

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Rafael José Minhoto

**Análise do Efeito do Padrão de Entrada
no Desempenho da Comunicação Sem
Fio de Medidores Residenciais
Modernos de Energia Elétrica**

Rafael José Minhoto

**Análise do Efeito do Padrão de Entrada
no Desempenho da Comunicação Sem
Fio de Medidores Residenciais
Modernos de Energia Elétrica**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos e Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Capovilla

São Carlos - SP

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Rafael José Minhoto, realizada em 26/08/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Claudionor Francisco do Nascimento (UFSCar)

Prof. Dr. Thales Souza (UFABC)

Prof. Dr. Wesley Angelino de Souza (UTFPR)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Este trabalho é dedicado ao precursor da comunicação sem fio no Brasil, inventor do rádio em fonia e patrono do rádio amador brasileiro: Padre Roberto Landell de Moura - 1861 a 1928.

Agradecimentos

Obrigado

Essa jornada está se concluindo, desta maneira, quero agradecer ao professor Claudionor Francisco do Nascimento pela parceria e atenção durante todo o período deste estudo e, principalmente nos momentos das incertezas e dificuldades que ocorreram durante os estudos, sem esse apoio, não seria possível a realização deste trabalho.

Quero também agradecer ao professor Carlos Capovilla pela parceria e colaboração, que junto com o professor Claudionor, colaborou no desenvolvimento e na realização deste trabalho.

Quero agradecer também aos professores da banca pela gentileza de terem aceitado o convite.

A minha esposa Wania e meu filho Eduardo pela parceria, paciência e compreensão do período passei distante deles. Pela ajuda em todos os momentos importantes e difíceis nesses dois anos. Eles também foram imprescindíveis na ajuda deste trabalho.

Obrigado a todos os colegas com os quais pude conviver durante as aulas do mestrado. Obrigado ao Alex Ferreira e ao Paulo Fernando pela disponibilidade e prontidão quando precisei de ajuda.

Obrigado aos Srs. Ciro Faccini e Jefferson A. Scudeler da CPFL pela disponibilidade pessoal e apoio a este trabalho de pesquisa.

Obrigado ao Sr. Leomar Scarpa, colega técnico da UFSCar, pelo auxílio ao trabalho.

Resumo

Os medidores residenciais modernos de energia elétrica estão entre os facilitadores do conceito de redes elétricas inteligentes. A medição automática de energia elétrica é parte importante de uma política energética com foco na implementação de novos conceitos, capaz de fornecer aos consumidores acesso amigável a diversos serviços, sendo que os medidores de energia elétrica residenciais modernos podem ser integrados a rede elétrica inteligente, por exemplo, por meio de uma de *interface* de comunicação sem fio.

Neste trabalho, com base em um estudo de caso e por meio de uma análise experimental com medidas de bancada e campo, foi verificado o desempenho da comunicação sem fio empregada em medidor de energia elétrica residencial moderno, instalado em padrão de entrada em caixa metálica perpendicular à via.

Nestes experimentos foram utilizados dispositivos compatíveis com o padrão *IEEE* 802.15.4, operando na frequência de 915MHz, e que são utilizados por diversos fabricantes e concessionárias em medidores de energia elétrica residenciais modernos.

Palavras-chave: *IEEE* 802.15.4, *ISM* 915MHz, medidor de energia elétrica inteligente, rádio propagação, rede sem fio, *ZigBee*.

Abstract

Modern residential smart meters are among the enablers of the smart grid concept. Automatic electric metering is an important part of an energy policy with a focus on implementing new concepts that can provide consumers with user-friendly access to various services, whereby modern residential smart meters can be integrated into the smart grid, for example via a wireless communication interface.

In this paper, based on a case study and through experimental analysis with bench and field measurements, the performance of wireless communication employed in a modern residential electricity meter, installed in a metal box entry perpendicular to the roadway, was verified.

In the experiments IEEE 802.15.4 compatible devices were used, operating at a frequency of 915MHz, which are used by many manufacturers and utilities in modern residential smart meters.

Keywords: IEEE 802.15.4, ISM 915MHz, radio propagation, smart meter, ZigBee, wireless network.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Investimento anual do setor elétrico	29
Figura 2 – Investimento por país em 2019	29
Figura 3 – Camadas <i>ZigBee</i>	31
Figura 4 – Exemplo da Configuração em Malha (1)	33
Figura 5 – Exemplo da Configuração em Malha (2)	34
Figura 6 – Comparativo entre Camadas <i>Zigbee</i> e <i>Wi-SUN</i>	35
Figura 7 – Padrão de entrada	39
Figura 8 – Antena instalada no poste (08/2021)	39
Figura 9 – Posição do padrão e ponto de acesso - 1º exemplo	40
Figura 10 – Posição do padrão e ponto de acesso - 2º exemplo	40
Figura 11 – Obstrução do sinal de RF	41
Figura 12 – <i>Setup</i> do ensaio	43
Figura 13 – <i>Path loss</i> para $d < 8m$	45
Figura 14 – <i>Path loss</i> para $d > 8m$	46
Figura 15 – Comando RSSI - manual da TI	49
Figura 16 – <i>PER</i> vs. distância para outros sistemas 802 coexistentes afetados pela banda 902-928 MHz.	50
Figura 17 – Posição do MEE e do analisador de espectro	54
Figura 18 – Posição do MEE e as posições para as medidas de 90° e 180°	54
Figura 19 – Medida da potência de saída	55
Figura 20 – Placa CC1352P-2 sem padrão de entrada	56
Figura 21 – Placa CC1352P-2 instalada no padrão de entrada	57
Figura 22 – Cobertura verificada	58
Figura 23 – Configuração LPSTK	59
Figura 24 – Configuração do <i>software</i> para recepção para taxa 50kbps	59
Figura 25 – Configuração do <i>software</i> para recepção para taxa 200kbps	60
Figura 26 – <i>Frame</i> do padrão <i>IEEE Std. 802.15.4</i>	60

Figura 27 – Indicadores de <i>PER</i> , <i>BER</i> e <i>RSSI</i>	61
Figura 28 – Estágio final da placa CC1352P-2	62
Figura 29 – Comparação da atenuação calculada e medida pela distância	67
Figura 30 – Direções analisadas	67
Figura 31 – Perfil do relevo para direção norte	69
Figura 32 – Visão norte	69
Figura 33 – Perfil do relevo para direção sul	70
Figura 34 – Visão Sul	70
Figura 35 – Perfil do relevo - Direções Leste e Oeste	71
Figura 36 – Visão - Direções Leste e Oeste	71
Figura 37 – Medida <i>RSSI</i> 50kbps - Direções Leste e Oeste	76
Figura 38 – Medida <i>RSSI</i> 50kbps - Direções Norte e Sul	76
Figura 39 – Medida <i>RSSI</i> 200kbps - Direções Leste e Oeste	78
Figura 40 – Medida <i>RSSI</i> 200kbps - Direções Norte e Sul	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo entre nível de recepção calculado e especificado CC1352P-2	47
Tabela 2 – Parâmetros do $RSSI$ do CC1352	49
Tabela 3 – Parâmetros configurados na placa LPSTK	59
Tabela 4 – Medida da Varredura	62
Tabela 5 – Medição de potência de saída da placa LPSTK	63
Tabela 6 – Posição Frontal $P_{saída}= 13dBm$	64
Tabela 7 – Medidas nas posições de 90° e 180°	64
Tabela 8 – Medidas com o padrão de entrada	65
Tabela 9 – Distância $<8m$ sem padrão de entrada	65
Tabela 10 – Distância $<8m$ com padrão de entrada	66
Tabela 11 – Cálculo da atenuação do sinal de RF - LPSTK	72
Tabela 12 – Cálculo estimativo do sinal de RF na recepção CC1352P-2	73
Tabela 13 – Medidas com taxa de dados de 50kbps	75
Tabela 14 – Medidas com taxa de dados de 200kbps	77

Lista de siglas

AM Amazonas

AMI Advanced Metering Infrastructure

AMR Automatic Meter Reading

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI American National Standards Institute

BER Bit Error Rate

BPSK Binary Phase-Shift Keying

CGEE Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CPFL Companhia Paulista de Força e Luz

CRC Cyclic Redundancy Check

CW Continuous Wave

ELF Extremely Low Frequency

EUA Estados Unidos da América

FEC Forward Error Correction

GFSK Gaussian Frequency-Shift Keying Modulation

GPRS General Packet Radio Service

HF High Frequency

HTTP Hypertext Transfer Protocol

IEA International Energy Agency

IEC International Electrotechnical Commission

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

IoT Internet of Things

IPv6 Internet Protocol Version 6

ISM Industrial, Scientific and Medical

ITU International Telecommunication Union

JRC Joint Research Centre

6LoWPAN IPv6 Low Power Wireless Personal Area Network

MEE Medidores de Energia Elétrica

MCTI Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MME Ministério da Minas e Energia

NIST National Institute of Standards and Technology

OSI Open System Interconnection Model

PCB Printed Circuit Board

PER Packet Error Rate

PLC Power Line Communication

PLS Projeto de Lei do Senado

REI Redes Elétricas Inteligentes

RF Rádio Frequência

RSS Radio Signal Strength

RSSI Radio Signal Strength Indicator

RSW Received Signal Weakness

SA Standards Association

SiBMA Sistema Brasileiro de Medição Avançada

SNR Signal Noise Rate

TCP Transmission Control Protocol

TI Texas Instruments

UDP User Datagram Protocol

UHF Ultra High Frequency

WiFi Wireless Fidelity

Wi-SUN Wireless Smart Ubiquitous Networks

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
2	MEDIDOR RESIDENCIAL MODERNO DE ENERGIA ELÉ- TRICA	23
2.1	Rede de Distribuição de Energia	23
2.2	Rede Elétrica Inteligente	24
2.3	Situação da REI no Brasil	25
2.3.1	Trabalhos sobre REI no Brasil.	26
2.3.2	Arcabouço legal	27
2.4	Situação da REI no Mundo	27
2.5	Tecnologias de Comunicação para MEE	30
2.6	Tecnologia <i>ZigBee</i>	31
2.7	Tecnologia <i>Wi-SUN</i>	31
2.8	Operação da Rede em Malha	32
2.9	Comparativo <i>Wi-SUN</i> e <i>ZigBee</i>	34
3	CONTEXTUALIZAÇÃO TÉCNICA / EXPERIMENTAL . .	37
3.1	Considerações sobre o Sinal de RF	37
3.2	Desvanecimento do Sinal de RF	38
3.3	Atenuação do Sinal de RF	38
3.4	Obstrução do Sinal de RF	41
3.5	Método para Caracterização do Sinal de RF	42
3.6	Método <i>IEEE Std. 802.15.4</i>	43
3.7	Experimento em Bancada	43
3.7.1	Cálculo de estimativa da sensibilidade do receptor	46
3.8	Métricas Para o Ensaio	47
3.8.1	<i>RSS</i>	48

3.8.2	<i>Packet error rate (PER)</i> – taxa de erro de pacote	49
3.8.3	Relação sinal/ruído (<i>signal to noise ratio - SNR</i>)	50
4	DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RE-	
	SULTADOS	53
4.1	<i>Setup</i> do Ensaio de Bancada	53
4.2	Método do Ensaio	55
4.2.1	Roteiro do ensaio em bancada	55
4.2.2	Roteiro do ensaio em bancada até 8m	56
4.2.3	Roteiro do ensaio em campo acima de 8m	57
4.3	Configuração das Placas da <i>TI</i>	58
4.4	Ensaio em Bancada - 1^a parte	61
4.4.1	Verificação do nível do sinal de RF	61
4.5	Ensaio em Bancada - 2^a parte	63
4.6	Comparação: Atenuação Estimada e Medida	66
4.7	Ensaio em Campo	67
4.8	Estimativa de Alcance	71
4.9	Resultados das Medidas de Campo	74
	Conclusão	79
	REFERÊNCIAS	81

Capítulo 1

Introdução

Desde o primeiro medidor de energia elétrica desenvolvido no século 19 até os modelos comercializados atualmente, o medidor residencial moderno de energia elétrica (MEE) vem substituindo gradativamente o medidor de energia convencional (IEA, 2020) e (KAGAN et al., 2013).

O primeiro sistema comercial disponível para monitorar um sistema remoto de medição foi desenvolvido pela empresa *Metretek* (1978), fundada por *Theodore George Paraskevakos* em 1974. O sistema da *Metretek* usava a linha comutada como meio para comunicação entre dispositivos (METRETEK, 1978).

Giaconi, Gunduz e Poor (2018) indicam que os medidores residenciais modernos de energia elétrica estão entre os facilitadores cruciais do conceito de redes elétricas inteligentes. Fornecem informação precisa sobre o consumo doméstico de energia dos consumidores para a concessionária, o que é essencial para a determinar o período de consumo, detecção rápida de falhas e prevenção do roubo de energia, ao mesmo tempo que proporcionam aos consumidores uma maior flexibilidade e controle sobre o seu consumo.

De acordo com Geetha e Jamuna (2013) a monitorização da qualidade da energia ajuda a baixar os custos energéticos e a prolongar a vida útil de equipamentos. A medição inteligente é uma solução ponta a ponta completa para minimizar os erros e ajuda na distribuição de energia de qualidade. É uma política energética para os consumidores fornecer-lhes uma cara amigável no tratamento dos serviços públicos, especialmente da eletricidade.

De acordo com Gough et al. (2022) a combinação das redes elétricas tradicionais com os recentes desenvolvimentos das tecnologias de informação e comunicação, especialmente com a introdução da internet das coisas (*Internet of Things -IoT*), tem o potencial para uma melhor gestão e controle dos sistemas de distribuição elétrica, o que é especialmente

verdadeiro para a utilização de medidores de energia. Este aumento da comunicação com dispositivos ligados podem melhorar a eficiência do funcionamento, reduzir as perdas de energia e aumentar a confiabilidade do sistema de distribuição elétrica.

De acordo com Yongyong e Chenghao (2020) o desenvolvimento da rede elétrica inteligente, com sistema automático de leitura para medidores de energia elétrica viabilizou a substituição do sistema de leitura manual feito pela concessionária. Os autores propõem o uso da tecnologia de comunicação sem fio *ZigBee* na concepção do sistema de leitura remota de medidor residencial moderno de energia elétrica.

Por outro lado Fan et al. (2011) sinalizou que houve uma evolução quanto à expansão da aplicação e do mercado, sendo um desafio em relação à implantação da rede de medidor residencial moderno de energia elétrica dada à diversidade tecnológica de comunicação que pode ser usada pela concessionária.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é verificar experimentalmente o desempenho e observar o comportamento da comunicação sem fio operando em 915MHz de um medidor residencial moderno de energia elétrica (MEE), instalado dentro padrão de entrada em caixa metálica com a antena montada dentro do padrão do grupo B e alinhado perpendicularmente à rua.

O alinhamento do padrão de entrada em caixa metálica mais observado em campo na região onde a pesquisa foi desenvolvida foi a posição perpendicular à via. A altura do padrão de entrada também não segue uma uniformidade.

A presente proposta se justifica pelo fato de não serem identificados na literatura muitos estudos de campo específicos de rádio propagação para rede sem fio padrão *ZigBee* ou *IEEE 802.15.4* aplicados a medidor residencial moderno de energia elétrica na frequência de 915MHz e instalado em invólucro, similar ao usado pelas concessionárias.

Organização do texto

A dissertação foi dividida em 4 capítulos e a conclusão, onde estão descritos o conteúdo de cada capítulos a seguir:

No Capítulo 2 listou-se algumas tecnologias de comunicação que são empregadas em medidor residencial moderno de energia elétrica, o funcionamento básico da rede *ZigBee* e *Wi-SUN*, a situação da rede elétrica inteligente no Brasil e em alguns países; No Capítulo 3 estão contextualizados os métodos e as métricas experimentais para verificar o comportamento do sinal de rádio frequência aplicado em rede em fio para medidor inteligente; No Capítulo 4 estão as descrições dos experimento e a análise resultados das medidas de bancada e de campo e, por último, a Conclusão com proposta de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Medidor Residencial Moderno de Energia Elétrica

Neste capítulo são apresentadas duas tecnologias de comunicação para o medidor residencial moderno de energia elétrica (MEE), o conceito da rede elétrica inteligente (REI), a situação da REI no Brasil após a chamada da ANEEL em 2010 e o investimento em REI em alguns países através das informações disponibilizadas pela Agência Internacional de Energia (IEA).

2.1 Rede de Distribuição de Energia

De acordo com Kagan, Oliveira e Robba (2010), uma rede de distribuição de energia tem a função de captar a energia em grosso das subestações de subtransmissão, através de linhas trifásicas operando em tensões, usualmente, de 138kV ou 69kV, com capacidade de transporte de algumas dezenas de MW por circuito.

Ainda de acordo com a ANEEL (2022), a distribuição de energia elétrica é um serviço público de competência da União, prestado por concessionárias e permissionárias, chamadas de distribuidoras. É caracterizada como o segmento do setor elétrico dedicado ao fornecimento de energia elétrica ao consumidor final e a outros usuários, por meio do rebaixamento da tensão proveniente do sistema de transmissão.

O sistema de distribuição é composto pela rede elétrica e pelo conjunto de instalações e equipamentos elétricos que operam em níveis de alta tensão (superior a 69 kV e inferior a 230 kV), média tensão (superior a 1 kV e inferior a 69 kV) e baixa tensão (igual ou inferior a 1 kV) (ANEEL, 2022).

Atualmente, o Brasil possui 105 distribuidoras de energia elétrica, sendo 54 concessionárias e 38 permissionárias, além de 13 cooperativas de eletrificação rural, que atuam sob autorização precária e estão em processo de regularização para serem concessionárias ou permissionárias. A regulação técnica da distribuição é conduzida pela Superintendência de Regulação dos Serviços de Distribuição - (SRD) (ANEEL, 2022).

2.2 Rede Elétrica Inteligente

Ustun e Hussain (2019) indicam que conceito de rede inteligente refere-se aos sistemas de energia que têm mais digitalização, comunicação e coordenação. Estes sistemas têm mais observabilidade com dispositivos de medição que estão dispersos espacialmente e têm a capacidade de tomar decisões em tempo real e transmitir novas condições de funcionamento a equipamentos relacionados. Embora seja muito robusto como conceito, a implementação de uma rede com troca de informação a tal escala não é tarefa fácil.

Finster e Baumgart (2015) sinalizam que o principal objetivo é a integração de todo o setor de elétrico da geração até o consumidor final, com o intuito de reduzir perdas técnicas, otimização do sistema, otimização nos investimentos, integração das novas tecnologias para geração de energia elétrica, além do aprimoramento na cobrança e garantir a privacidade dos consumidores.

Para Kagan et al. (2013), a REI é um conceito e não um produto, sua motivação, interpretação, abrangência e desafios são diferenciados entre os países, regiões do Brasil, entre concessionárias, ou mesmo, entre regiões de uma mesma área de concessão. É um consenso, no entanto, que a integração das tecnologias da informação e telecomunicações à tradicional infraestrutura dos sistemas de energia elétrica proporcionará importantes mudanças na forma de gestão dos processos das concessionárias e no relacionamento entre regulador, concessionária de energia e clientes.

As instituições *NIST*, *CEN-CENELEC* e ABNT, definem uma REI de diferentes maneiras, com o mesmo fundamento.

A *National Institute of Standards and Technology (NIST)* dos EUA define a REI da seguinte forma:

É uma rede modernizada que permite fluxos bidirecionais de energia e usa comunicação bidirecional e recursos de controle que levarão a uma série de novas funcionalidades e aplicativos. Ao contrário da rede atual, que fornece principalmente eletricidade em um fluxo unidirecional do gerador para a tomada, a rede inteligente permitirá o fluxo bidirecional de eletricidade e informação (NIST, 2022).

Os comitês *European Committee for Standardization (CEN)* e *European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)* definem a REI da seguinte forma:

Uma REI é uma rede elétrica que pode integrar de maneira econômica o comportamento e as ações de todos os usuários conectados a ela (geradores e/ou consumidores) para garantir um sistema de energia economicamente eficiente, sustentável, com altos níveis de qualidade e segurança de abastecimento. As redes inteligentes permitem que empresas e residências produzam eletricidade (por exemplo – usando painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas) e a vendam a outros consumidores por meio de redes existentes (CEN-CENELEC, 2022).

