

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado



CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO
RF DE PROTÓTIPO PARA
RSSF DE LONGO ALCANCE COM
APLICAÇÃO EM SMART GRID

José Taunai Dantas Segundo

João Pessoa-PB, Brasil
Fevereiro – 2017

JOSÉ TAUNÁI DANTAS SEGUNDO

**CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO RF DE PROTÓTIPO
PARA RSSF DE LONGO ALCANCE COM APLICAÇÃO EM SMART GRID**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Augusto Lisboa de Souza

JOÃO PESSOA

2017

D192c Dantas Segundo, José Taunáí.
Caracterização do desempenho RF de protótipo para
RSSF de longo alcance com aplicação em Smart Grid
/ José Taunáí Dantas Segundo. - João Pessoa, 2017.
90 f. : il. -

Orientador: Antonio Augusto Lisboa de Souza.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR

1. Engenharia elétrica. 2. Desempenho RF. 3. Redes
elétricas inteligentes. 4. Redes de sensores sem fio. I. Título.

UFPB/BC

CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

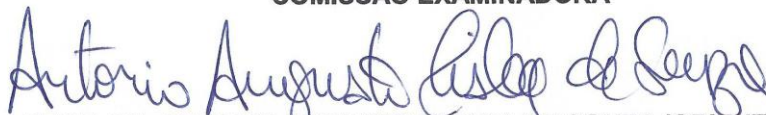
**CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO RF DE PROTÓTIPO PARA RSSF DE
LONGO ALCANCE COM APLICAÇÃO EM SMART GRID**

Elaborado por

JOSÉ TAUNÁI DANTAS SEGUNDO

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA



**PROF. DR. ANTONIO AUGUSTO LISBOA DE SOUZA (ORIENTADOR),
CEAR/PPGEE/UFPB**



PROF. DR. FABIANO SALVADORI, CEAR/PPGEE/UFPB



PROF. DR. LUCAS VINICIUS HARTMANN, CEAR/DEE/UFPB

João Pessoa/PB, 23 de fevereiro de 2017.

Aos meus familiares, namorada e amigos pelo tempo que deixamos de estar juntos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, em especial aos meus pais, José Taunáí Dantas e Etelúzia Bezerra Cabral por todo o apoio e ajuda que deram aos meus estudos. À minha tia Maria Madalena Cabral e a meu primo Talles Eduardo Cabral pela recepção e apoio.

Ao professor Antonio Augusto Lisboa de Souza, pelo apoio, confiança, orientação, incentivo e zelo sem os quais este trabalho não seria possível. “Se não conseguir medir o que queres, meça um resistor, depois, tente medir novamente o que queres”.

Ao corpo docente que compõe o curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica, que contribuíram à minha formação.

Aos meus companheiros de laboratório e colegas de pós-graduação pelo tempo que passamos juntos e diversos momentos de descontração.

À Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio técnico e estrutural.

“O que sabemos é uma gota; o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES	IX
RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1 INTRODUÇÃO	14
1.1 ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES	18
2.1.1 TRANSFORMADOR ISOLADO A ÓLEO	19
2.1.1.1 PARÂMETROS DE MONITORAMENTO	21
a) TEMPERATURA.....	21
b) VIBRAÇÃO.....	23
2.1.2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES (<i>SMART GRIDS</i>)	26
2.1.3 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF).....	27
2.2 CONCEITOS EM RÁDIO COMUNICAÇÃO	28
2.2.1 RUÍDO, DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA E SENSIBILIDADE	29
2.2.2 EQUAÇÃO DE TRANSMISSÃO NO ESPAÇO LIVRE	30
2.3 REVISÃO DE LITERATURA DE TRABALHOS CORRELATOS	32
2.3.1 SISTEMAS DE RÁDIO TRANSMISSÃO	35
a) IEEE 802.15.4 E ZIGBEE.....	35
b) LORA	37
2.4 COMENTÁRIOS.....	42
3 METODOLOGIA	44
3.1 NÓ CONCENTRADOR	46
3.2 NÓ SENSOR.....	47
3.3 TESTE EM LABORATÓRIO.....	49
3.4 TESTE EM CAMPO ABERTO.....	58
a) TESTE EM CAMPO ABERTO 1 (TCA1).....	58
b) TESTE EM CAMPO ABERTO 2 (TCA2).....	58
c) TESTE EM CAMPO ABERTO 3 (TCA3).....	61
3.5 COMENTÁRIOS.....	61
4 RESULTADOS.....	64

