42,40	-25,53	57,95	72,40	55,53
3	-30	-70,97	-68,60	-67,92	40,97	38,60	37,92
3	-20	-67,10	-67,58	-66,65	47,10	47,58	46,65
3	-10	-64,13	-63,70	-65,56	54,13	53,70	55,56
3	-1	-59,83	-56,34	-57,57	58,83	55,34	56,57
3	0	-55,23	-55,63	-56,85	55,23	55,63	56,85
3	1	-58,84	-54,10	-55,71	59,84	55,10	56,71
3	10	-49,70	-46,64	-47,63	59,70	56,64	57,63
3	20	-41,92	-37,74	-38,95	61,92	57,74	58,95

Freq (GHz)	Tx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	Rx(dBm)	RSSI	RSSI	RSSI
		1 m	2,5 m	4 m	1 m	2,5 m	4 m
3	30	-34,29	-31,21	-33,50	64,29	61,21	63,50
3,5	-30	-67,26	-67,30	-68,45	37,26	37,30	38,45
3,5	-20	-66,65	-66,18	-68,54	46,65	46,18	48,54
3,5	-10	-63,97	-67,99	-67,80	53,97	57,99	57,80
3,5	-1	-59,73	-63,48	-61,70	58,73	62,48	60,70
3,5	0	-58,43	-62,39	-59,48	58,43	62,39	59,48
3,5	1	-57,64	-62,12	-59,83	58,64	63,12	60,83
3,5	10	-49,17	-55,12	-57,54	59,17	65,12	67,54
3,5	20	-39,99	-48,42	-41,40	59,99	68,42	61,40
3,5	30	-34,36	-48,40	-37,12	64,36	78,40	67,12

Fonte: elaborado pelo autor (2022).