O grupo de estudo da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT/CE 003.008.01 define a REI da seguinte forma:

Escopo : Preparar e coordenar, em cooperação com outras Comissões de Estudo do ABNT/CB-03, o desenvolvimento de padrões internacionais e outras demandas com ênfase em aspectos gerais de sistemas de elétricos de potencia e equilíbrio entre qualidade e custo para os seus usuários. Sistemas elétricos de potencia envolvem redes de geração, transmissão, e distribuição até as conexões e *interfaces* com as redes dos usuários (geradores e cargas). Incluindo os aspectos de TIC (Tecnologia de Informação, Comunicações e Automação), que permita tratar os aspectos dos sistemas elétricos de potencia, como parte integrante do conceito das redes elétricas inteligentes – “*Smart Grid ou Intelligrid*”. No âmbito de uma normatização internacional para a digitalização do setor elétrico temos o comitê técnico TC 57 (*Power systems management and associated information exchange*) da IEC. Esse comitê técnico desenvolve padrões e métodos para a REI, no qual o Brasil faz parte como *Full Member* e sendo representado pelo Comitê Brasileiro de Eletricidade, Eletrônica, Iluminação e Telecomunicações (COBEI, 2022).

2.3 Situação da REI no Brasil

Alguns trabalhos e portaria sobre REI no Brasil analisam o desenvolvimento, tecnologias usadas e a implantação de projetos pilotos da REI no Brasil por algumas concessionárias (ANEEL, 2010).

Portaria nº 440 de 15 de abril de 2010

Em 2010 foi criado no âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME), através da portaria nº 440 de 15 de Abril de 2010 um grupo de trabalho sobre o estado da arte em REI no Brasil e no mundo. Nessa portaria estão descritas as visitas técnicas aos EUA, tecnologias envolvidas, contato com fabricante e contatos com profissionais do Japão e Europa (ENERGIA, 2010).

O objetivo do grupo de trabalho está descrito no artigo 1º da portaria, da seguinte forma:

Artigo 1º - Criar Grupo de Trabalho com o objetivo de analisar e identificar ações necessárias para subsidiar o estabelecimento de políticas públicas para a implantação de um Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente – *Smart Grid*, abordando, principalmente, os seguintes aspectos:

- i. o estado da arte de programas do tipo *Smart Grid*, no Brasil e em outros países;
- ii. proposta de adequação das regulamentações e das normas gerais dos serviços públicos de distribuição de energia elétrica;
- iii. identificação de fontes de recursos para financiamento e incentivos à produção de equipamentos no País; e
- iv. regulamentação de novas possibilidades de atuação de acessantes no mercado, o que inclui a possibilidade de usuários operarem tanto como geradores de energia (geração distribuída) quanto consumidores.

2.3.1 Trabalhos sobre REI no Brasil.

Alguns estudos publicados sobre REI no Brasil estão descritos nesta subseção. O primeiro estudo publicado é do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) em 2012 para o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) denominado de “Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional”, com o intuito de subsidiar a inserção do tema REI na política energética no Brasil (SANTOS; CAVALCANTI; DUARTE, 2012).

Santos, Cavalcanti e Duarte (2012) fizeram um comparativo com os países que adotaram ou estavam adotando a automação no setor elétrico e suas motivações. Também analisaram toda a cadeia do setor elétrico, da geração até a distribuição, motivação para o investimento, arcabouço legal entre outros aspectos.

Kagan et al. (2013), no livro “Redes Elétricas Inteligentes no Brasil, Análise de Custos e Benefícios de um Plano Nacional de Implantação para o REI no Brasil”, entre vários aspectos analisados e descritos no livro, ressaltam a questão do MEE ser viável financeiramente devido ao custo e durabilidade.

Prata, Lousada e Masera (2014) desenvolveram um estudo para o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) com *Joint Research Centre (JRC)* europeu, no qual analisaram todos os projetos de REI que foram desenvolvidos no Brasil depois da chamada da ANEEL, além de projetos desenvolvidos na Europa e destacam a Itália.

Algumas empresas que desenvolveram projetos de REI no Brasil estão listadas no relatório “Diálogo Setorial Brasil – União Europeia” (PRATA; LOUSADA; MASERA, 2014). As empresas citadas são a Eletrobrás Amazonas Energia em Parintins, a Light no Rio de Janeiro, a Cemig em Sete Lagoas e a Ampla, atual Enel em Búzios. Destacam-se dois projetos nesse relatório, onde foram implantados MEE com comunicação sem fio e com fio pelas concessionárias Eletrobrás na Amazônia e Ampla em Búzios no Rio de Janeiro. A Eletrobrás na Amazônia usou *interfaces* sem fio de rede em malha para MEE

e transformadores, além de satélite para integração do sistema. A concessionária Ampla usou *interfaces* com fio para conexão entre MEE no seu projeto em Búzios (PRATA; LOUSADA; MASERA, 2014).

Rathmann (2017) apresentou um relatório com o título “Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores Chave do Brasil”. Ele caracterizou as vantagens da REI na redução do efeito estufa no Brasil, integração de fontes renováveis ao sistema de distribuição, aprimoramento da gestão do setor elétrico e na automação de toda a cadeia do setor elétrico brasileiro. Esse relatório foi desenvolvido no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) em conjunto com a Organização das Nações Unidas (ONU) para o meio ambiente .

Lima, Gomes e Maciel (2021) analisaram a experiência alemã, no qual desenvolveram um estudo comparativo entre o Brasil e Alemanha sobre a digitalização do setor elétrico, arcabouço legal e as diferenças entre os países, reforçando que o cliente é o demandante das mudanças, sendo coautor e engajado no processo.

2.3.2 Arcabouço legal

O portal de notícias Tele Síntese entrevistou em dezembro de 2020 três executivos de três concessionárias do setor elétrico. Esses executivos manifestam a necessidade do Governo Federal de compreender melhor o setor elétrico, visto que, faltam políticas públicas para o setor, além de um arcabouço legal que garanta o investimento e o desenvolvimento da REI no Brasil (SÍNTESE, 2020).

No senado brasileiro está tramitando o Projeto de Lei do Senado (PLS) 356/2017 de autoria do Senador Eduardo Braga (AM) sobre REI e mudanças na lei da ANEEL. De acordo com o portal do Senado, a primeira leitura desse projeto de lei ocorreu em 26/09/2017. A PLS foi retirada de pauta em 17/04/2019 pelo relator Senador Paulo Rocha para vista (BRAGA, 2017). Os relatórios, a portaria do MME e do portal do Senado são alguns indicadores sobre REI no Brasil.

2.4 Situação da REI no Mundo

De acordo com a Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency - IEA*), houve uma pequena desaceleração nos investimentos em REI no ano de 2019 em relação a anos anteriores, em contrapartida, ocorreu uma mudança nas soluções tecnológicas usadas, conforme segue:

“Apesar de uma redução anual de 7% nas despesas gerais, as redes se tornaram ainda mais descentralizadas e digitalizadas em 2019. Concessionárias em todo o mundo implantaram tecnologias mais sofisticadas, incluindo inteligência artificial e integração digital. Os reguladores dos EUA parecem estar avançando em direção à regulamentação baseada no desempenho, e a Comissão Europeia lançou o Pacote de Energia Limpa, que inclui uma série de medidas para ajudar as operadoras de rede a implantar tecnologia mais inteligente. No entanto, são necessários mais esforços para implementar regulamentos e estruturas políticas que recompensem os benefícios da digitalização das redes de eletricidade.”

De acordo com a *IEA*, os EUA em 2019 passou a China em investimentos em REI pela primeira vez em 10 anos. Seguindo essa tendência, os investimentos em REI nos EUA subiram 12%, no período de uma década. Esse investimento foi essencialmente na infraestrutura obsoleta, objetivando a digitalização do setor, ajudando na proteção contra desastres naturais e ataques cibernéticos (*IEA*, 2020).

Outros países estão nesse seletor grupo de investidores em REI, que são a Alemanha, França, Reino Unido, Canadá, Coreia do Sul, Itália entre outros. A Itália é o primeiro país a implantar aproximadamente 30 milhões de pontos de MEE, cobrindo quase 90% do território italiano. Além da Itália, a Noruega, Suécia, Finlândia e Dinamarca são os países que têm mais de 50% de MEE implantados em seu território (*GIGLIOLI; PANZACCHI; SENNI*, 2010).

Em relação a Itália, a empresa italiana Enel no período 2016 a 2019 instalou 38 milhões de medidores, além de 30 milhões de novos medidores nesse mesmo período. Em relação ao Brasil, a Enel Brasil informa a instalação de 300 mil medidores de energia na cidade de São Paulo, produzidos no Brasil. Essas informações estão disponíveis nos portais da empresa na Itália e no Brasil.

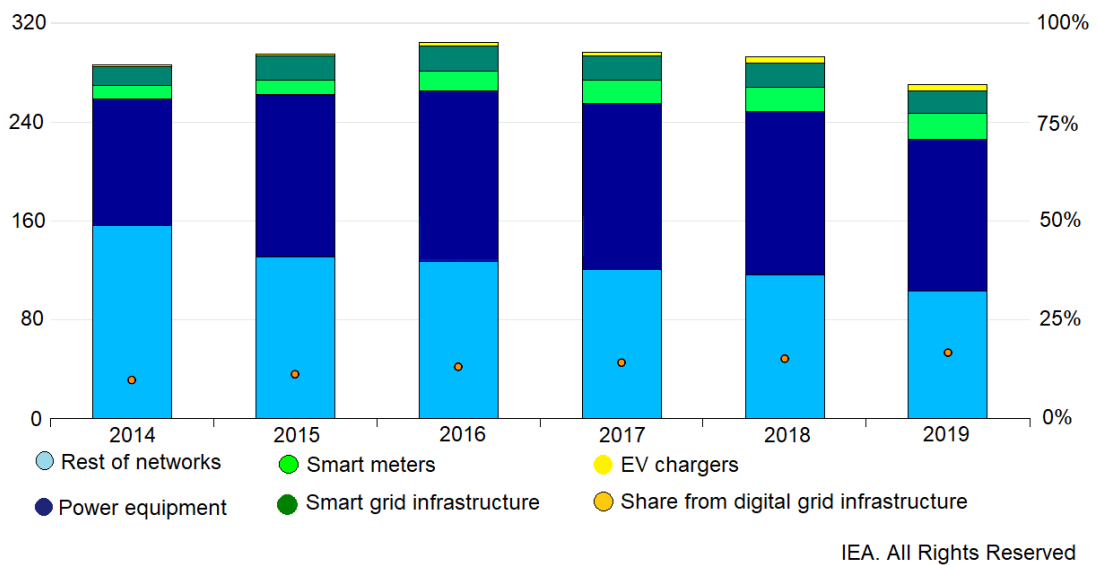
As Figuras 1 e 2, a partir da informação disponibilizada no portal da *IEA*, apresentam a evolução dos investimentos do setor elétrico e os países que mais investiram entre os anos de 2014 a 2019. Na Figura 1, o ano de 2016 foi o de maior nível de investimento do setor elétrico em seis áreas distintas sendo de aproximadamente US\$305 bilhões. No ano de 2016 ocorreu uma elevação no investimento em MEE e na infraestrutura de US\$ 37 bilhões.

O investimento em REI por países está indicado na Figura 2, tendo o EUA como maior investidor individual em REI, seguido pelo Japão. Em terceiro aparece a União Europeia, mas sem destacar quais foram os países que mais investiram em REI, ficando em destaque a França e Alemanha em quarto lugar, Reino Unido em quinto lugar e a

Itália e Noruega em sexto lugar. Aparecem o Canadá e a Coreia do Sul, mas não aparece a presença da China no ano de 2019.

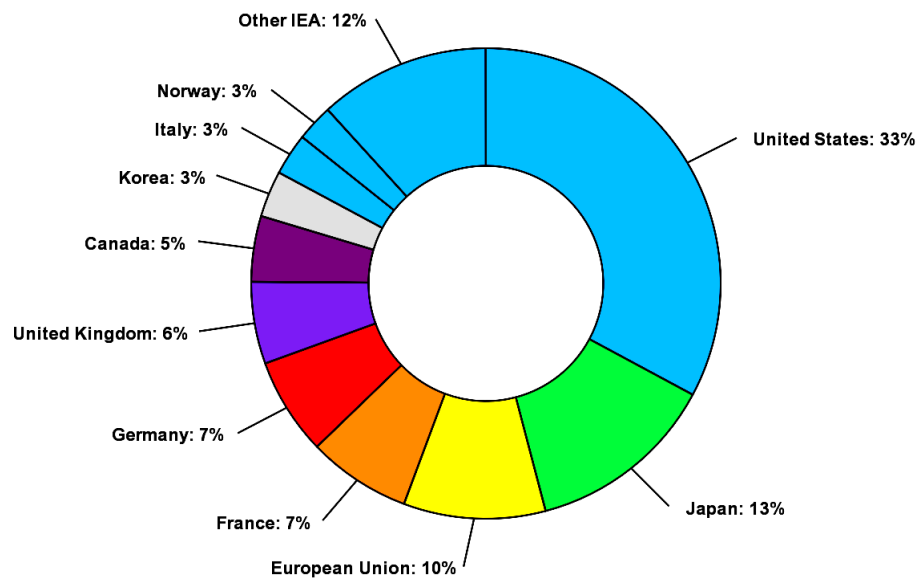
No ano 2018 foram investidos US\$40 bilhões em MEE e na infraestrutura de REI no mundo. No ano de 2019 foram investidos em MEE e em REI aproximadamente US\$39 bilhões (IEA, 2020). A IEA, no seu portal, ainda apresenta alguns relatórios com dados mais detalhados sobre REI, além de outras fontes de energia, tais como, gás, hidrogênio, carvão, petróleo e fontes alternativas de energia.

Figura 1 – Investimento anual do setor elétrico



Fonte: IEA 2020

Figura 2 – Investimento por país em 2019



Fonte: IEA 2020

2.5 Tecnologias de Comunicação para MEE

A escolha de uma tecnologia de comunicação para última milha pode ser determinada pela tecnologia mais adequada para a aplicação (LAVERTY et al., 2010). Como exemplo, a empresa Eletrobrás Amazonas Energia usou em seu projeto de REI em Parintins no estado do Amazonas a tecnologia sem fio em malha e satélite para fazer a conexão de última milha com os consumidores e na automação de transformadores (PRATA; LOUSADA; MASERA, 2014).

A tecnologia da última milha é muito importante para a implementação de uma REI. Relativo à última milha, há uma discussão aberta sobre as tecnologias de comunicação mais adequadas (SRIVILAS; PIRAK, 2021). Amoroso (2020) analisou as principais redes sem fio, sub-1GHz, *WiFi* e *ZigBee*, realizando um comparativo através de análises técnica e econômica das redes, visando eleger a melhor solução para um controle e gerenciamento de demanda dentro de uma *Smart Home*.

Santos (2018), no que concerne ao consumidor, apresentou algumas pesquisas que sugerem que o *feedback* direto possibilitado pelos MEE, pode constituir um importante instrumento de incentivo à adoção de práticas mais sustentáveis e de consumo energético mais consciente, além de amparadas por teorias como a do deficit da informação.

Em caso de falhas devidas a fluxo inverso de energia ou aumento de tensão ou qualquer outra causa, através da comunicação das redes de sensores sem fio será possível desconectar um conversor ou inversor eletrônicos das unidades geradoras distribuídas (ANITA; RAINA, 2019).

Além disso, alguns fabricantes de MEE oferecem uma ou mais de uma solução de conexão de última milha para a concessionária. As tecnologias oferecidas para conexão para última milha não são de uso exclusivo para o MEE, visto que, podem ser usadas em outras aplicações (LAVERTY et al., 2010) e (USTUN; HUSSAIN, 2019).

Por exemplo, a *Landis + Gyr* disponibiliza alguns tipos de *interface* de comunicação para o MEE que são *General Packet Radio Service - (GPRS)*, comunicação através dos cabos elétricos do inglês *Power Line Communication - (PLC)*, *Wireless M-Bus* na zona do Euro e *ZigBee Alliance* que é uma variação do *IEEE Std. 802.15.4*. A *Landis + Gyr* também faz parte da *Wi-SUN Alliance* como membro promotor do inglês *Promoter Members*.

Nos EUA ainda é usada à comunicação via linha telefônica comutada para a comunicação entre o MEE e a concessionária, de acordo com o escopo da norma *ANSI C12.21-2006(R2016)*:

Especificação de protocolo para comunicação de modem de telefone. Detalha os critérios necessários para comunicações entre um dispositivo C12.21 e um cliente C12.21 por meio de um modem conectado à rede telefônica comutada. O cliente C12.21 pode ser um dispositivo de comunicação eletrônica.

2.6 Tecnologia ZigBee

O padrão de comunicação *ZigBee* foi usado em alguns projetos de REI no Brasil para conexão de última milha com o MEE (PRATA; LOUSADA; MASERA, 2014). O *ZigBee* foi desenvolvida a partir do padrão *IEEE Std. 802.15.4* e opera na faixa de frequência *Industrial, Scientific and Medical Frequencies (ISM)* de 915MHz.

O padrão *ZigBee* e o *IEEE Std. 802.15.4* operam com baixa taxa de transferência de dados, em comparação com o *WiFi*, variando entre 0,3 kbits/s até 270 kbits/s, tem baixo custo, com baixo consumo de energia, podendo operar com bateria e, sendo usada por alguns fabricantes de medidores de energia, tais como, a *Itron*, *Honeywell* e *Landis + Gyr*, (GUNGOR et al., 2011), (FAN et al., 2011), (KHALIFA; NAIK; NAYAK, 2011), (CRAEMER; DECONINCK, 2010).

O *ZigBee* é um conjunto dispositivo eletrônico e protocolo desenvolvido a partir do padrão *IEEE Std. 802.15.4:2006*. O modelo de camadas do *ZigBee* não segue o modelo de camadas *Open System Interconnection (OSI)*, mas compartilha as camadas 1 e 2 do padrão *IEEE Std. 802.15.4:2006*. As camadas *OSI* 1 e 2 correspondem a camada física que é o rádio e a camada de enlace que corresponde ao *media access control address (MAC address)* e estão indicados na Figura 3. O *ZigBee* opera nas faixas de frequência *ISM* sub-1GHz e 2,4GHz (ALLIANCE, 2003).

Figura 3 – Camadas *ZigBee*

ZigBee Camadas	
L6	Aplicação
L5	Interface de aplicação
L4	Camada de segurança
L3	Camada de rede
L2	802.15.4 MAC
L1	802.15.4 Rádio

Fonte: Adaptado da norma *ZigBee Alliance 802.15.4:2020*

O *ZigBee* pode operar usando três técnicas de configuração da rede, que são malha, do inglês (*mesh*), estrela, do inglês (*star*) e em árvore, do inglês (*tree*), com até 65000 nós, sendo que um nó de rede corresponde à conexão de um dispositivo na rede, neste caso, o MEE (KINNEY, 1997). A operação da rede em malha está na Seção 2.8.

2.7 Tecnologia Wi-SUN

Em 2012, foi constituída uma aliança entre fabricantes e usuários do MEE chamada *Wi-SUN Alliance* ou *Wireless Smart Metering Utility Networks*, com o propósito de de-

envolver um padrão de comunicação para ser usado em MEE e *IoT*. A aliança foi fundada após o padrão *IEEE Std. 802.15.4g:2012* ser publicado (802.15.4G, 2012).

Wi-SUN foi identificado através de portais de fabricantes de medidores modernos para gás, água e energia elétrica e, através da concessionária Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), que também faz parte do *Wi-SUN Alliance* como membro adotante, do inglês *Adopter Members*. Posteriormente, o nome do *Wi-SUN* foi alterado para *Wireless Smart Ubiquitous Networks*, que corresponde a redes ubíquas inteligentes sem fio para diversas aplicações (WISUN, 2012).

Wi-SUN Alliance tem a seguinte proposta:

“*Wi-SUN* permite que vários aplicativos operem com recursos de rede compartilhados, fornecendo monitoramento e controle de um sistema utilitário. Os dispositivos *Wi-SUN* são projetados para operar em redes sem fio de baixa potência, em grande escala de aplicações e, muitas vezes exigem o uso da máxima potência de RF disponível, sob os regulamentos aplicáveis, a fim de fornecer conexões ponto a ponto de longo alcance.”