a)	TESTE EM CAMPO ABERTO 1 (TCA1).....	64
b)	TESTE EM CAMPO ABERTO 2 (TCA2).....	67
c)	TESTE EM CAMPO ABERTO 3 (TCA3).....	75
4.2	COMENTÁRIOS.....	79
5	CONCLUSÕES.....	81
	REFERÊNCIAS.....	83

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	CRESCIMENTO DA POTÊNCIA INSTALADA BRASILEIRA POR ANO, ADAPTADO DE [1].	14
FIGURA 2 -	TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO ISOLADO A ÓLEO, ADAPTADO DE [8].	20
FIGURA 3 -	SENSORES DE VIBRAÇÃO FIXADOS AO TRANSFORMADOR, ADAPTADO DE [10].	24
FIGURA 4 -	SENSORES DE VIBRAÇÃO FIXADOS AO TRANSFORMADOR, ADAPTADO DE [11].	25
FIGURA 5 -	SENSORES DE VIBRAÇÃO FIXADOS AO TRANSFORMADOR. (A) VISTA SUPERIOR. (B) VISTA INTERIOR. (C) VISTA EXTERIOR. (D) RESPOSTA DA VIBRAÇÃO DE ACORDO COM A TENSÃO NO TRANSFORMADOR E TORQUE DOS PARAFUSOS DO NÚCLEO. ADAPTADO DE [12].	25
FIGURA 6 -	TOPOLOGIA EM MALHA. FONTE: AUTOR.	27
FIGURA 7 -	TOPOLOGIA EM ÁRVORE. FONTE: AUTOR.	28
FIGURA 8 -	TOPOLOGIA EM ESTRELA. FONTE: AUTOR.	28
FIGURA 9 -	BANCO DE FILTROS PARA AQUISIÇÃO DA PSD, ADAPTADO DE [32].	29
FIGURA 10 -	CURVA DA DISTÂNCIA PELA POTÊNCIA RECEBIDA USANDO (4). FONTE: AUTOR.	31
FIGURA 11 -	CABEÇALHO DE PACOTE LORA, ADAPTADO DE [42].	38
FIGURA 12 -	PROTÓTIPO DO NÓ CONCENTRADOR. FONTE: AUTOR.	46
FIGURA 13 -	EXEMPLO DE DADOS EXIBIDOS NO TERMINAL DA ESTAÇÃO. FONTE: AUTOR.	47
FIGURA 14 -	PROTÓTIPO DO NÓ SENSOR. FONTE: AUTOR.	48
FIGURA 15 -	EXEMPLO DE DADOS EXIBIDOS NO TERMINAL DO NÓ SENSOR. FONTE: AUTOR.	48
FIGURA 16 -	CURVAS DE TENSÃO NO RESISTOR EM SÉRIE. (A) CONF. 1, (B) CONF. 2 (C) CONF. 3, (D) CONF. 4, (E) CONCENTRADOR FONTE: AUTOR.	53
FIGURA 17 -	ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DO SENSOR DE VIBRAÇÃO. FONTE: AUTOR.	54
FIGURA 18 -	RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO. CURVA DE REFERÊNCIA FONTE: AUTOR.	55
FIGURA 19 -	RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA. CURVA DE REFERÊNCIA. FONTE: AUTOR.	55
FIGURA 20 -	RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO. DADOS RECEBIDOS DO NÓ SENSOR. FONTE: AUTOR.	56
FIGURA 21 -	COMPARATIVO DE RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA. DADOS RECEBIDOS DO NÓ SENSOR EM AZUL. CURVA DE REFERÊNCIA EM VERMELHO. FONTE: AUTOR.	57
FIGURA 22 -	LOCAL PARA TESTES TCA1. FONTE: AUTOR.	58
FIGURA 23 -	LOCAL PARA TESTES TCA2. FONTE: AUTOR.	59
FIGURA 24 -	VISADA DE RECEPÇÃO NA POSIÇÃO A. FONTE: AUTOR.	60
FIGURA 25 -	VISADA DE RECEPÇÃO NA POSIÇÃO B, C E D. FONTE: AUTOR.	60
FIGURA 26 -	LOCAL PARA TESTES TCA3. FONTE: AUTOR.	61
FIGURA 27 -	GRÁFICO TCA1 DE TRANSMISSÃO POR RSSI. FONTE: AUTOR.	64
FIGURA 28 -	GRÁFICO TCA1 DE TRANSMISSÃO POR SNR. FONTE: AUTOR.	65
FIGURA 29 -	GRÁFICO TCA1 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE RSSI. FONTE: AUTOR.	65
FIGURA 30 -	GRÁFICO TCA1 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE SNR. FONTE: AUTOR.	66

FIGURA 31 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE RSSI. FONTE: AUTOR.	67
FIGURA 32 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE SNR. FONTE: AUTOR.	68
FIGURA 33 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE RSSI. FONTE: AUTOR.	69
FIGURA 34 - GRÁFICO TCA2 AMPLIAÇÃO DA FIG. 33 COM PONTOS MARCADOS. FONTE: AUTOR.	70
FIGURA 35 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIAS POR RSSI, SNR E TRANSMISSÕES SEM ERRO DE CRC. FONTE: AUTOR.	71
FIGURA 36 - GRÁFICO TCA2 HISTOGRAMA DE TRANSMISSÕES COM ERROS DE CRC PARA CADA DISTÂNCIA. FONTE: AUTOR.	73
FIGURA 37 - GRÁFICO TCA3 RSSI, SNR E PRR DE ACORDO COM A DISTÂNCIA. MEDIÇÃO (A), PTX = 13 DBM, SF = 10, SENSIBILIDADE = -129. FONTE: AUTOR.	76
FIGURA 38 - GRÁFICO TCA3 RSSI, SNR E PRR DE ACORDO COM A DISTÂNCIA. MEDIÇÃO (B), PTX = 5 DBM, SF = 12, SENSIBILIDADE = -134. FONTE: AUTOR.	76
FIGURA 39 - GRÁFICO TCA3 RSSI, SNR E PRR DE ACORDO COM A DISTÂNCIA. MEDIÇÃO (C), PTX = 20 DBM, SF = 12, SENSIBILIDADE = -134. FONTE: AUTOR.	77
FIGURA 40 - GRÁFICO DA ACELERAÇÃO POR AMOSTRA.	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BER – *Bit error rate*

CA – Corrente alternada

CI – Circuito integrado

CR – Taxa de codificação

CRC – *Cyclic redundancy code*

DSSS – *Direct sequence spread spectrum*

FEC – *Forward error correction*

IDE – *Integrated development environment*

IED – *Intelligent electronic device*

ISM – *Industrial, scientific and medical band*

LoRa – *Long Range*

LQI – *Link quality indicator*

MEMS - *Microelectromechanical systems*

OQPSK – *Offset quadrature phase shift keying*

OSI – *Open Systems Interconnection*

PER – *Packet error rate*

PET – Polietileno tereftalato

PSD – *Power spectral density*

REI – Rede elétrica inteligente

RF – Radiofrequência

RSSF – Redes de sensores sem fio

RSSI – *Received signal strength indicator*

SDR – *Software defined radio*

SF – Fator de espalhamento

SMA - *Subminiature version a*

SNR – Relação sinal-ruído

SPI – *Serial peripheral interface*

TC – Transformador de corrente

TCA1 – Teste em campo aberto 1

TCA2 – Teste em campo aberto 2

TCA3 – Teste em campo aberto 3

TP – Transformador de potencial

USB – *Universal serial bus*

VLSI – *Very large-scale integration*

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DO DESEMPENHO RF DE PROTÓTIPO PARA RSSF DE LONGO ALCANCE COM APLICAÇÃO EM SMART GRID