Os recursos da rede *Wi-SUN* e da rede *ZigBee* são similares, visto que usam a mesma base como referência, que é a norma *IEEE Std. 802.15.4g* (2012). As configurações também variam de acordo com o tamanho da rede e da necessidade da concessionária, desde que limitados aos 65000 nós ou MEE.

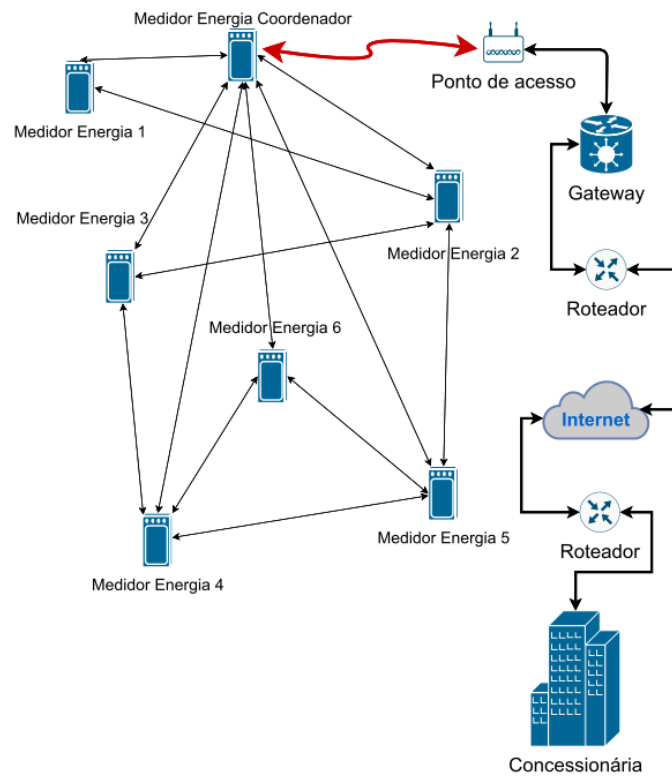
2.8 Operação da Rede em Malha

Malandra e Sanso (2017) indicam que a configuração mais robusta para ser usada em um sistema com MEE, com a melhor relação custo-benefício e pronta para ser usada com milhares de nós é a configuração em malha.

A configuração em malha, utilizada pelos padrões *ZigBee* e *Wi-SUN* e em redes para MEE, está descrita no padrão *IEEE Std. 802.15.4g* (2012). Sucintamente, a rede em malha pode operar da seguinte forma: um MEE faz a conexão com o ponto de acesso e, esse mesmo MEE pode fazer a função de ponte com um ou um grupo de outros MEE próximos.

No exemplo da Figura 4, um MEE pode “conversar” com outro medidor, sendo que apenas um MEE faz a conexão com o ponto de acesso. As conexões entre medidores são chamadas de salto, do inglês *HOP*, que é a conexão entre um MEE e outro, sem a necessidade de passar pelo ponto de acesso. Essa conexão é definida pela *IETF RFC 6130* e descrita por Clausen, Dearlove e Dean (2011) da seguinte forma: um vizinho ou 1 salto de um nó para qualquer outro nó pode ser alcançado diretamente. O MEE Coordenador, indicado na Figura 4, é definido durante a implantação do sistema, não sendo um equipamento fabricado exclusivamente para essa finalidade (IEEE2011, 2011).

Figura 4 – Exemplo da Configuração em Malha (1)



Fonte: Adaptado da norma *IEEE Std. 802.15.4:2020* e da Cisco (2017)

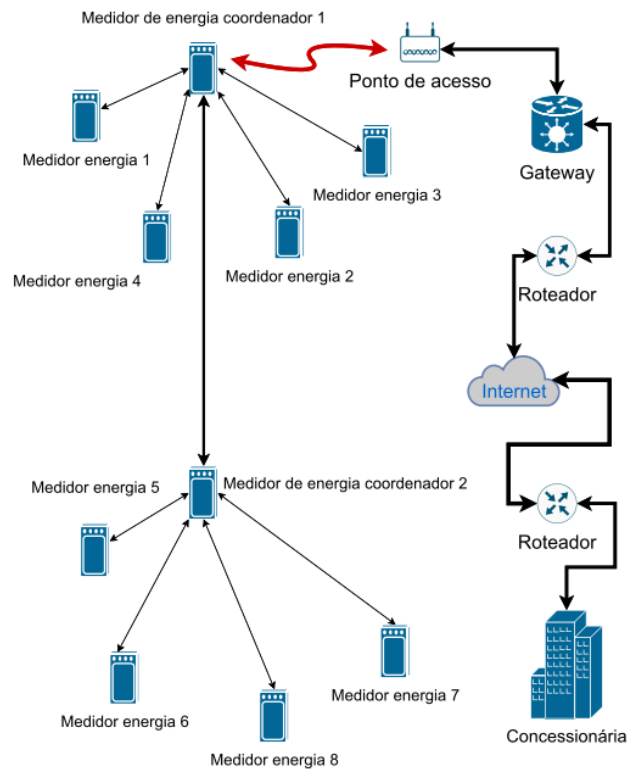
No exemplo da Figura 5, são usados dois MEE como coordenadores da rede, sendo que o MEE coordenador 1 faz conexão com o ponto de acesso e também faz conexão com o MEE coordenador 2 para aumentar a capilaridade da rede. Nesse ponto, a rede pode operar na configuração estrela ou malha, igual a Figura 4. O MEE coordenador 2 pode fazer uma conexão apenas com o coordenador 1, mas também pode fazer a conexão com o ponto de acesso.

A quantidade de pontos de acesso necessários para a implantação de uma rede para MEE não é definida em norma ou um padrão estabelecido. A concessionária possivelmente define a quantidade de pontos de acesso necessários por estudos de campo ou experiência adquirida em projetos executados pela própria concessionária.

A conexão entre uma rede de MEE e a concessionária pode ser efetuada pela internet. A conexão entre o ponto de acesso dos MEE com a internet, indicada nas Figuras 4 e 5, foi adaptada de um exemplo proposto por um fabricante de equipamentos para rede de computadores (CISCO, 2017).

O conceito de rede em malha foi alterado recentemente na versão atualizada da norma *IEEE Std. 802.15.4 (2020)*, apresentando apenas dois tipos de configuração de rede que são a estrela, do inglês *star* e a ponto-a-ponto, do inglês *peer-to-peer*, deixando de aparecer o termo rede em malha. Na página 45, do padrão *IEEE 802.15.4:2020*, a nova configuração da rede ponto-a-ponto é apresentada na Figura 5-1.

Figura 5 – Exemplo da Configuração em Malha (2)



Fonte: Adaptado da norma *IEEE Std. 802.15.4:2020* e da Cisco (2017)

2.9 Comparativo *Wi-SUN* e *ZigBee*

Nesta subseção apresenta-se um comparativo apenas em camadas abstraídas do modelo *Open Systems Interconnection - (OSI Model)* entre o *Wi-SUN* e *ZigBee* (UNION, 1994). O modelo *OSI* é um modelo que descreve, em camadas, as funções da estrutura de um sistema de comunicação, sem levar consideração as tecnologias internas subjacentes ao sistema e conjuntos de protocolos específicos (UNION, 1994).

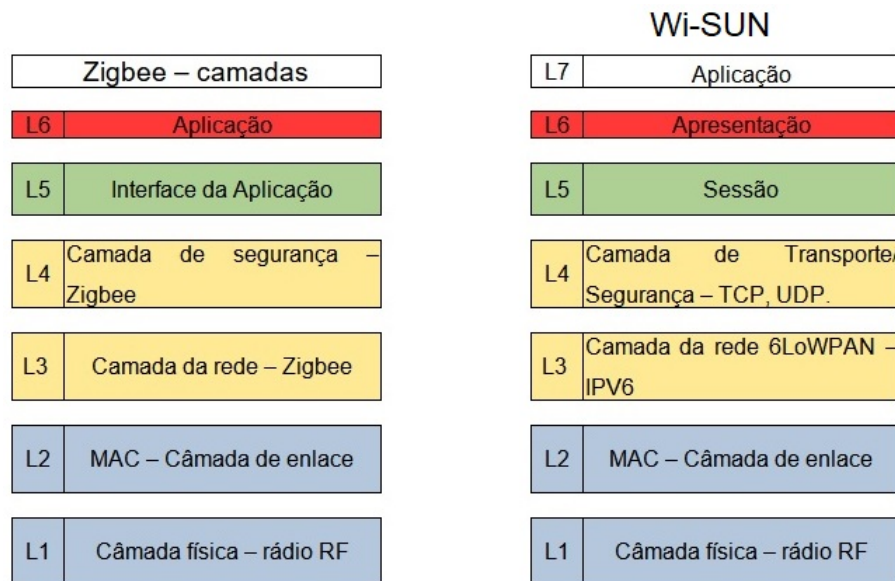
Visto que as duas tecnologias usam a mesma base de rádio, independente do fabricante do *hardware*, e tenham possivelmente desempenho similar nas camadas *OSI* 1 e 2, as diferenças entre as duas tecnologias ocorrem a partir da 3ª camada *OSI*¹. A Figura 6 apresenta um quadro comparativo entre as camadas do *ZigBee* e do *Wi-SUN*. O padrão *ZigBee* está dividido em 6 camadas, ao invés das 7 camadas no padrão *Wi-SUN*.

No padrão *ZigBee* as camadas 3 e 4 são as camadas de rede e de segurança, nas camadas 5 e 6 são as camadas de *interface* e de aplicação, como por exemplo, na camada de aplicação pode ser o protocolo *Device Language Message Specification / Companion Specification for Energy Metering (DLMS / COSEN)*, podendo ser também Sistema Brasileiro

¹ O estudo e análise mais aprimorada de todas as camadas *ZigBee* e *OSI* está fora do escopo deste trabalho, ficando restrito a análise da propagação do sinal de RF, que corresponde a camada física que é a 1ª camada *OSI*

de Medição Avançado (SiBMA) ou ANSI C.12.

Figura 6 – Comparativo entre Camadas Zigbee e Wi-SUN



Fonte: Adaptado do padrão *Zigbee Alliance* e *OSI*

O Wi-SUN segue o modelo *OSI* completo com 7 camadas. A camada 3 é a camada de rede, usada pelo protocolo *IPv6* para dispositivos embarcados ou *6LoWPAN*, a camada 4 é camada de transporte, que pode ser o *Transmission Control Protocol (TCP)* ou *User Datagram Protocol (UDP)*, que faz parte da estrutura do *IPv6*. A camada 5 é a sessão que estabelece a conexão entre duas estações, na camada 6 estão a autenticação e segurança, como por exemplo, o *Secure Socket Layer (SSL)* e a camada 7 é a camada de aplicação, que pode ser o *Hypertext Transfer Protocol (HTTP)*, (*DLMS / COSEN*), (*SiBMA*) ou *ANSI C.12*. Analisando das camadas *OSI* das duas tecnologias é possível abstrair que são incompatíveis a partir da 3ª camada, embora compartilhem as duas camadas iniciais e operam nas mesmas frequências. Embora sejam essas são as diferenças básicas entre as duas tecnologias, ambas são usadas na comunicação de MEE e em dispositivos IoT.

Capítulo 3

Contextualização Técnica / Experimental

Neste capítulo contextualizou-se o método e as métricas para verificar experimentalmente o comportamento do sinal RF de acordo com o modelo teórico e em alguns modelos de medição de campo adequados para a comunicação sem fio na frequência de 915MHz.

3.1 Considerações sobre o Sinal de RF

Uma comunicação sem fio em ambiente externo pode ser afetada por alguns tipos de obstáculos que são naturais ou construídos pelo homem. Os obstáculos naturais são morros, árvores e a variação do relevo, os obstáculos construídos pelo homem são edificações com um ou múltiplos pavimentos, veículos de diversos tamanhos, largura de vias entre outros (COUCH, 1993). Por fim, a comunicação também pode ser afetada por refração atmosférica e interferência espacial (SKLAR, 1988).

A refração atmosférica é um tipo de desvanecimento que afeta mais a comunicação entre as faixas de baixa frequência extrema, do inglês *extremely low frequency (ELF)*, até alta frequência, do inglês *high frequency (HF)* e menos na faixa da ultra alta frequência, do inglês *ultra high frequency (UHF)*. A interferência espacial pode afetar as comunicações terrestres, embora comprometa mais o seguimento da comunicação espacial (STUBER, 2017). A faixa de frequência *ISM 915MHz*, que é o objeto deste estudo, opera na faixa de *UHF*, sendo mais afetada pelos obstáculos naturais e obstáculos construídos pelo homem.

3.2 Desvanecimento do Sinal de RF

O desvanecimento é um efeito que ocorre sobre a propagação do sinal de RF. Existem dois tipos de desvanecimento que são o plano e o seletivo em frequência. O desvanecimento plano é o efeito mais aproximado que pode ser adotado para uma rede sem fio de MEE, que são a obstrução (edificações e veículos), absorção (chuva) e atenuação por divergência ou convergência (MIYOSHI; SANCHES, 2008).

Dispositivos ou redes sem fio que operam na faixa de 915MHz com transmissão omnidirecional podem funcionar tanto com visada direta ou sem visada direta. A obstrução nesse caso pode ser pela posição do medidor, por edificações adjacentes de diversas alturas, larguras das vias e movimentos de veículos de diferentes tamanhos, que podem comprometer o desempenho da rede, causando o efeito do desvanecimento (DURGIN; RAPPAPORT, 2000), (BULTITUDE; BEDAL, 1989).

3.3 Atenuação do Sinal de RF

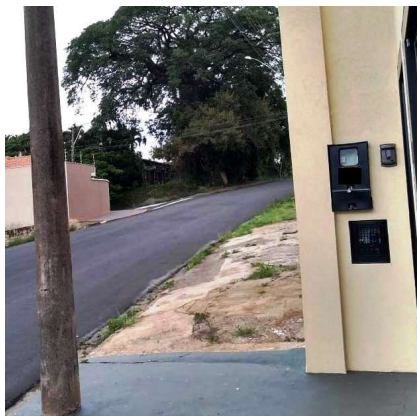
A atenuação do sinal de RF realiza em função de uma redução da potência entre estações, no caso, entre o ponto de acesso e o MEE. Em sistemas de comunicação sem visada direta, similar ao que ocorre na rede WiFi, o espalhamento do sinal de RF pode ser visto como uma forma de atenuação, já que o meio reduz a intensidade do sinal de RF que chega na recepção dos rádios. A partir disso, adiciona-se a atenuação sobre o sinal de RF do MEE em função do tipo do padrão de entrada, do local e da instalação da antena, além da altura e da posição do padrão.

Na Figura 7, o padrão de entrada em caixa metálica está perpendicular a via e acima da altura sugerida pela concessionária. Na Figura 8, como exemplo, um ponto de acesso para comunicação sem fio foi instalado próximo a via pública e em poste da concessionária¹. A característica do padrão de entrada e do local do ponto de acesso pode eventualmente comprometer o alcance da comunicação.

Na proximidade onde foi desenvolvido este trabalho, foi observado que o padrão de entrada mais usado em edificações antigas é o modelo em caixa metálica, similar a Figura 7, além disso, a instalação do padrão não é uniforme em altura e posição, eventualmente comprometendo o alcance da comunicação.

¹ O ponto de acesso *WiFi* pública

Figura 7 – Padrão de entrada



Fonte: autor

A partir dessa observação, analisou-se duas situações iniciais, no qual o padrão de entrada está posicionado perpendicularmente e frontalmente a via. Uma terceira situação verificada é o ponto de acesso posicionado atrás do MEE. O local de fixação do padrão de entrada e a espessura da alvenaria podem eventualmente comprometer o alcance da comunicação entre o MEE e o ponto de acesso. O centro da janela de leitura foi usado como um possível caminho para o sinal de RF passar, dessa maneira, a altura de 1,8m da Figura 7 corresponde ao centro da janela.

Nas Figuras 9 e 10 estão os dois exemplos. No exemplo da Figura 9, supondo que o ponto de acesso esteja instalado no poste ao lado do padrão de entrada, o ângulo de visada é mais fechado com a possibilidade de ocorrer uma atenuação do sinal de RF maior para a altura de 1,8m do que a 91cm frontal ao poste. Se a janela de leitura for um possível caminho para a passagem do sinal de RF, mesmo com um ângulo de visada mais fechado, a comunicação do MEE instalado na altura de 91cm pode eventualmente funcionar melhor do que na altura de 1,8m.

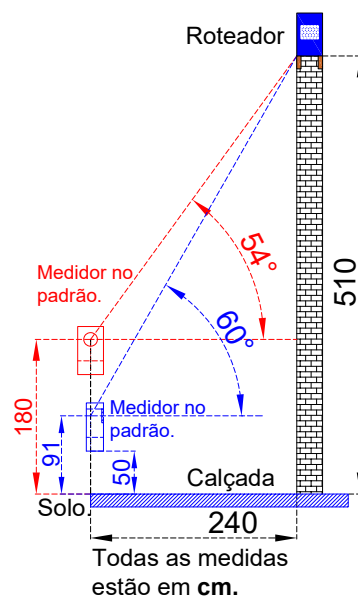
Figura 8 – Antena instalada no poste (08/2021)



Fonte: autor

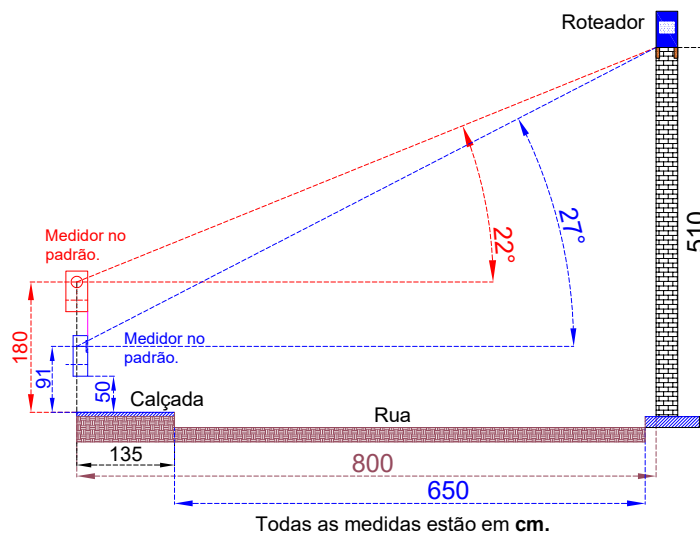
No exemplo da Figura 10, o ângulo de visada é maior, podendo ajudar na comunicação entre o MEE e o ponto de acesso para as duas alturas e posições dos padrões de entrada, talvez atenuando mais para 1,8m de altura do que a 0,91m de altura. O padrão a 1,8m, indicado na Figura 10, está perpendicular a rua, enquanto o padrão de 91cm de altura está frontal a rua. Nos dois casos o ângulo de visada é mais aberto e talvez colabore com a conexão, entretanto, a comunicação do MEE na altura de 0,91m pode ser mais afetada devido a obstrução eventual do sinal de RF por veículos e outros tipos de obstáculos. As medidas de campo estão na Seção 4.7 e usou-se a posição perpendicular a via neste trabalho.

Figura 9 – Posição do padrão e ponto de acesso - 1º exemplo



Fonte: autor - escala 1:10

Figura 10 – Posição do padrão e ponto de acesso - 2º exemplo



Fonte: autor - escala 1:10

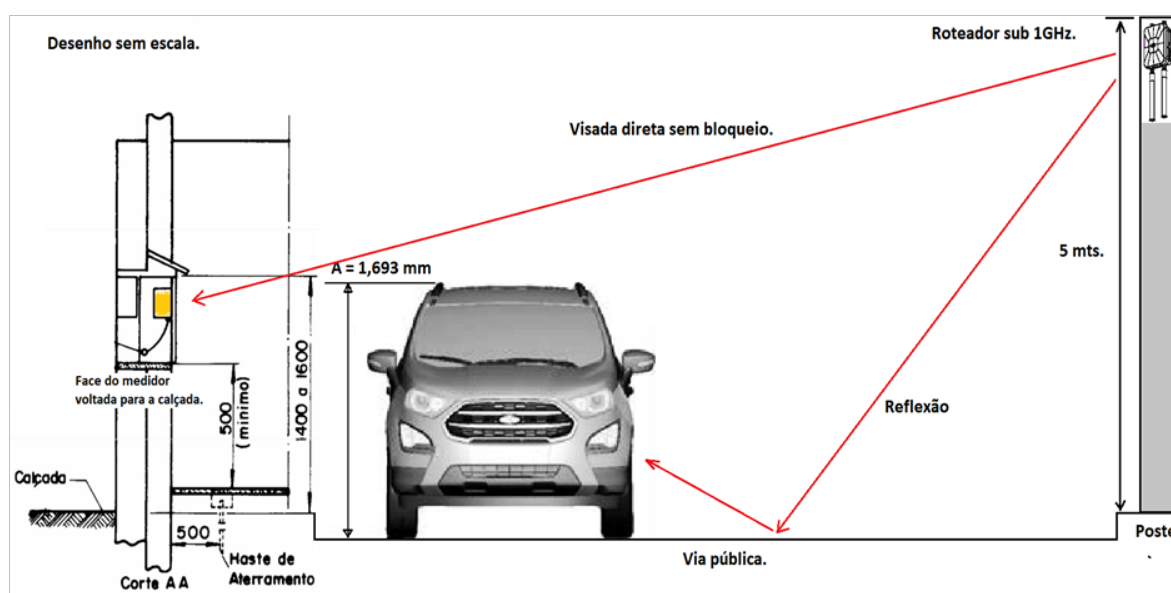
A altura de 1,8m, indicado nas Figuras 9 e 10, foi um valor medido em campo a partir do padrão de entrada da Figura 7. A altura de 91cm corresponde a altura do centro da janela do padrão de entrada também medido em campo e baseado no desenho da Figura 11 (FERREIRA, 2009).

A posição e altura do padrão de entrada estão definidas na instrução nº 13, Versão 2.25 de dezembro de 2020 da CPFL. A altura do padrão de entrada em concreto varia entre 1,4m a 1,7m de altura a partir do nível da calçada para padrão de entrada com um único medidor. No padrão de entrada com dois medidores, não foi identificado no documento da concessionária o dimensional para dois medidores, ficando apenas a indicação da existência (BUENO, 2020).

3.4 Obstrução do Sinal de RF

No exemplo da Figura 11 o padrão de entrada está voltado para a via pública e instalado a partir de 0,5 m do solo. A Figura 11 foi adaptada do documento da concessionária CPFL (FERREIRA, 2009).

Figura 11 – Obstrução do sinal de RF



Fonte: Adaptado do documento da CPFL (OLIVEIRA et al., 2021)

Supondo que o ponto de acesso esteja instalado no poste no outro lado da via, neste exemplo, a comunicação é uma visada direta. Um veículo qualquer que esteja passando na via, como da Figura 11, pode eventualmente fazer com que o sinal de RF varie, podendo ocasionar uma perda de sincronismo temporária entre o MEE e o ponto de acesso.

A variação do sinal de RF gerada a partir da passagem de um veículo entre o MEE e o ponto de acesso é um tipo de desvanecimento, nesse caso, por obstrução (OLIVEIRA et al., 2021). Caso ocorra a perda de comunicação por obstrução ou atenuação do sinal

de RF, o sistema *Advanced Metering Infrastructure* - (AMI) e *Automatic Meter Reading* - (AMR) podem restabelecer a comunicação da rede do MEE com a concessionária.

3.5 Método para Caracterização do Sinal de RF

Os primeiros métodos foram de Ossanna (1964), Clarke (1968), Okumura (1968) e Hata (1980). Eles desenvolveram os seus trabalhos efetuando medições em campo para caracterizar a propagação do sinal de RF em algumas faixas de frequência, incluindo a faixa de frequência em 900MHz.

O estudo de Clarke (1968) foi efetuado a partir de medições feitas em campo, entre uma estação fixa e um veículo como estação móvel na faixa de 900MHz, a partir de um trajeto pré-determinado entre ruas com vários tipos de edificações. Okumura desenvolveu um modelo prático para verificar a propagação do sinal de RF em alguns ambientes aberto na faixa de 900MHz. O modelo desenvolvido por Okumura faz parte da recomendação da *ITU*, conhecida como *Recommendation ITU-R P370 (VHF and UHF Propagation Curves for the Frequency Range from 30MHz to 1000MHz)* (ITU, 1995).

A partir do método desenvolvido por Okumura, Masaharu Hata desenvolveu um modelo matemático computacional complementar. Embora seja um modelo empírico para predição do sinal de RF, esse modelo é mais abrangente que o método original e é conhecido na literatura por Okumura-Hata. O modelo de Okumura (1968) - Hata (1980) é usado para estimar a atenuação do sinal de RF em áreas urbanas e também em áreas rurais.

Bultitude e Bedal desenvolveram um estudo similar ao de Clarke (1968) na cidade de Ottawa em 1989 no Canadá. Bultitude e Bedal (1989) usaram rádios digitais e instalaram algumas antenas em postes de iluminação com diferentes alturas acima do solo. Os rádios usados neste trabalho tem as mesmas características dos rádios usados pelo autores, que é a técnica de modulação *BPSK* e portadora em 910MHz.

Rappaport e McGillem (1989) desenvolveram um estudo sobre desvanecimento do sinal de RF na mesma faixa de frequência, para aplicação *indoor* em diferentes ambientes industriais, verificando o desempenho de um sistema de comunicação sem fio na faixa de 900MHz.

Pesquisadores na Dinamarca e da Suécia também desenvolveram trabalhos de propagação do sinal de RF para microcélulas de telefonia celular. Mogensen et al. (1991), na Dinamarca, desenvolveram o seu estudo de propagação do sinal de RF na faixa de 955MHz e 1845MHz e, Berg, Bownds e Lotse (1992) da Suécia, desenvolveram o estudo na faixa de 870MHz.

Embora não haja um método aplicado e específico para uma rede sem fio de MEE na faixa de 915MHz, eventualmente todos os trabalhos podem ser aplicados. Devido a

similaridade tecnológica, o método de campo de Bultitude e Bedal (1989) é o mais próximo de uma instalação de uma rede de MEE, inclusive pela frequência adotada.

3.6 Método IEEE Std. 802.15.4

Nesse trabalho foi adotado o modelo descrito no padrão *IEEE Std. 802.15.4:2006* (IEEE, 2006) e no documento *IEEE 802.15 Working Group for Wireless PAN:2010* (IEEE, 2010) para as caracterizações do sinal de RF da rede sem fio, com o objetivo na uniformidade da informação e dos resultados obtidos, visto que, os padrões usados nos EUA são os mesmos usados Brasil (FCC, 2020) e (IEEE, 2006).

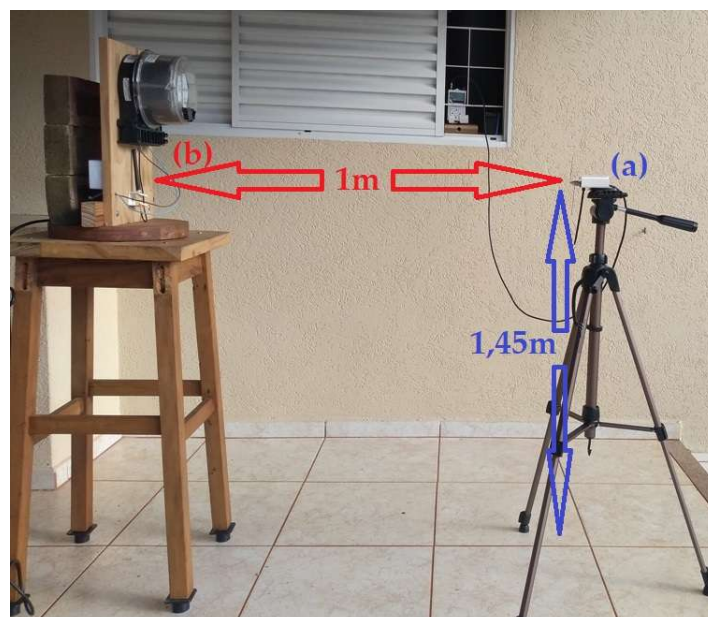
3.7 Experimento em Bancada

O experimento em bancada foi desenvolvido a partir do método descrito por Pahlavan e Levesque (1995), com o modelo P802.15 (2010) para estimar a atenuação do sinal de RF entre uma estação transmissora e receptora. O experimento em bancada foi dividido em duas partes, sendo a primeira feita sem o padrão de entrada e o segundo com o padrão.

Para os experimentos, foi montada uma mesa giratória, apresentada na Figura 12, para ajudar nas medidas sem a necessidade de movimentar todos dispositivos, incluindo o analisador de espectro, sempre mantendo a distância horizontal e vertical.

A antena dipolo foi montada para efetuar as medições com o analisador de espectro. As medidas foram feitas nas posições de 45° , 90° e 180° e, as antenas da placa *TI* e do analisador de espectro foram polarizadas verticalmente.

Figura 12 – *Setup* do ensaio



Fonte: autor

A Figura 12 apresenta o *setup* usado para as medidas de bancada descrita na Seção 4.2.2 e o resultado das medidas na Seção 4.5, com o propósito de ficar mais próximo do ambiente de campo. As indicações na Figura 12 são: a) antena de 3dBi e o MEE montado na estrutura giratória; b) antena dipolo montada no tripé.

A distância inicial entre o transmissor e o receptor foi de 1m e a altura ficou em 1,45m a partir da posição da antena, tanto no padrão de entrada como no suporte da Figura 12 (PAHLAVAN; LEVESQUE, 1995). A antena transmissora e a antena do analisador de espectro devem estar alinhadas horizontalmente e verticalmente, mesmo se antena do MEE estiver coberta pelo padrão de entrada de caixa metálica.

Os autores também propõem um método reduzido para relacionar a potência do sinal recebido no receptor com a distância do transmissor, conforme indicado na Equação (1):

$$P_r = P_o/d^\alpha \quad (1)$$

onde: P_r é a potência no receptor, P_o é a potência do transmissor e d é o gradiente da distância pela potência entre o receptor e o transmissor. Para o espaço livre é indicado $\alpha = 2$, para áreas urbanas estima-se $\alpha = 4$, dependendo da densidade física da cidade e, convertendo a equação anterior para o formato em decibel, tem-se a Equação (2):

$$10\log P_r = 10\log P_o - 10 * \alpha * \log(d) \quad (2)$$

Nas primeiras medidas houve uma diferença entre a estimativa calculada para a atenuação do sinal de RF, com as medidas efetuadas com o analisador de espectro como esperado, devido a simplicidade do modelo. Assim, após uma nova revisão bibliográfica, identificou-se o documento no portal *IEEE - SA Standards Association* chamado *Coexistence analysis of IEEE Std 802.15.4 with other IEEE Standards and proposed standards 2010* (P802.15, 2010).

No item *3.3 Path loss model*, do P802.15 (2010), são apresentados dois modelos matemáticos para estimar a atenuação do sinal de RF de uma rede sem fio na faixa de 900MHz. Esses modelos definem dois métodos distintos para distância inferior a 8m e para distância superior a 8m.

$$pl(d) = 31,53 + 20\log_{10}(d), d \leq 8m \quad (3)$$

$$pl(d) = 52,02 + 33\log_{10}(d/8), d \geq 8m \quad (4)$$

A Equação (3) é aplicada para distância até 8m e a Equação (4) para distância acima de 8m, da seguinte forma:

(1)= *path loss* - (*pl*) para distância de 1m em dB;

γ_1 = *path loss*: expoente para distância de 1m, $\gamma_1 = 2,0$;

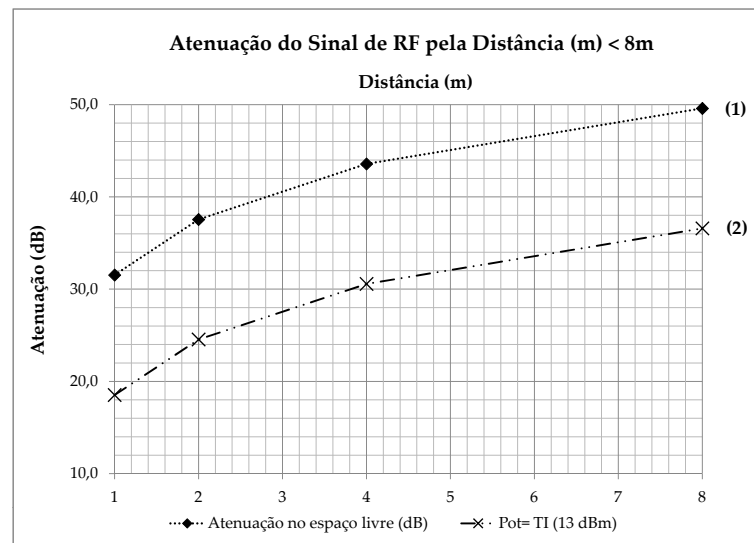
γ_8 = *path loss*: expoente para distância acima de 8m, $\gamma_8 = 3,3$;

Condição inicial: $pl(1) = 10\gamma_1\log_{10}(4\pi f/c)$ onde:

$\gamma_1 = 2$, $f = 900$ MHz e $c =$ velocidade da luz $= 2,99.10^8 \text{ ms}^{-1}$
 sendo: $pl(1\text{m}) = 31,53$ e $pl(8\text{m}) = 52,02$

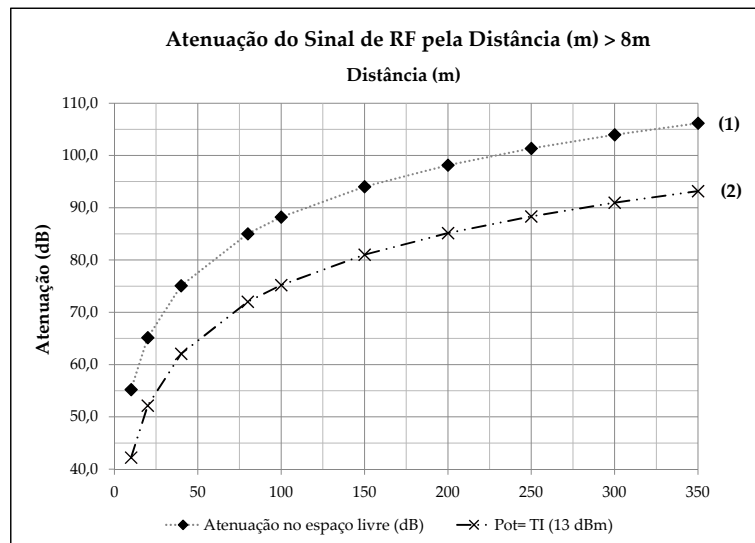
Nas Figuras 13 e 14 estão as curvas para estimar a relação da atenuação do sinal de RF pela distância a partir das Equações (3) e (4). Na Figura 13 estão os valores calculados para atenuação estimada do sinal de RF para a distância até 8m. Na Figura 14 estão valores calculados para atenuação estimada do sinal de RF da placa *TI* para distâncias acima de 8m. Usando como referência a curva (1) da Figura 14, para a distância de 100 metros, a atenuação é de aproximadamente 85,8dB.

Figura 13 – *Path loss* para $d < 8\text{m}$



Fonte: autor

Para a placa da *TI*, com potência de 10dBm e, aplicando a curva (2) da Figura 14 para a mesma distância, a simulação da estimativa do sinal de RF na saída atenuada é de -72dBm, que é o nível do sinal chegando no receptor do outro rádio. A sensibilidade do bloco receptor da placa da *TI* é de -103dBm, indicando que possivelmente a placa terá condições de reconhecer a informação recebida, independente da taxa de dados usada.

Figura 14 – Path loss para $d > 8m$ 

Fonte: autor

Para a simulação foram usados os seguintes parâmetros: antena de 3dBi e potência de saída de 10dBm, configuração aplicada nos ensaios com a placa CC1352P-2.

3.7.1 Cálculo de estimativa da sensibilidade do receptor

O alcance da transmissão está relacionada a potência do sinal transmitido, com o meio, com as reflexões do sinal de RF, com diversos tipos de interferências encontradas no caminho, posição e ganho da antena, além da qualidade do receptor do rádio que está recebendo a informação.

Nesse método adota-se o uso do *forward error correction* - (*FEC*), inserindo redundância e assim diminuindo os erros na recepção em um canal de comunicação digital sem ou com ruído (SHANNON; HAMMING, 1950).

O *FEC* usado pelo padrão *IEEE 802.15.4g:2012* (802.15.4G, 2012) está descrito na Seção 18.1.2.4 *Forward error correction* - (*FEC*) da seguinte forma:

O *FEC* é opcional. Se o *start-of-frame delimiter* (*SFD*) indica que o *FEC* é utilizado, como descrito na Tabela 131, então o *FEC* é aplicado ao *physical layers header* (*PHR*) e o *physical layer service data unit* (*PSDU*) como um único bloco de dados.

Dois tipos de *FEC* podem ser aplicados: um código recursivo e sistemático (*RSC*) ou um código não recursivo e não-sistemático (*NRNSC*). A utilização do código *RSC* ou *NRNSC* será controlada pelo atributo *physical personal area network* (*PAN*) *information base* (*PIB*) - *phyFSKFEC*Scheme, tal como definido na Seção 9.3.

O cálculo para estimar a sensibilidade do receptor foi realizado para duas taxas de recepção de 50kbps e 200kbps. A aplicação do *FEC* e sem o *FEC* para as duas taxas é

definida pela Equação (5) e foi comparado com a especificação da placa.

Ainda de acordo com o padrão *IEEE* 802.15.4g:2012 (802.15.4G, 2012), nas Seções 8.1.7 *Receiver sensitivity definitions* e 18.1.5.7 *Receiver sensitivity* estão definidos os parâmetros e o método para calcular o *FEC*. O método para calcular a sensibilidade para o receptor em relação a taxa de recepção dos dados, independente da frequência de operação, da técnica de modulação ou mesmo da técnica aplicada ao *FEC*, está representada na Equação (5) e descrita nas Seções 8.1.7 *Receiver sensitivity definitions* e 18.1.5.7 *Receiver sensitivity*.

$$S = (S_o + 10\log[R/R_o])dBm \quad (5)$$

Onde:

$S_o = -91dBm$ sem o *FEC* e

$S_o = -97dBm$ com o *FEC*.

$R_o = 50$ kb/s.

R = bit rate em kb/s.

Aplicando a Equação 5 para as duas taxas *FEC*, utilizando o código corretor de erros de recepção e comparando com a folha de dados da *TI* CC1352P-2, demonstrou que a sensibilidade das placas para as duas taxas de recepção é melhor que o especificado em norma, indicando inicialmente um maior alcance na comunicação (1352P, 2021). O resultado dessa simulação está na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparativo entre nível de recepção calculado e especificado CC1352P-2

Sensibilidade do receptor RX		
Taxa Tx	50kbps	200kbps
Com <i>FEC</i>	$-97dBm$	$-96,4dBm$
Sem <i>FEC</i>	$-91dBm$	$-90,4dBm$
Folha de dados	$-110dBm$	$-103dBm$

3.8 Métricas Para o Ensaio

As métricas de ensaio podem ser aplicadas em bancada, em campo ou em uma rede sem fio já em operação. Em bancada, a caracterização ficará restrita à potência de saída da placa e a medição da atenuação do sinal de RF até 8m de distância. Na caracterização de campo, além da medir o alcance da comunicação entre uma placa e outra para distâncias a partir de 8m, três métricas adicionais foram verificadas experimentalmente.

As métricas verificadas experimentalmente foram: a intensidade, do sinal de rádio do inglês *radio signal strenght* (*RSS*), a taxa de erro de pacote, do inglês *packet error rate*

(*PER*) e a relação sinal/ruído, do inglês *signal noise/rate* (*SNR*), que em sistemas digitais é a relação entre a taxa de bit errado, do inglês *bit error rate* (*BER*), pelo e_b/n_o que é a relação sinal/ruído por bit (SKLAR, 1988).

3.8.1 RSS

Zanella (2016) fez uma revisão bibliográfica sobre *RSS* e *received signal strength indication* (*RSSI*), identificando mais de mil artigos sobre o assunto, no qual, ele considera um assunto bem discutido. Em seu artigo, ele descreve e sugere alguns métodos para calcular as estimativas do *RSSI*. No capítulo 5 do artigo (*V. Experimental Setup*, pág. 2668), ele descreve um modelo experimental usando duas placas de prototipagem padrão *IEEE Std. 802.15.4*, na faixa de frequência de 2,4GHz. A abordagem descrita por Zanella (2016) não foi aplicada neste trabalho, sendo aplicado a medida direta através do *software* da *TI*.

Received signal weakness - (*RSW*) ou fraqueza do sinal recebido é uma métrica definida pela *IEEE Std. 802.15.10: 2017*, como uma recomendação prática para roteamento dos pacotes *IEEE Std. 802.15.4*.

- *RSW* mede o custo de um caminho devido à redução na intensidade do sinal e tem as seguintes propriedades:

- i. Conforme a intensidade do sinal diminui, o valor da métrica aumenta. Em outras palavras, a métrica mede a fraqueza do sinal em vez da força do sinal;
- ii. O valor da métrica aumenta rapidamente com a fraqueza do sinal, de modo que as ligações com melhor intensidade do sinal é preferida. O valor *RSW* aumenta rapidamente com a perda de sinal;
- iii. *Links* com sinais muito fortes devem ter valores métricos muito baixos, próximos à zero;
- iv. As medições do nível de sinal são notoriamente instáveis e imprecisas, portanto, não é necessário uma grande precisão.

O *RSSI* é o indicador do *RSW*, sendo uma subcamada do padrão *IEEE Std. 802.15.4 MAC* usado para determinar o nível do sinal do receptor. No item 5.2.2.1 do padrão *IEEE* são definidas a metodologia para a aplicação do *RSSI* (*IEEE2019, 2019*). Na folha de dados do componente CC1352, o fabricante faz duas indicações sobre o *RSSI*, especificado para o padrão *IEEE Std. 802.15.4*, que são a faixa dinâmica e a precisão. Esses dois valores estão Tabela 2 onde a faixa de medição tem relação com a sensibilidade do receptor que é de 95 dB com precisão de +/- 3dB.

Tabela 2 – Parâmetros do *RSSI* do CC1352

<i>IEEE 802.15.4, 50kbps, Desvio +/-25kHz, 100kHz RX bandwidth</i>		
Parâmetro	Condições do Teste	Típico
<i>RSSI Dynamic range</i>	Sensibilidade limite	95dB
<i>RSSI accuracy</i>	Faixa dinâmica	+/- 3dB

O módulo de recepção do *software SmartRF Studio* faz a leitura e indica o valor direto do *RSSI*. No manual de *software* do CC1352 a informação sobre o valor do *RSSI* é obtida através do comando *CMD GET RSSI*, indicado na Figura 15, sem a necessidade de escrever um código para ler esse valor.

Figura 15 – Comando *RSSI* - manual da TI

25.3.3.2.3 <i>CMD_GET_RSSI: Read RSSI Command</i>
<p>Command ID number: 0x0403</p> <p><i>CMD_GET_RSSI</i> is an immediate command that takes no parameters, and therefore, can be used as a direct command.</p> <p>On reception, the radio CPU reads the <i>RSSI</i> from an underlying receiver. The <i>RSSI</i> is returned in result byte 2 (bit 23–16) of <i>CMDSTA</i> (see Figure 25-5). The <i>RSSI</i> is given on signed form in dBm. If no <i>RSSI</i> is available, this is signaled with a special value of the <i>RSSI</i> (-128, or 0x80).</p> <p>If no radio operation command is running, the radio CPU returns the result <i>ContextError</i> in <i>CMDSTA</i>. Otherwise, the radio CPU returns <i>DONE</i> along with the <i>RSSI</i> value.</p>

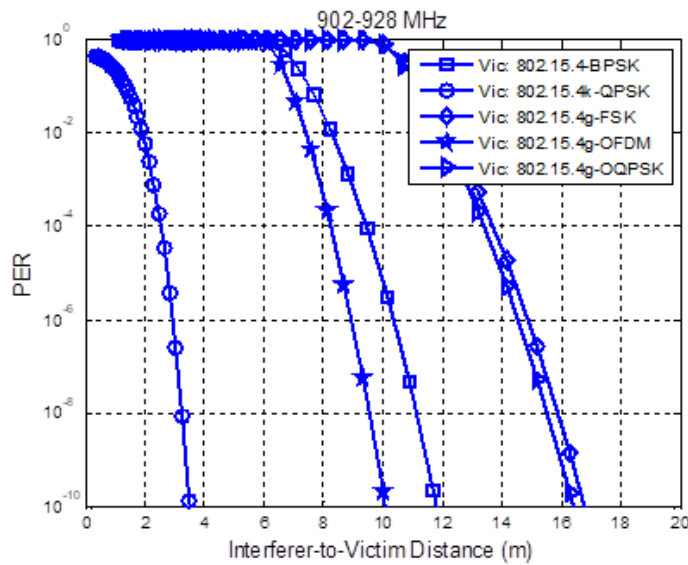
Fonte: folha de dados TI CC 1352P – 2019.

3.8.2 *Packet error rate (PER)* – taxa de erro de pacote

O *PER* é calculado pelo método chamado de verificação cíclica da redundância, do inglês *cyclic redundancy check (CRC)*. No campo *CRC* é verificado se o conteúdo do *frame*, no campo *packet data*, está íntegro ou corrompido, indicando uma porcentagem na tela do computador de pacotes íntegros e corrompidos, independente do conteúdo da informação que tráfega. O valor do *PER* é medido diretamente no *software* da placa, indicando a quantidade de pacotes perdidos em %.

Complementando sobre o *PER* e, embora não tenha sido aplicado neste trabalho, apresenta-se a Figura 16, original do documento *IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks - TG4q Coexistence Assurance Document – Dez. 2014*, da relação do *PER* pela distância, além da relação da perda de pacote com outros sistemas *IEEE 802* na faixa entre 902 a 928MHz. Cada técnica de modulação indicada na Figura 16 tem um desempenho distinto, não indicando que uma técnica seja melhor que a outra, mas apenas demonstrando o desempenho de cada técnica e o alcance estimado.

Figura 16 – *PER* vs. distância para outros sistemas 802 coexistentes afetados pela banda 902-928 MHz.



Fonte: (NAIR et al., 2014)

3.8.3 Relação sinal/ruído (*signal to noise ratio - SNR*)

De acordo com Sklar (1988), a relação sinal/ruído (*SNR*) é uma medida que compara a média da potência do sinal com a média da intensidade do ruído de fundo na recepção de um rádio. O sinal pode ser um sinal de informação, uma forma de onda de banda base ou uma portadora modulada.

Sklar (1988) sugere que o *SNR* pode degradar-se de duas formas: através da diminuição da potência do sinal desejado e através do aumento da potência do ruído, ou o aumento da potência do sinal interferente, referindo a estas degradações como perda e ruído (ou interferência), respectivamente. Quando a antena é acoplada ao rádio, a intensidade do ruído eleva-se na recepção, nesse caso é chamado de ruído aéreo.

As perdas ocorrem quando uma parte do sinal é absorvida, desviada, dispersa, ou refletida ao longo do seu percurso até ao receptor pretendido, assim, uma parte da energia transmitida não chega ao receptor. O *SNR* pode ocorrer em qualquer tipo de rádio digital ou analógico, onde o ruído de fundo presente pode comprometer a qualidade da recepção (COUCH, 1993).

Existem quatro fontes primárias de ruído: ruído térmico que pode ser gerado dentro do *link*, o ruído celeste, do inglês *sky-noise* (por exemplo, ruído espacial e ruído atmosférico) que pode ser introduzido no *link*, não linearidades do sistema que podem causar a geração de sinais espúrios dentro do *link* e por último, sinais interferentes de outros sistemas que operam na mesma frequência ou frequências adjacentes que podem ser introduzidos no *link* (SKLAR, 1988).

A elevação do ruído no receptor de um rádio digital pode eventualmente comprome-

ter o alcance e a qualidade da informação na recepção do rádio, elevando o *PER*, com consequente redução do alcance da comunicação (SKLAR, 1988).

Apresentou-se, neste capítulo, alguns dos possíveis efeitos sobre o sinal de RF do medidor de energia, a estimativa do alcance e da qualidade da comunicação sem foi usando métricas e modelos baseadas no padrão *IEEE*, além de dois métodos adaptados e aplicados em ensaios de bancada e de campo.

Capítulo 4

Descrição dos Experimentos e Análise dos Resultados

Neste capítulo estão descritos os resultados obtidos em bancada e em campo, além da apresentação da análise dos resultados do efeito da atenuação do sinal de RF ocasionado pelas características do padrão entrada em caixa metálica, tendo métodos distintos para bancada e campo. As medidas de campo ocorreram na região sudeste da cidade de São Carlos, no estado de São Paulo. Essa área é uma região mista com residências e áreas com e sem vegetação.

4.1 *Setup* do Ensaio de Bancada

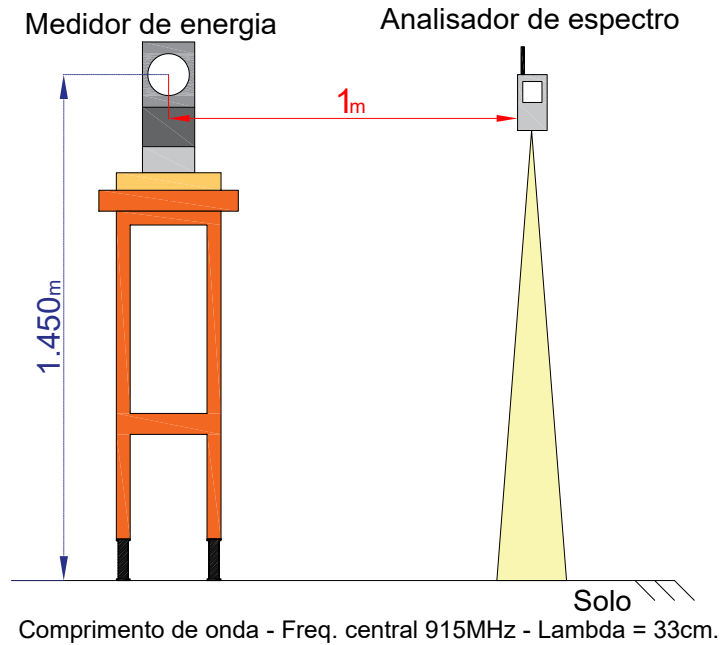
A antena dipolo de $\frac{1}{2}$ onda, usada nas medições com o analisador de espectro RF *Explorer 3G Combo*, foi instalada em um tripé e polarizada verticalmente. A antena dipolo é uma antena com ganho aproximado de 2,1dBi para a faixa de *UHF* e foi cortada na frequência de 915MHz, que corresponde ao comprimento de 16,4cm (ARRL, 1994). A antena dipolo esta indicada no tripé na Figura 12a.

Além da antena dipolo foram usadas antenas comerciais de 3dBi de ganho. Essas antenas também são usadas em outros sistemas de rede sem fio na mesma faixa de frequência e foram montadas dentro do padrão de entrada de caixa metálica junto com a placa CC1352P-2.

No croqui da Figura 17 estão as posições das medidas efetuadas com a placa CC1352P-2 instalada na estrutura giratória e a posição da antena do analisador de espectro. Na primeira medição o analisador de espectro ficou a 1m de distância com visada direta, na

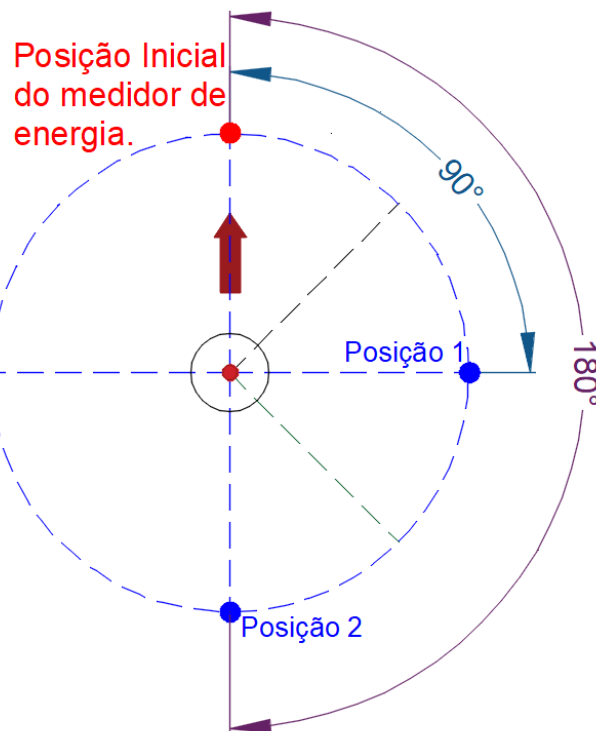
mesma altura da antena de cada medida. Na Figura 18 estão as posições usadas nas medidas em bancada, que são frontal, 90° e 180° .

Figura 17 – Posição do MEE e do analisador de espectro



Fonte: desenho autor

Figura 18 – Posição do MEE e as posições para as medidas de 90° e 180°



Fonte: desenho autor

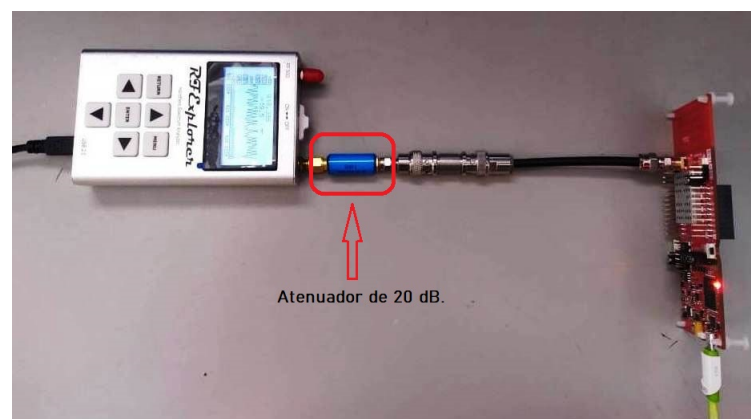
4.2 Método do Ensaio

Os métodos aplicados usando as placas da *TI* foram divididas em três roteiros descritivos. Esse modelo de descrever um conjunto de tarefas para cada atividade foi embasado em um método aplicado em de engenharia de software (PRESSMAN, 2006). O primeiro roteiro foi realizado em bancada com a intenção de verificar a potência do sinal de RF de cada placa, depois foram realizados dois roteiros para as medições com a placa dentro e fora do padrão de entrada até 8m de distância aplicada em bancada e para distância superior a 8m aplicada nas medidas de campo.

4.2.1 Roteiro do ensaio em bancada

O roteiro desenvolvido tem como base a Figura 19. Essa foi a configuração usada para medir a potência de saída das duas placas usando o analisador de espectro. A sequência adotada foi:

Figura 19 – Medida da potência de saída



Fonte: autor

1. O analisador de espectro RF *Explorer 3G Combo* foi configurado para a frequência central de 915MHz, na faixa de 902 a 928MHz;
2. O *software SmartRF Studio 7* da *TI* foi usado para configurar a placa CC1352P;
3. A placa CC1352P-2 foi configurada da seguinte maneira: potência de saída = 10dBm, frequência = 915MHz, usando a aba inferior *Continuous TX = Unmodulated*. As duas últimas configurações propiciam um sinal em RF com as características de uma portadora com um único tom senoidal, do inglês *Continuous Waves - (CW)*;
4. Repetir as medidas para a placa LPSTK. A configuração da placa está na Tabela 3 na seção 4.3. A placa tem a potência pré-configurada por *software* em 13dBm e sem possibilidade de transmitir em *CW*.

4.2.2 Roteiro do ensaio em bancada até 8m

As medidas em bancada foram efetuadas nas distâncias indicadas na Figura 13. Nas Figuras 12, 17 e 18 são o *setup* usado nos experimentos. Nas Seções 4.5 e 4.6 serão apresentados os valores medidos. A sequência adotada foi:

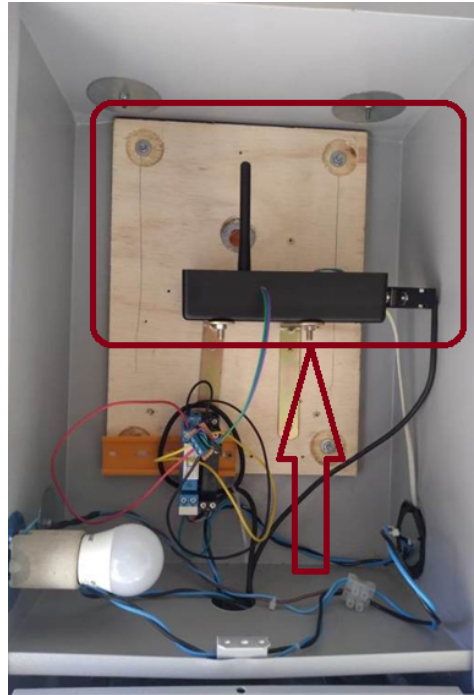
1. A placa *TI* foi posicionada e alinhada para a distância de 1m horizontalmente e, com a altura ajustada em 1,45m em relação a antena dipolo como indicado nas Figuras 12 e 17;
2. Todas as medidas foram efetuadas com analisador de espectro RF *Explorer 3G Combo* e com a antena dipolo;
3. A primeira série de medidas ocorreu com a placa fora do padrão de entrada indicado na Figura 20 e a segunda série de medidas ocorreu com a placa instalada no padrão de entrada indicada na Figura 21. Na parte posterior foi montado um simulacro de parede com tijolos comuns, como no exemplo da Figura 12;
4. Para cada distância definida foram feitas três medidas, uma frontal, uma em 90° e uma oposta ou 180°;
5. O ciclo de cada medida foi de 1 minuto para cada posição.

Figura 20 – Placa CC1352P-2 sem padrão de entrada



Fonte: autor

Figura 21 – Placa CC1352P-2 instalada no padrão de entrada



Fonte: autor

4.2.3 Roteiro do ensaio em campo acima de 8m

O método usado para as medições em campo foram baseados no trabalho de Bultitude e Bedal (1989). As medidas foram feitas com altura fixa de 4,8m para a placa LPSTK, um pouco abaixo da fiação elétrica de baixa tensão, e a placa CC1352P-2 instalada dentro do padrão de entrada. A sequência adotada foi:

1. A posição e altura do padrão de entrada e altura total do mastro usado com a placa LPSTK foram referenciadas nas Figuras 7 e 8;
2. A placa CC1352P-2 da Figura 21 foi instalada próxima ao padrão da Figura 7;
3. A placa LPSTK simulou o ponto de acesso, conectada a antena de 8,15dBi, montada na ponta do mastro de 4,8m;
4. As medições ocorreram nas quatro direções: norte, leste, oeste e sul;
5. Distâncias medidas a partir da posição da placa CC1352P-2 foram de: 10m, 40m, 100m, 200m e 300m;
6. As distâncias foram determinadas através do *software AutoCad 2020*¹ com geolocalização, indicada na Figura 22;
7. As altitudes foram determinadas usando o *Google Earth*;
8. Através do *software Smart RF Studio* foram medidos os seguintes parâmetros: *RSSI*, *PER* e *BER*.

¹ Versão estudante licenciada para Universidade Federal de São Carlos.

Figura 22 – Cobertura verificada



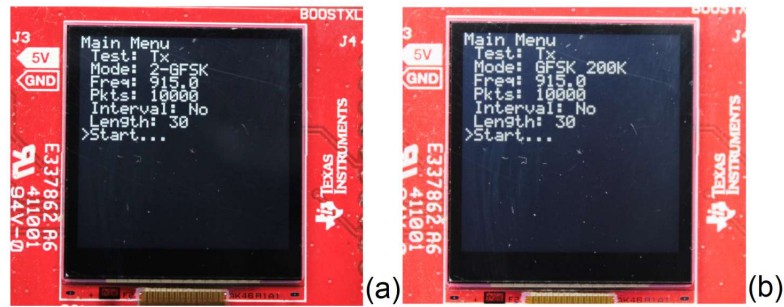
Fonte: Realizado usando *AutoCad 2020*

4.3 Configuração das Placas da *TI*

A placa LPSTK foi configurada como transmissora e, para isso, foi instalado um aplicativo para gerar até 10000 pacotes, com possibilidade de duas taxas de transmissão e operando na frequência de 915MHz. A placa CC1352P-2 foi configurada como receptora e conectada ao computador através do *software SmartRF Studio TI* com os mesmos parâmetros da placa LPSTK (1352P, 2021).

Foi acoplada uma antena com 8,15dBi a placa LPSTK, com potência de saída da placa igual a 13dBm e ganho total de 21,15dBm, equivalente 130mW. Nas Figuras 23a e 23b estão as duas configurações usadas para transmissões durante o ensaio em campo, sendo de 50kbps indicada na Figura 23a e 200kbps indicada na Figura 23b. Na Tabela 3 está a configuração usada na placa LPSTK.

Figura 23 – Configuração LPSTK



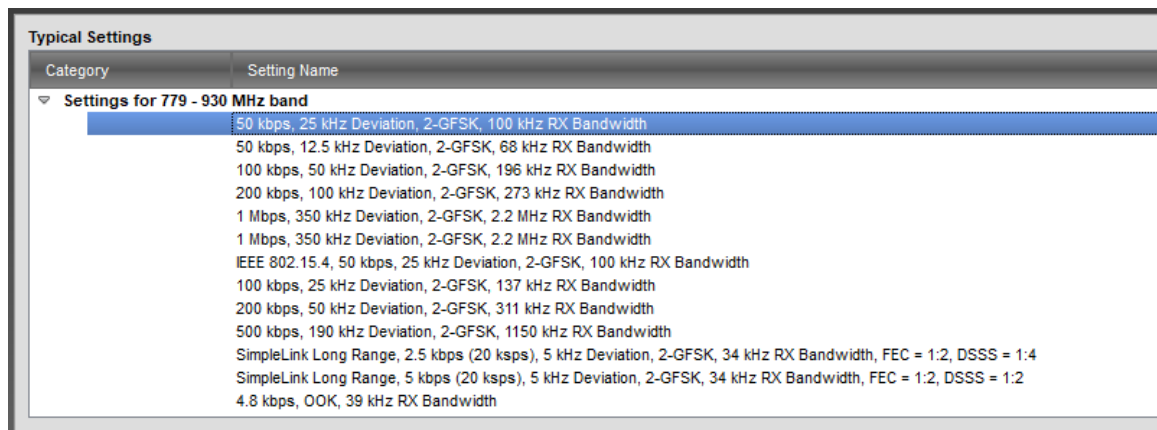
Fonte: Folha de dados TI CC 1352R – 2019.

A partir da placa CC1352P-2 foram feitas as contagens e verificação de pacotes recebidos, bits de erro e nível do sinal na recepção, que são as métricas *PER*, *BER* e *RSSI*. A placa foi configurada com a técnica de modulação *Gaussian Frequency-shift keying modulation* (*GFSK*) a mesma usada na placa LPSTK.

Tabela 3 – Parâmetros configurados na placa LPSTK

<i>LPSTK CC1352R Main Menu</i>		
<i>Test</i>	<i>TX</i>	<i>TX</i>
<i>Mode</i>	<i>2-GFSK</i>	<i>GFSK 200k</i>
<i>Freq</i>	915MHz	915MHz
<i>Pkts</i>	10000	10000
<i>Interval</i>	<i>No</i>	<i>No</i>
<i>Length</i>	30	30

A configuração usada no *software* para a taxa de 50kbps está na Figura 24 e para a taxa de 200kbps está na Figura 25. A estrutura completa do *frame*, definido pelo padrão *IEEE Std. 802.15.4* e usado pelas duas placas e *software* da família CC135X está na Figura 26.

Figura 24 – Configuração do *software* para recepção para taxa 50kbps

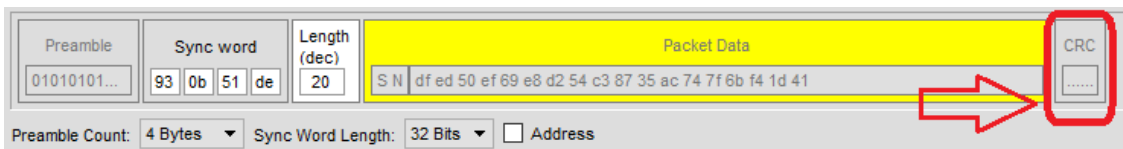
Fonte: Tela de configuração *SmartRF Studio* – TI

Figura 25 – Configuração do *software* para recepção para taxa 200kbps

Typical Settings	
Category	Setting Name
	200 kbps, 50 kHz Deviation, 2-GFSK, 311 kHz RX Bandwidth
	500 kbps, 190 kHz Deviation, 2-GFSK, 1150 kHz RX Bandwidth
	SimpleLink Long Range, 2.5 kbps (20 ksps), 5 kHz Deviation, 2-GFSK, 34 kHz RX Bandwidth, FEC = 1:2, DSSS = 1:4
	SimpleLink Long Range, 5 kbps (20 ksps), 5 kHz Deviation, 2-GFSK, 34 kHz RX Bandwidth, FEC = 1:2, DSSS = 1:2
	4.8 kbps, OOK, 39 kHz RX Bandwidth
	WMBUS S1-Mode, 32.768 kbps, 2-GFSK, 311 kHz RX Bandwidth
	WMBUS S2-Mode, 32.768 kbps, 2-GFSK, 196 kHz RX Bandwidth
	WMBUS C-Mode, 100 kbps, 2-GFSK, 235 kHz RX Bandwidth
	WMBUS T-Mode, 100 kbps, 2-GFSK, 235 kHz RX Bandwidth
	Wi-SUN mode #1a, 50 kbps, 12.5 kHz Deviation, 2-GFSK, 68 kHz RX Bandwidth
	Wi-SUN mode #1b, 50 kbps, 25 kHz Deviation, 2-GFSK, 98 kHz RX Bandwidth
	Wi-SUN mode #2a, 100 kbps, 25 kHz Deviation, 2-GFSK, 137 kHz RX Bandwidth
	Wi-SUN mode #2b, 100 kbps, 50 kHz Deviation, 2-GFSK, 196 kHz RX Bandwidth

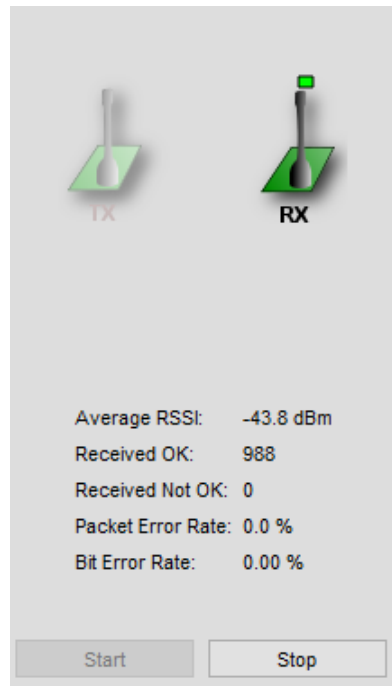
Fonte: Tela de configuração *SmartRF Studio - TI*

O campo *CRC* do *frame* é uma métrica de cálculo definida pela *ITU* grupo T padronizada em 16 bits. O método de cálculo do *CRC* está descrito na norma *IEEE Std. 802.15.4-2006* no item 7.2.1.9. Esse método também é chamado de sequência de verificação de quadro, do inglês *frame check sequence*.

Figura 26 – *Frame* do padrão *IEEE Std. 802.15.4*

Fonte: Tela parcial do *SmartRF Studio*

A Figura 27 apresenta a aba das métricas, descritas na Seção 3.8, que são os valores de *PER*, *BER* e *RSSI* usados nas medidas de campo.

Figura 27 – Indicadores de *PER*, *BER* e *RSSI*

Fonte: Tela parcial do *SmartRF Studio* – TI

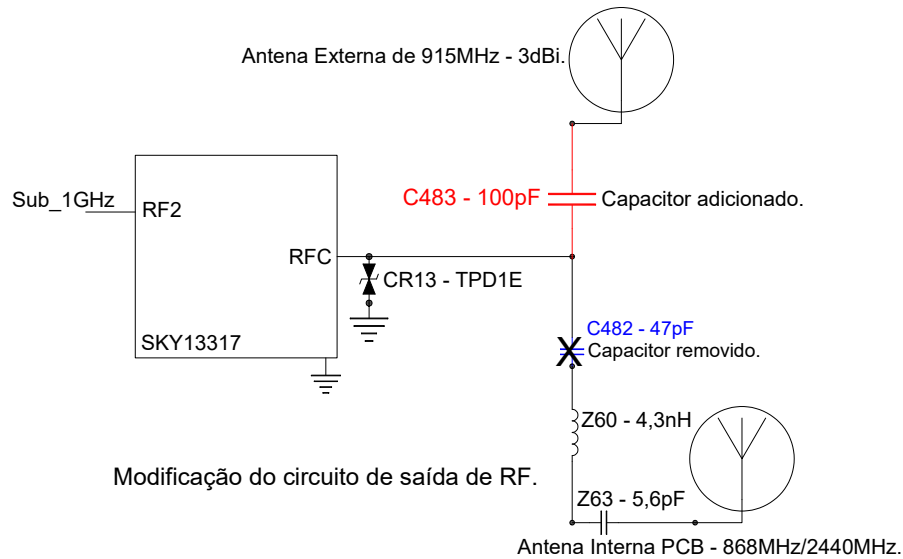
4.4 Ensaio em Bancada - 1ª parte

Foram realizadas medidas de potência de saída direta em cada uma das placas *TI*, antes de iniciar as medidas de bancada para a distância de até 8m e, para as medidas de campo, usando o analisador de espectro RF *Explorer 3G Combo* para medir a potência do sinal de RF. A potência medida diretamente na saída do rádio digital é a potência efetiva do transmissor, visto que quase não há perda por inserção ou perda de retorno.

4.4.1 Verificação do nível do sinal de RF

A CC1352P-2 foi primeira placa a ser medida, dado que foi modificada para instalar uma antena externa na faixa de sub-1GHz, sendo que a configuração de fábrica é uma antena em *printed circuit board (PCB)* para operar em uma faixa de frequência mais estendida. Foi removido o capacitor C482 de 47pF e instalado um novo capacitor de 100pF na posição C483. O capacitor de 100pF tem a mesma especificação do capacitor 47pF indicado pelo fabricante, que é um capacitor cerâmico *SMD 0402 COG/NPO*, 5% e 16V. A Figura 28 apresenta o diagrama elétrico adaptado com a posição do capacitor removido e o novo instalado (1352P, 2021).

Figura 28 – Estágio final da placa CC1352P-2



Fonte: Adaptado do diagrama da TI

Após a troca do capacitor foi verificado se o valor estava correto e não comprometeria a amplitude em alguma frequência ou em toda a faixa de 902 até 928MHz. Para essa medição foi usado o *software SmartRF Studio*, na configuração de *Frequency Sweep*, com passo de 2MHz e intervalo de 10ms entre uma frequência e outra, com potência de saída de 0dBm. Foi acoplado o analisador de espectro diretamente na placa CC1352P-2, através de um atenuador de 20dB, indicado na Figura 19.

O resultado da medida de varredura está na Tabela 4, apresentando uma variação da potência de 1dB entre o início e o fim da faixa de frequência, sendo que a maior atenuação ocorreu em 904MHz e a menor na frequência de 928 MHz. Nas frequências mais centrais da faixa que são 913,946 e 916,054MHz a variação ficou entre 1dB e 0,5dB menor respectivamente em relação ao início da faixa.

Tabela 4 – Medida da Varredura

<i>RF Explorer PC Client</i>				
Freq.	904,108MHz	913,946MHz	916,054MHz	928MHz
Pot.	-22dBm	-21dBm	-21.5dBm	21dBm

As medidas de potência foram repetidas para a placa LPSTK para verificar a potência do sinal de RF. A placa LPSTK tem a seguinte característica: vem montada em uma caixa plástica alimentada por duas pilhas tipo AAA de 1,5V, duas antenas, sendo uma externa e exclusiva para sub-1GHz e a outra interna e exclusiva para 2,4GHz e foi configurada da seguinte maneira:

Configuração do *software* para o teste da placa LPSTK:

a. Configuração da primeira medição com taxa de transmissão de 50kbps:

> *Test: TX; Mode: 2-GFSK; Freq: 915.0; Pkts: 10000; Interval: No e Lenght:30.*

b. Configuração da segunda medição com taxa de transmissão de 200kbps:

> *Test: TX; Mode: GFSK 200k; Freq: 915.0; Pkts: 10000; Interval: No e Lenght:30.*

Na Tabela 5 estão os valores da potência medida para cada taxa de transmissão e a diferença entre o valor medido e o calculado. A potência foi calculada através da Equação (6):

$$P_{tx} - Att_{20dB} = P_{calculada} \quad (6)$$

onde: P_{tx} é a potência de saída da placa LPSTK, Att_{20dB} é o atenuador de 20 dB, e $P_{calculada}$ é a potência calculada, igual: $P_{calculada} = -13$ dBm.

Tabela 5 – Medição de potência de saída da placa LPSTK

$P_{saída}$		
Frequência (MHz)	915	915
Taxa de transmissão (kbps)	50	200
Potência (dBm)	-10,6	-11,3
Diferença entre medida e calculada (dB)	2,4	1,7

4.5 Ensaio em Bancada - 2ª parte

A placa CC1352P-2 foi instalada em uma caixa plástica com a antena de 3dBi através de cabo extensor. O conjunto instalado está na Figura 20, para medidas de visada direta.

A placa foi configurada através do *software SmartRF Studio* da TI para transmitir em CW, potência de 10dBm e a antena de 3dBi acoplada, correspondendo a uma potência de 13dBm ou 20mW. Foram realizadas medidas adicionais nas posições de 90° e 180°, com visada direta a 1,45m de altura do solo até a base da antena. Os valores medidos estão na Tabela 6.

As medidas foram realizadas nas distâncias de 1m, 2m, 4m e 8m com visada direta, em uma área cercada com muros de 3m de altura e aproximadamente 32m². As duas primeiras medidas foram realizadas usando o *software RF Explorer* do fabricante do analisador de espectro RF *Explorer 3G Combo*.

As terceira e quarta medidas foram realizadas diretamente no instrumento devido a limitação do comprimento dos cabos USB que estavam conectando, através do computador *desktop*, o analisador de espectro e a placa CC1352P-2.

Para as distâncias entre 1m e 2m a atenuação variou apenas 0,9dB, entretanto, para as distâncias de 4m e 8m houve uma elevação da atenuação em 8dB e 14dB respectivamente, em relação a distância de 1m.

Tabela 6 – Posição Frontal $P_{saída} = 13\text{dBm}$

Atenuação em (dB) pela Distância (m)				
Distância (m)	1	2	4	8
Atenuação (dB) calculada	31,5	37,6	43,6	49,6
Atenuação (dBm) medida	-27	-27,9	-35	-41
Atenuação (dB) prática	40	40,9	48	54

Na Tabela 7 estão os valores da atenuação medida nas posições de 90° e 180° e foram realizadas para avaliar o nível da atenuação nessas duas posições com a placa fora do padrão de entrada. A atenuação foi maior na posição 90° do que na posição de 180° .

Na posição de 180° foram realizadas duas medidas, sendo uma para a distância de 1m e a segunda em 2m. A atenuação nessa posição foi inferior à posição de 90° e um pouco superior às medidas indicadas na Tabela 6. Na medida para a distância de 1m a atenuação foi de 2,5dB maior e, para a medida de 2m a atenuação foi de 3,9dB maior.

Tabela 7 – Medidas nas posições de 90° e 180°

Medidas sem anteparo - $P_{saída} = 13\text{dBm}$		
Distância 1m	Medida efetuada (dBm)	Atenuação (dB)
Posição 90°	-32,9	45,9
Posição 180°	-29,5	42,5
Distância 2m	Medida efetuada (dBm)	Atenuação (dB)
Posição 180°	-30,9	43,9

As medidas foram repetidas com a placa montada dentro do padrão de entrada para simular a mesma situação do MEE instalado no cliente. As medidas foram realizadas em três posições, sendo que a posição frontal e perpendicular à rua são as instalações padrões da concessionária. A terceira medição foi realizada na posição oposta ou 180° do padrão de entrada, visto que há a possibilidade do ponto de acesso ficar oposto ao padrão de entrada do cliente.

A placa da TI foi instalada dentro do padrão de entrada e apresentada na Figura 21. A antena ficou alinhada na mesma altura da janela de leitura e não foi usado cabo extensor para a antena. Na Tabela 8 estão as medidas efetuadas nas mesmas distâncias, o nível do sinal medido com o analisador de espectro e o nível de atenuação em cada posição.

Após as medidas realizadas foi possível comparar atenuação do sinal de RF nas distâncias pré-definidas. As medidas estão consolidadas nas Tabelas 9 e 10 e foram comparadas com a potência do sinal medido com a placa fora e dentro do padrão de entrada com o simulacro de parede de tijolo na parte posterior. As medidas ocorreram entre o mês de Julho e Agosto de 2021, com uma temperatura variando entre 13°C no período da manhã e 23°C no período da tarde.

Tabela 8 – Medidas com o padrão de entrada

Medida com simulacro de parede		
Antena 3dBi, T=24°C, $P_{saída} = 13\text{dBm}$		
Dist. 1m	Atenuação (dB)	Medição (dBm)
Posição Frontal	39,3	-26,3
Posição 90°	45,3	-32,3
Posição 180°	57,5	-44,5
Dist. 2m	Atenuação (dB)	Medição (dBm)
Posição Frontal	45	-32,0
Posição 90°	57,5	-44,5
Posição 180°	62,0	-49,0
Dist. 4m	Atenuação (dB)	Medição (dBm)
Posição Frontal	53	-40,0
Posição 90°	62,5	-49,5
Posição 180°	68,0	-55,0
Dist. 8m	Atenuação (dB)	Medição (dBm)
Posição Frontal	56,5	-43,5
Posição 90°	64,5	51,5
Posição 180°	63,5	-50,5

Tabela 9 – Distância <8m sem padrão de entrada

Medidas posição 180°		
Antena 3dBi, T=24°C, $P_{saída} = 13\text{dBm}$		
Estimativa da atenuação		
Distância(m)	Calculada (dB)	Medida (dB)
1	31,5	40
2	37,6	40,9
4	43,6	48
8	49,6	54

A maior atenuação ocorreu na posição posterior onde estava o simulacro de parede de tijolo². A diferença da atenuação com a placa fora e dentro do padrão para a posição

² O ideal seria montar o padrão de entrada em parede de alvenaria, mas essa possibilidade não foi possível, visto que, todas as medidas ocorreram fora da universidade

frontal e distância de 1m é igual a 0,7dB. Os valores estão apresentados nas Tabelas 6 e 8. A partir de 2m a atenuação foi maior na posição oposta ou 180°. Na distância de 2m, com a placa montada dentro do padrão e com o simulacro de parede instalado, a atenuação passou de 40,9dB para 62dB, uma elevação de 21db.

Tabela 10 – Distância <8m com padrão de entrada

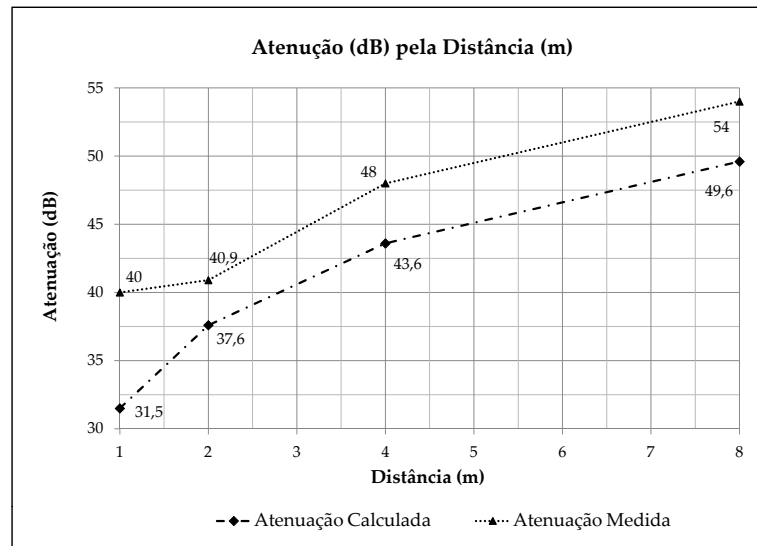
Medidas posição 180°	
Antena 3dBi, T=24°C, $P_{saída}$ = 13 dBm	
Estimativa da atenuação	
Distância(m)	P_s aten.(dB)
1	57,5
2	62
4	68
8	63,5

Usando como referência a Figura 14 curva (1), a atenuação para a distância de 100m é de 85,8dB, sendo adicionado a atenuação de 21dB medida em bancada, obtém-se uma atenuação total de 106,8dB. A estimativa de alcance da comunicação, nessa situação, não seria superior a 100m, considerando a sensibilidade do receptor da placa CC1352P-2 igual a -103dBm. Entretanto, se adicionar a potência de saída de 13dBm da placa da TI, usando a Figura 14, curva (2) como referência, o sinal de RF da placa teria alcance superior a 300m, independente do local da instalação. Essa estimativa será verificada durante as medidas de campo.

4.6 Comparação: Atenuação Estimada e Medida

A Figura 29 apresenta a compilação dos dados a partir da Tabela 6 com o valor medido para uma distância até 8m. A Equação 3 foi aplicada para estimar a atenuação do sinal de RF na faixa de 915MHz para mesma distância. O sinal de RF decai muito para a distância de 8m, com uma atenuação superior a 50dB, sendo um indicativo que possivelmente as medições em campo não terão um alcance superior a 100m em algumas direções e ainda ser afetado pelo relevo e densidade das edificações.

Figura 29 – Comparação da atenuação calculada e medida pela distância



Fonte: autor

4.7 Ensaio em Campo

O ensaio em campo teve o mesmo objetivo do segundo ensaio em bancada, que foi verificar o alcance ou cobertura do sinal de RF a partir da posição do padrão de entrada.

Figura 30 – Direções analisadas



Fonte: autor

Foi usado o *software AutoCad 2020*³ para medir a distância percorrida. A Figura 22 corresponde ao mapa de toda a área de cobertura que foi analisada. Os pontos indicados no mapa são os locais de origem da transmissão.

As medições foram divididas para as direções norte, sul, leste e oeste, indicado na Figura 30 e, em cinco distâncias que foram 10, 40, 100, 200 e 300 metros a partir da posição⁴ do padrão de entrada, incluindo as medidas de altitude para cada distância.

A primeira medida efetuada foi partir de 10 metros, sendo que, as distâncias subsequentes foram escolhidas baseados na Figura 14 e no comprimento da rua para as direções leste e oeste. Como o padrão de entrada estava posicionado quase central a rua nessas direções e, tendo essa rua um comprimento de aproximadamente 600m, limitou-se o alcance para cada direção em 300m, com o objetivo de uniformidade das medidas de campo. A área de cobertura total foi de aproximadamente $282700m^2$ para o raio de 300 metros.

Para estimar a altitude em cada posição indicada na Figura 22, foi usado o *Google Earth*. A partir dessas medidas foram montados gráficos indicando a variação da altitude pela distância, com o intuito de verificar o perfil do relevo para cada direção. A variação do relevo e a diversidade do meio impediam a visada direta partir da distância de 100m. Junto a cada Figura com o perfil do relevo, estão as Figuras com o ponto de vista voltado para o o padrão de entrada, dessa maneira, foi possível notar a variação do relevo.

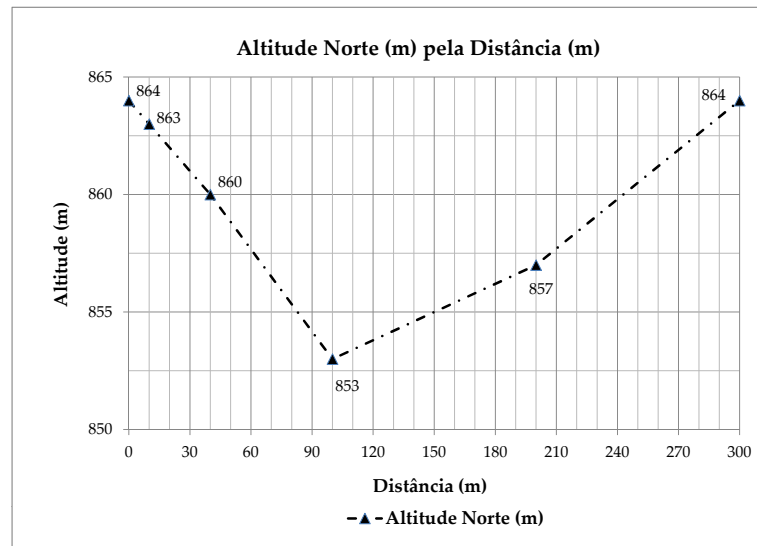
O perfil do relevo para a direção norte está indicado na Figura 31 e o ponto de vista a partir da distância de 300m está indicada na Figura 32 direcionada para o padrão de entrada. As altitudes variam de 853 a 864m, sendo que entre a distância de 100m a 300m há uma faixa de vegetação maior, um pequeno rio na altitude de 853m, além de edificações residenciais e um terreno parcialmente descampado.

A altitude de 853m corresponde a distância de 100m e nessa posição há um desnível de 11m em relação ao padrão de entrada, sendo o ponto com maior desnível para a direção norte. Entre a distância de 300m e o padrão de entrada, através da Figura 32, foi possível verificar a densidade e altura da vegetação, sendo que nessa distância a altitude é a mesma do padrão.

³ Versão estudante licenciada para Universidade Federal de São Carlos.

⁴ O ideal seria a montagem de um Modelo Digital do Terreno - (MNT), mas isto está fora do escopo deste trabalho

Figura 31 – Perfil do relevo para direção norte



Fonte: autor

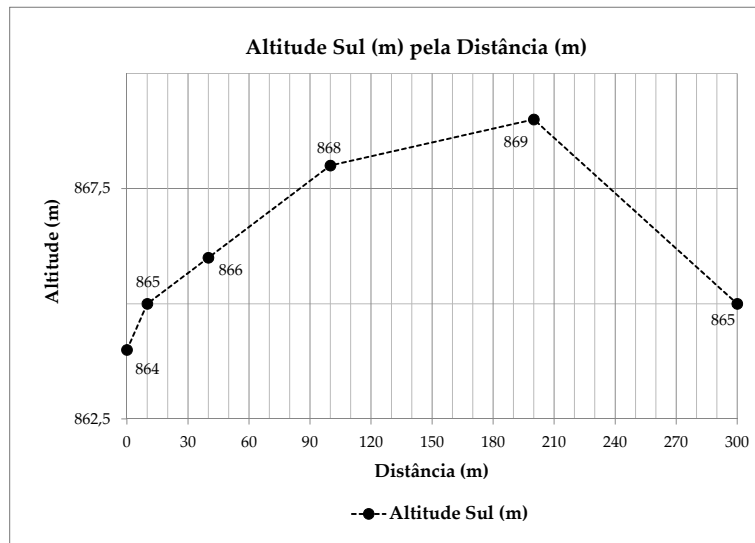
Figura 32 – Visão norte



Fonte: autor

O perfil do relevo para a direção sul está indicado na Figura 33 e o ponto de vista a partir da distância de 300m está indicada na Figura 34. Nessa direção há uma maior densidade de edificações, incluindo edificações com dois pavimentos e ruas largas. A diferença de altitude para a distância de 300m é de apenas 1m em relação ao padrão de entrada, sendo que na distância de 200m a diferença é de aproximadamente 6m. A direção sul apresenta a menor variação de relevo e o menor alcance na comunicação.

Figura 33 – Perfil do relevo para direção sul



Fonte: autor

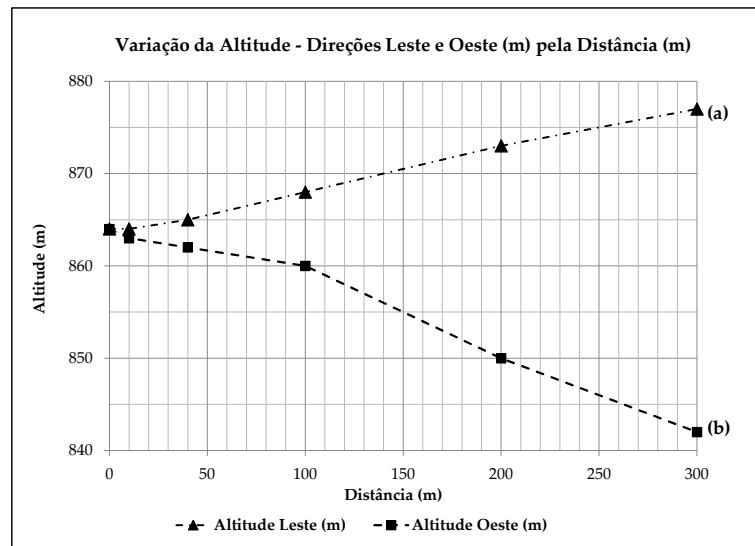
Figura 34 – Visão Sul



Fonte: autor

O perfil do relevo da mesma rua para as direções leste e oeste está indicado na Figura 35. A rua de ponta a ponta tem aproximadamente 650m e a posição de padrão de entrada ficou próximo da metade da rua. O ponto de vista da posição do padrão de entrada para a direção leste está indicada na Figura 36a e o ponto de vista para a direção oeste está indicada na Figura 36b, sendo quase possível visualizar o final da rua para a direção oeste, mas não é possível visualizar o final da rua para a direção leste.

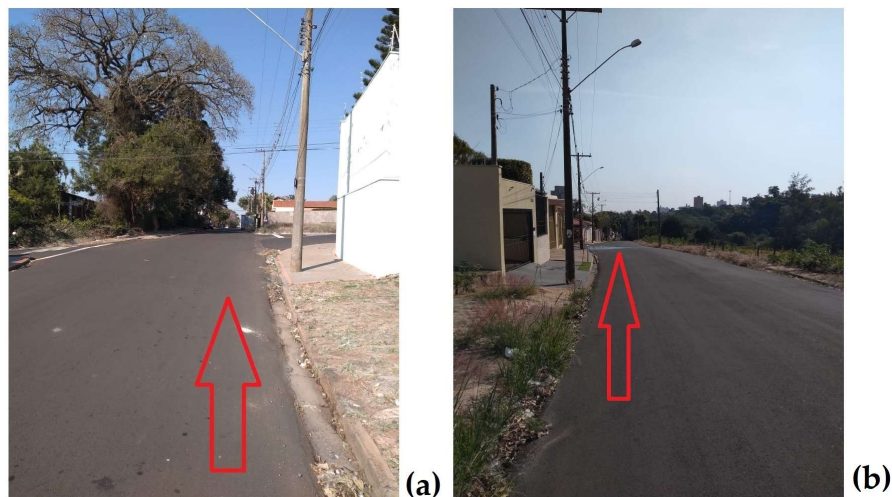
Figura 35 – Perfil do relevo - Direções Leste e Oeste



Fonte: autor

A rua na direção leste é 13m mais alta em relação ao padrão de entrada e para a direção oeste é 22m mais baixa, além disso, visualizando o mapa da Figura 22 é possível verificar que de um lado da rua estão às edificações e do outro lado uma área de vegetação rasteira até uma distância de 100m e árvores depois dos 100m.

Figura 36 – Visão - Direções Leste e Oeste



Fonte: autor

4.8 Estimativa de Alcance

A estimativa de alcance está relacionada com alguns aspectos da comunicação sem fio, que são a potência do transmissor, a sensibilidade do receptor, o tipo da antena, o ganho da antena e o local de instalação relacionada com a altitude e a altura da antena principal. Para estimar o alcance da rede sem fio do MEE seguiu-se a mesma linha, que é o ganho

da antena instalada na placa LPSTK, ganho da antena instalado na placa CC1352P-2 e a sensibilidade do receptor de ambas as placas da *TI*.

Na folha de dados de ambas as placas estão as seguintes características: para a frequência de 915MHz, taxa de dados na recepção = 200kbps, BER = 10^{-2} para 311kHz *RX bandwidth* e modulação 2-*GFSK*. A sensibilidade do receptor é de -103 dBm nesta especificação. Para a frequência de 868MHz, taxa de dados na recepção = 50kbps, BER = 10^{-2} para 100kHz *RX bandwidth* e modulação 2-*GFSK*, a sensibilidade do receptor é de -110dBm. O valor da sensibilidade da recepção usada como referência para estimar o alcance entre as duas placas foi de -103dBm.

A Tabela 11 apresenta a estimativa da atenuação do sinal de RF a partir da Equação 4, sem levar em consideração o padrão de entrada, o método de transmissão da informação, nem a taxa de transmissão, apenas a potência do transmissor. Nesta estimativa foi incluída atenuação do cabo coaxial usado para interligar a placa LPSTK com a antena. A Equação (7) foi usada para estimar atenuação do cabo coaxial RG58, sobre a potência do sinal de RF da placa LPSTK com antena 8,15dBi e apresentada na Tabela 11. Comprimento do cabo = 8,6m, com 0,586dB/m e atenuação total de 5,04dB.

$$P_{total} = P_{LPSTK} + G_{ta} - ATT_{cabo} = 13 + 8,15 - 5,04 = 16,11dBm \quad (7)$$

onde:

P_{LPSTK} = Potência da Placa LPSTK, G_{ta} = Ganho da Antena e,

ATT_{cabo} = Atenuação total do cabo coaxial usado.

$P_{total} = 16,11dBm$.

Tabela 11 – Cálculo da atenuação do sinal de RF - LPSTK

Atenuação estimada LPSTK				
Dist.(m)	Aten. Calc.(dB)	TX (dBm)	RX (dBm)	Sens. RX (dBm)
10	52,8	16,11	-36,7	-103
40	72,7	16,11	-56,5	-103
100	85,8	16,11	-69,7	-103
200	95,7	16,11	-79,6	-103
300	101,5	16,11	-85,4	-103

A atenuação calculada para a distância de 300m é de 101,5dB e está muito próximo do nível da sensibilidade na recepção da placa CC1352P-2 instalada no padrão de entrada e, que eventualmente tenha alguma dificuldade de interpretar a informação que está chegando.

A intensidade do sinal de RF transmitido da placa LPSTK é de 16,11dBm com a antena instalada. Para calcular a atenuação para a distância de 300m, foi aplicada a

Equação (8). Os cálculos estão apresentados na Tabela 11, tendo um sinal de RF de -85,4dBm chegando na recepção da placa CC1352P-2, corresponde a 17,6dB acima do limite especificado de -103dBm, nessas condições a placa CC1352P-2 poderia interpretar a informação recebida apenas fora do padrão de entrada.

$$Nível_{RX} = LPSTK_{TX} - Aten_{calculada} \quad (8)$$

$$Nível_{RX} = 16,11 - 101,5 = -85,4\text{dBm}$$

Adicionando informações obtidas durante as medidas de bancada com a placa instalada dentro do padrão de entrada foi possível estimar o alcance máximo da comunicação entre as duas placas, principalmente no lado oposto, que é fixada na parede.

Nas últimas colunas estão as estimativas de alcance do sinal de RF da placa LPSTK. Nos valores estimados das colunas de 180° e 90° já estão inclusos o ganho da antena de 8,15dBi e a atenuação do cabo coaxial usado com a placa LPSTK. A antena instalada na placa CC1352P-2 era de 3dBi e com polarização vertical. A partir dos valores estimados na Tabela 12 é possível prever que o alcance máximo será em 100m para as posições perpendicular e posterior, independente de qualquer outro parâmetro usado na comunicação, como por exemplo o *PER* e a taxa de dados.

Tabela 12 – Cálculo estimativo do sinal de RF na recepção CC1352P-2

Posição perpendicular do padrão de entrada - atenuação sem visada direta						
Dist.	Aten. calc.	TX	180°+21dB	90°+ 0,6dB	180°	90°
m	dB	dBm	dB	dB	dBm	dBm
10	52,8	16,11	73,8	53,4	-57,7	-37,3
40	72,7	16,11	93,7	73,3	-77,5	-57,1
100	85,8	16,11	106,8	86,4	-90,7	-70,3
200	95,7	16,11	116,7	96,3	-100,6	-80,2
300	101,5	16,11	122,5	102,1	-106,4	-86,0

Na posição oposta ou 180°, com a instalação do simulacro de parede de tijolos, foi possível medir uma atenuação nessa posição de 21 dB, entretanto, na posição perpendicular ou 90° a atenuação foi bem menor, apenas 0,6dB independente da lateral. Na Tabela 12 estão todos os dados consolidados. Na posição oposta ou de 180° o alcance máximo foi de 40m. Essa atenuação e consequente limitação do alcance só foi verificada depois nas medições de campo.

4.9 Resultados das Medidas de Campo

As medições foram divididas em duas taxas de dados, do inglês *Data Rate*, sendo a primeira em 50kbps e a segunda em 200kbps. Em cada medição foram transmitidos 10000 pacotes que duravam aproximadamente 5 minutos (Figuras 23, 24 e 25). A variação da taxa de dados foi usada para avaliar se haveria alguma alteração no alcance da comunicação ou se o alcance seria o mesmo para as duas taxas de dados. Esse método era usado na comunicação entre modems sobre par metálico, sendo um método que pode eventualmente ser usado em uma rede sem fio (MCNAMARA, 1988).

Na Tabela 13 estão todas as medidas feitas com a taxa de 50kbps. Nesta e em todas as medidas foi usado o *software SmartRF Studio* da *TI* para efetuar as medidas da recepção da placa CC1352P-2. O alcance da comunicação foi inferior aos valores estimados e calculados inicialmente.

O pior caso foi para a direção sul com alcance máximo de 40m para as duas taxas de dados. Nessa direção existem algumas edificações com dois pavimentos, a rua é larga, tem a menor variação de relevo entre um ponto e outro, comparativamente a outras direções e apresentou a maior atenuação e o menor alcance.

O melhor caso ocorreu para a direção oeste onde o relevo é em declive e com edificações em apenas um lado da rua e mata rasteira no lado oposto até 100m. A janela de leitura do padrão de entrada estava para a direção oeste, uma vez que, o padrão de entrada foi instalado perpendicular a via, igual o padrão da Figura 7.

O maior alcance ocorreu na direção oeste na distância de 200m com taxa de 50kbps e 100m com taxa de 200kbps. No sentido leste o alcance máximo ficou em 100m para a taxa de 50kbps e 100m para a taxa de 200kbps. Para a direção norte o alcance máximo ficou em 100m para taxa de dados de 50kbps e 40m para a taxa de dados de 200kbps, com o PER em 1%.

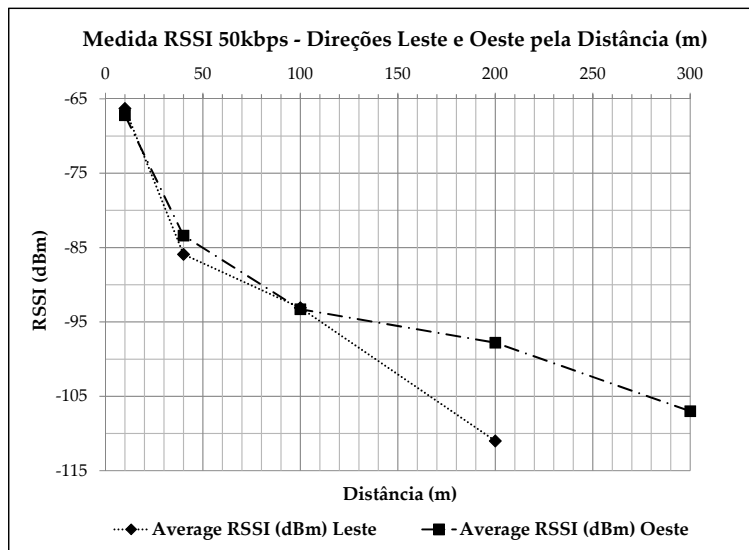
Para todas as direções o principal parâmetro observado foi o *PER*. A taxa do *PER* definiu a qualidade e o alcance máximo da comunicação entre as placas. O valor máximo aceitável do *PER*, de acordo com a folha de dados da *TI*, é de 1%, mesmo se a intensidade do sinal de RF estiver dentro da sensibilidade de -103dBm do receptor da placa. Se o valor de *PER* for superior a 1% deve ser descartado, portanto, só os valores dentro de faixa são aceitáveis.

Tabela 13 – Medidas com taxa de dados de 50kbps

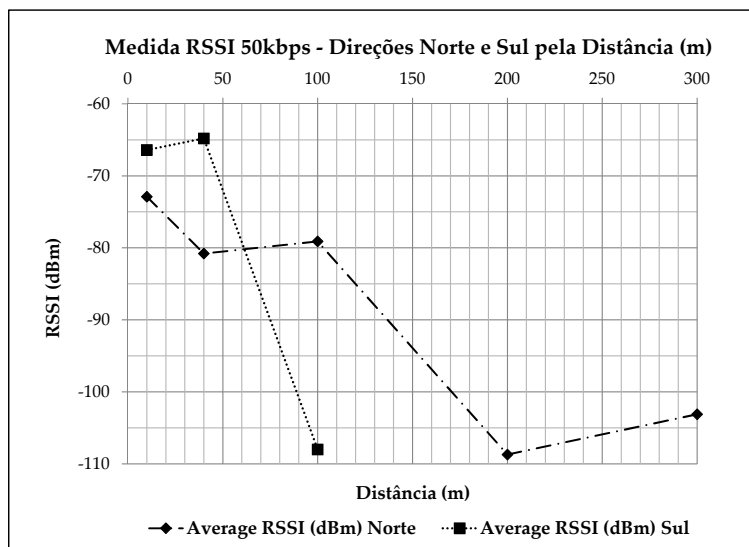
Altitude inicial 864m					
Distância - direção leste					
Taxa 50kbps	10m	40m	100m	200m	300m
<i>Average RSSI</i> dBm	-66,3	-85,9	-93,1	-111	-
<i>Received OK (Packet)</i>	10000	9744	9997	1	0
<i>Received Not OK (Packet)</i>	0	25	3	355	1
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	2,6	0,0	99,70	100
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,01	0,0	2,20	-
Altitude(m)	864	865	868	873	877
Distância - direção oeste					
<i>Average RSSI</i> dBm	-67,2	-83,4	-93,3	-97,8	-107
<i>Received OK (Packet)</i>	9929	10000	9831	9537	455
<i>Received Not OK (Packet)</i>	0	0	169	463	8588
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	1,7	4,63	95
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	0,01	4,60	1,13
Altitude(m)	863	862	860	850	842
Distância - direção norte					
<i>Average RSSI</i> dBm	-72,9	-80,8	-79,1	-108,7	-103,1
<i>Received OK (Packet)</i>	10000	9964	10000	3	2597
<i>Received Not OK (Packet)</i>	0	36	0	3186	7305
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,4	0,0	99,9	73,8
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	0,0	2,61	0,51
Altitude(m)	863	860	853	857	864
Distância - direção sul					
<i>Average RSSI</i> dBm	-66,4	-64,8	-108	-	-
<i>Received OK (Packet)</i>	10000	9999	2	0	-
<i>Received Not OK (Packet)</i>	0	1	227	322	-
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	99,1	100	-
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	1,78	-	-
Altitude(m)	865	866	868	869	865

A relação entre o *RSSI* pela distância estão nas Figuras 37 e 38. Nessas medidas foi possível verificar a relação entre a atenuação do sinal de RF pela distância, para taxa de 50 kbps. Nas colunas com a indicação “-” na Tabela 13 são as distâncias nas quais a placa receptora não conseguiu interpretar a informação que estava chegando, ficando acima da sensibilidade de -103 dBm e *PER* maior que 1%.

As medidas foram repetidas para a taxa de 200kbps nas mesmas posições que foram feitas para a taxa de 50kbps. Nessas medições foi verificado que a elevação da taxa dados e a largura de banda maior reduziu o alcance da comunicação.

Figura 37 – Medida *RSSI* 50kbps - Direções Leste e Oeste

Fonte: autor

Figura 38 – Medida *RSSI* 50kbps - Direções Norte e Sul

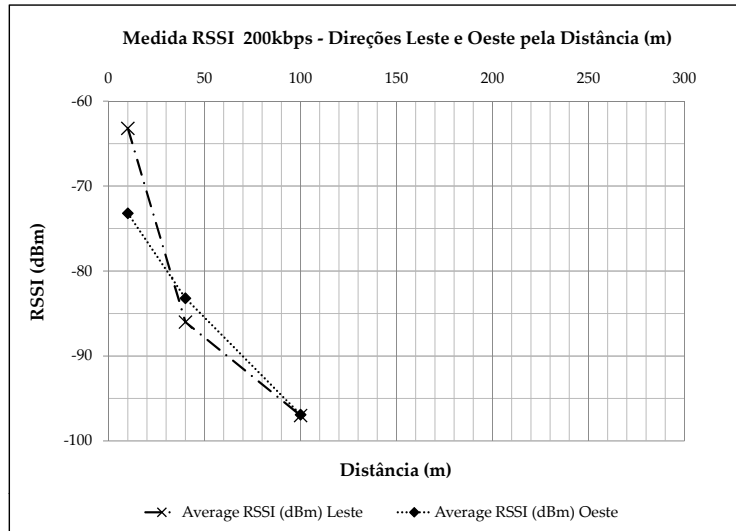
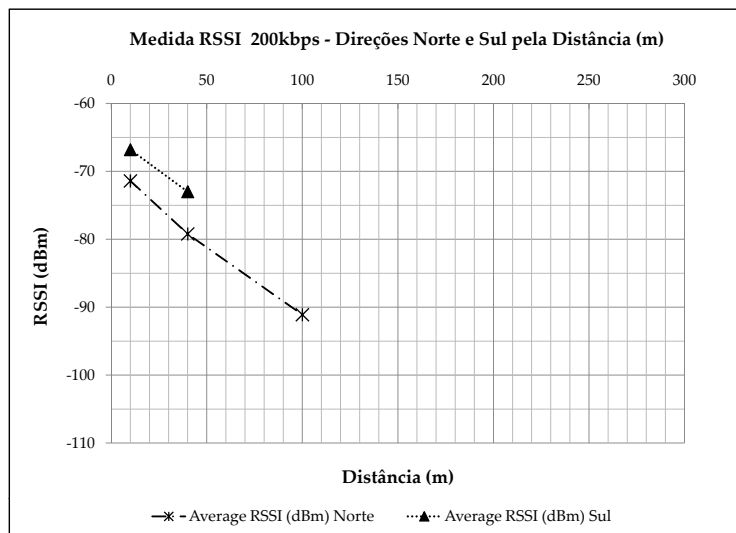
Fonte: autor

Na Tabela 14 estão os valores das medições e nas Figuras 39 e 40 estão os resultados da relação entre o *RSSI* para as direções leste e oeste e, norte e sul pela distância para a taxa de transmissão de 200kbps.

O alcance da comunicação foi maior para as direções leste e oeste do que para as direções norte e sul. Para as direções leste e oeste, o alcance ficou em 100m, com 1% de PER e dentro da faixa de -103dBm da sensibilidade da recepção da placa CC1352P-2. Para a direção norte o alcance ficou em 100m e de 40m para a direção sul.

Tabela 14 – Medidas com taxa de dados de 200kbps

Altitude inicial 864m					
Distância - direção leste					
Taxa 200kbps	10m	40m	100m	200m	300m
<i>Average RSSI</i> dBm	-63,2	-86	-97	–	–
<i>Received OK (Packet)</i>	10000	9980	798	20	0
<i>Received Not OK (Packet)</i>	0	20	9202	9980	–
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,2	91,5	99,8	–
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	1,0	2,4	–
Altitude(m)	864	865	868	873	877
Distância - direção oeste					
<i>Average RSSI</i> dBm	-73,2	-83,2	-96,9	–	–
<i>Received OK (Packet)</i>	9996	9996	2659	143	–
<i>Received Not OK (Packet)</i>	4	4	7553	9857	–
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	73,4	98,6	98,6
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	0,0	1,6	–
Altitude(m)	863	862	860	850	842
Distância - direção norte					
<i>Average RSSI</i> dBm	-71,4	-79,2	-91,1	–	-110
<i>Received OK (Packet)</i>	9996	9997	2924	–	2
<i>Received Not OK (Packet)</i>	4	3	7076	–	78
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	70,7	0,0	97,5
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	0,5	0,0	0,1
Altitude(m)	863	860	853	857	864
Distância - direção sul					
<i>Average RSSI</i> dBm	-66,8	-73	-109	–	–
<i>Received OK (Packet)</i>	9999	9994	19	–	–
<i>Received Not OK (Packet)</i>	1	6	9434	0	0
<i>Packet Error Rate (%)</i>	0,0	0,1	99,8	0,0	0,0
<i>Bit Error Rate (%)</i>	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Altitude(m)	865	866	868	869	865

Figura 39 – Medida *RSSI* 200kbps - Direções Leste e OesteFigura 40 – Medida *RSSI* 200kbps - Direções Norte e Sul

Conclusão

Neste trabalho, com base em um estudo de caso, as características do tipo padrão de entrada, a posição da instalação e a taxa de transmissão de dados, como esperado, afetaram o desempenho da comunicação sem fio na faixa de frequência de 915MHz. Adicionalmente, as condições de contorno, nas proximidades das medidas, podem ter contribuído no comprometimento no desempenho da comunicação sem fio. Tais variações de desempenho deixam claro que uma análise prévia do ambiente, sistema e instalações físicas são importantes para uma plena e satisfatória instalação de uma rede de comunicação para medidores moderno de energia elétrica.

Nos experimentos de bancada foi possível verificar uma atenuação maior do sinal de RF depois da placa ser instalada dentro do padrão de entrada com a antena acoplada, principalmente no lado posterior no qual estava montado o simulacro de parede com tijolo comum. Nesse lado ocorreu uma atenuação de 21dB em relação a medida sem o padrão, sendo um indicador que o mesmo poderia ocorrer nas medidas de campo, estimando um alcance máximo inicial de 100m no lado da alvenaria.

Nos experimentos de campo, a relação entre a taxa de dados e o alcance, indicou que uma taxa de dados menor eleva o alcance da comunicação, reduzindo a perda de pacotes (*PER*). Exemplificando, para a direção oeste o alcance foi superior a 100m para a taxa de dados de 50kbps, indicando que uma taxa de dados menor elevou o alcance da comunicação entre as placas. Para a taxa de dados em 200kbps alcance da comunicação ficou na faixa entre 40 a 100m.

Os resultados obtidos nesse trabalho desenvolvido em campo em São Carlos apresentaram como ganho técnico/acadêmico uma análise experimental e uma metodologia de estudo que podem guiar e colaborar na implantação de uma rede de medidores sem fio pelas concessionárias.

Com proposta futura o uso do modelo de *Shadowing* para uma melhor modelagem do sistema, bem como novos estudos de caso, como, por exemplo, quando se utiliza um

padrão de entrada em concreto.

Referências

- 1352P, T. *CC1352P Simple Link High Performance Multi-Band Wireless MCU With Integrated Power Amplifier*. 2021.
- 802.15.4. Ieee standard for low-rate wireless networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, p. 1–800, 2020.
- 802.15.4G, I. S. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks LR WPANs Amendment 3 Physical Layer (PHY) Specifications for Low Data Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks*. 2012.
- ALLIANCE, Z. **Connectivity Standards Alliance**. 2003.
- AMOROSO, M. M. **Tecnologias de redes sem fio para casas inteligentes: uma análise técnica e econômica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- ANEEL. **Chamada no 011/2010 Projeto Estratégico: Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente**. 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2008-ChamadaPE11-2010.pdf>.
- _____. Regulação. In: . [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/regulacao>>.
- ANITA, J. M.; RAINA, R. Review on smart grid communication technologies. 2019.
- ARRL (Ed.). **Antenna Book Chapter 8-6**. [S.l.]: ARRL, 1994. v. 17th Edition. ISBN 0-87259-473-4.
- BERG, J. E.; BOWNDS, R.; LOTSE, F. Path loss and fading models for microcells at 900 mhz. 1992.
- BRAGA, S. E. **Projeto de Lei do Senado no. 356 de 2017**. 2017. Disponível em: <<https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/130960>>.
- BUENO, J. C. F. **Fornecimento em Tensão Secundária de Distribuição**. 2020. Disponível em: <<http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-13.pdf>>.
- BULTITUDE, R. J. C.; BEDAL, G. K. Propagation characteristics on micro cellular urban mobile radio channels at 910 mhz. 1989.

- CEN-CENELEC. **Smart Grid**. 2022. Disponível em: <<https://www.cenelec.eu/areas-of-work/cen-cenelec-topics/smart-grids-and-meters/smart-grids/>>.
- CISCO. Smart grid. In: . [s.n.], 2017. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Verticals/Utilities/FAN/2-0/CU-FAN-2-DIG/CU-FAN-2-DIG2.html>>.
- CLARKE, R. H. A statistical theory of mobile radio reception. 1968.
- CLAUSEN, T.; DEARLOVE, C.; DEAN, J. **RFC 6130 Mobile Ad Hoc Network (MANET) Neighborhood Discovery Protocol (NHDP)**. 2011.
- COBEI. **Smart Grid**. 2022. Disponível em: <<http://cobei.org.br/?s=smart+grid>>.
- COUCH, L. **Digital and analog communication systems**. [S.l.: s.n.], 1993. ISBN 0023252812.
- CRAEMER, K. D.; DECONINCK, G. Analysis of state of the art smart metering communication standards. **Young Researchers Symposium (YRS) Location : Leuven**, 2010.
- DURGIN, G. D.; RAPPAPORT, T. S. Theory of multipath shape factors for small scale fading wireless channels. 2000.
- ENERGIA, M. de Estado de Minas e. **PORTARIA No 440 DE 15 DE ABRIL DE 2010**. 2010. Disponível em: <<http://antigo.mme.gov.br>>.
- FAN, Z. et al. Smart grid communications overview of research challenges, solutions, and standardization activities. 2011.
- FCC. **Part 15.247 Operation within the bands 902 at 928 MHz and 2400 at 2483.5 MHz and 5725 at 5850 MHz**. 2020. Disponível em: <<https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-A/part-15/subpart-C/subject-group-ECFR2f2e5828339709e/section-15.247>>.
- FERREIRA, R. B. Cpf - distribuição fornecimento em tensão secundária de distribuição. In: . [S.l.: s.n.], 2009.
- FINSTER, S.; BAUMGART, I. Privacy-aware smart metering: A survey. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 17, n. 2, p. 1088–1101, 2015.
- GEETHA, A.; JAMUNA, K. Smart metering system. In: **2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES)**. [S.l.: s.n.], 2013.
- GIACONI, G.; GUNDUZ, D.; POOR, H. V. Privacy-aware smart metering: Progress and challenges. **IEEE Signal Processing Magazine**, 2018.
- GIGLIOLI, E.; PANZACCHI, C.; SENNI, L. **How Europe is approaching the smart grid**. 2010. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/EPNG/PDFs/McKonsmartgrids/MoSG_Europe_VF.aspx>.
- GOUGH, M. B. et al. Preserving privacy of smart meter data in a smart grid environment. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2022.

GUNGOR, V. C. et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards. 2011.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. 1980.

IEA. **Report**. 2020. Disponível em: <IEA(2021),SmartGrids,IEA,Paris<https://www.iea.org/reports/smart-grids>>.

Part 15.4: Wireless medium access control(mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (wpans). In: IEEE (Ed.). [S.l.]: IEEE, 2006. ISBN 978-1-5044-3262-7.

IEEE. **IEEE P802.15 Working Group for Wireless Personal Area Networks (WPANs) : Coexistence analysis of IEEE Std 802.15.4 with other IEEE standards and proposed standards**. 2010.

IEEE2011. **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4 - Low Rate Wireless Personal Area Networks LR WPANs**. 2011.

IEEE2019. **Recommended Practice for Routing Packets in IEEE 802.15.4 Dynamically Changing Wireless Networks - Amendment 1: Fully Defined Use of Addressing and Route Information Currently in IEEE Std 802.15.10**. 2019.

ITU. **Recommendation P 370-7 10/95**. 1995. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.370-7-199510-W/en>>.

KAGAN, N. et al. **Redes Elétricas Inteligentes no Brasil: Análise de Custos e Benefícios de um Plano Nacional de Implantação**. [S.l.]: Synergia Editora, 2013. ISBN 978-85-61325-87-9.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 9788521205395.

KHALIFA, T.; NAIK, K.; NAYAK, A. A survey of communication protocols for automatic meter reading applications. 2011.

KINNEY, P. **IEEE 802.15 Working Group for Wireless Specialty Networks (WSN)**. 1997. Disponível em: <<https://www.ieee802.org/15/>>.

LAVERTY, D. M. et al. Telecommunications for smart grid: Backhaul solutions for the distribution network. 2010.

LIMA, C. A. F.; GOMES, R. D. M.; MACIEL, A. A. Uso de novas tecnologias digitais para medição de consumo de energia e níveis de eficiência energética no brasil. **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit(GIZ) GmbH**, 2021.

MALANDRA, F.; SANSO, B. A simulation tool for the performance evaluation of large-scale rf mesh networks for smart grid and iot applications. 2017.

MCNAMARA, J. E. **Technical Aspects of Data Communication**. Third. [S.l.: s.n.], 1988. ISBN 0-13-898545-6.

METRETEK. **Smart Meter**. 1978.

MIYOSHI, E. M.; SANCHES, C. A. **Projetos de Sistemas Radio**. Sao Paulo: Erica, 2008. ISBN 8571948682.

MOGENSEN, P. E. et al. Urban area radio propagation measurements at 955 and 1845 mhz for small and micro cells. 1991.

NAIR, J. P. et al. **TG4q Coexistence Assurance Document**. 2014. Disponível em: <<https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0709-00-004q-coexistence-assurance-document.docx>>.

NIST. **Smart Grid**. 2022. Disponível em: <<https://www.nist.gov/el/smart-grid-menu/about-smart-grid>>.

OKUMURA, Y. The mobile radio propagation model okumura - curve and the world first full scale cellular telephone system. 1968.

OLIVEIRA, W. et al. Statistical analysis of the influence of peoplemovement and antenna radiation pattern on small-scale fading. **IEEE Latin America Transactions**, 2021. ISSN 1548-0992.

OSSANNA, J. F. A model for mobile radio fading due to building reflections, theoretical and experimental fading waveform power spectra. 1964.

P802.15. **Coexistence analysis of IEEE Std 802.15.4 with other IEEE standards and proposed standards**. 2010. Disponível em: <<https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/10/15-10-0808-00-0000-802-15-4-2011-coexistence-analysis.pdf>>.

PAHLAVAN, K.; LEVESQUE, A. H. **Wireless information networks**. [S.l.: s.n.], 1995. ISBN 0471106070.

PRATA Álvaro T.; LOUSADA, E. S.; MASERA, M. **Redes Elétricas Inteligentes Dialogo Setorial Brasil União Europeia**. [S.l.], 2014.

PRESSMAN, R. S. **Engenharia de Software**. Sexta. [S.l.: s.n.], 2006. ISBN 85-86804-57-6.

RAPPAPORT, T. S.; MCGILLEM, C. D. Uhf fading in factories. 1989.

RATHMANN, R. Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa em redes inteligentes. 2017. ISSN 978-85-88063-38-9.

SANTOS, M. C. dos. **Aceitabilidade Social de Medidores Inteligentes : um Estudo de Caso no BRASIL**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SANTOS, M. de M.; CAVALCANTI, C.; DUARTE, A. **Redes elétricas inteligentes: contexto nacional**. [S.l.], 2012.

SHANNON, C. E.; HAMMING, R. **FEC Error**. 1950. Disponível em: <<https://www.electronicshobby.com/technology-trends/error-correcting-codes-comm-storage>>.

SKLAR, B. **Digital communications : fundamentals and applications**. [S.l.]: Prentice Hall, 1988. ISBN 013212713X.

SRIVILAS, K.; PIRAK, C. Feasibility study and performance analysis of nbiot communications for pea smart grid network. 2021.

STUBER, G. L. **Principles of Mobile Communication**. [S.l.: s.n.], 2017.

SÍNTESE, T. **Brasil ficou para trás na adoção do Smart Grid**. Brasil: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.telesintese.com.br/brasil-ficou-para-tras-na-adocao-do-smart-grid/>>.

UNION, I. T. Open systems interconnection model itu-t rec. x.200 (1994 e). In: . [S.l.: s.n.], 1994.

USTUN, T. S.; HUSSAIN, S. M. S. Extending iec 61850 communication standard to achieve internet of things in smartgrids. 2019.

WISUN. **Wireless Smart Ubiquitous Networks**. 2012.

YONGYONG, Y.; CHENGHAO, H. Design of data acquisition system of electric meter based on zigbee wireless technology. In: **2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications(AEECA)**. [S.l.: s.n.], 2020.

ZANELLA, A. Best practice in rss measurements and ranging. 2016.