Nesta dissertação é caracterizada a resposta de comunicação por radiofrequência (RF), de um protótipo desenvolvido para Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), de longo alcance com aplicação em Redes Elétricas Inteligentes (REIs, Smart Grid). Este protótipo funciona em banda de 868 MHz configurável até 915 MHz com padrão LoRa[®]. O monitoramento de transformadores de potência é uma aplicação viável em Smart Grids. Os parâmetros de temperatura e vibração foram escolhidos para serem monitorados. Estes parâmetros estão relacionados, respectivamente, à vida útil e à falhas mecânicas em transformadores. Optou-se por utilizar a Equação de Transmissão no Espaço Livre, proposta por Friis para caracterizar a resposta RF. São comentados trabalhos correlatos, onde parte deles serviu de base para definição de metodologias utilizadas. O protótipo de nó sensor é formado por sensores de temperatura e vibração além de um microcontrolador e um módulo RF. O protótipo consome menos de 120 mW (potência média) em um cenário em que há uma transmissão de 768 bits de dados a cada 68 s. Os resultados das medições realizadas apresentam comunicação medida até 1000 m, com 99% de taxa de recepção de pacotes, em um ambiente urbano de um Campus Universitário. A comunicação estimada é de até 3450 m, compatível com o encontrado na literatura.

Descritores: Desempenho RF, Redes elétricas inteligentes, Redes de sensores sem fio

ABSTRACT

RF PERFORMANCE PROFILE OF A PROTOTYPE FOR LONG RANGE WSN ON THE APPLICATION OF SMART GRIDS

In this master's thesis, it is done a profilement of the radio frequency (RF) performance response, of a prototyped sensor node/sink node for a Wireless Sensor Network (WSN), on the application of Smart Grids (SG). This prototype uses the 868-915 MHz frequency band and features LoRa® modulation. Power transformer monitoring is a field of application in Smart Grids. We chose to monitor temperature and vibration. Those parameters are related, respectively, to the lifetime and mechanical failures in power transformers. The Free Space Transmission Equation proposed by Friis was chosen to profile the radio performance. Correlated works found in the literature provided guidance in the proposed methodology. The sensor node is composed of temperature and vibration sensors, a microcontroller and an RF module. The prototype uses less than 120 mW (average power) in a scenario where a transmission of 768 bits occurs every 68 s. The measured results show communication ranges up to 1000 m with 99% packet reception rate, over an urban environment of a University Campus. It is estimated 3450 m for the communication range, compatible with the found in literature.

Key words: RF performance, Smart grids, Wireless sensors networks

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com os avanços tecnológicos, vários tipos de sistemas utilizam comunicação sem fio, devido à redução de custos e mobilidade. Como exemplos, podem ser citados: sistemas militares, comunicação via satélite, telefonia celular, sistemas no setor industrial e rural, monitoramento de ambientes urbanos, sistemas para aplicações na área de saúde, telemetria, etc. Assim, diversas áreas têm desenvolvido sistemas nos quais a comunicação sem fio é crucial para seu funcionamento. Em particular, surgiram as redes de sensores sem fio (RSSF), que são utilizadas em diversas aplicações tais como as Redes Elétricas Inteligentes (REI).

As Redes Elétricas Inteligentes (em inglês, *smart grids*) são utilizadas para melhorar a alocação de recursos de energia aos consumidores, e, para tanto, sensores são instalados nas instalações consumidoras, rede de distribuição e nas subestações de energia. Os nós sensores geralmente são interligados a um barramento cabeado transmitindo informações a um nó centralizador que fornece estas informações a um sistema central.

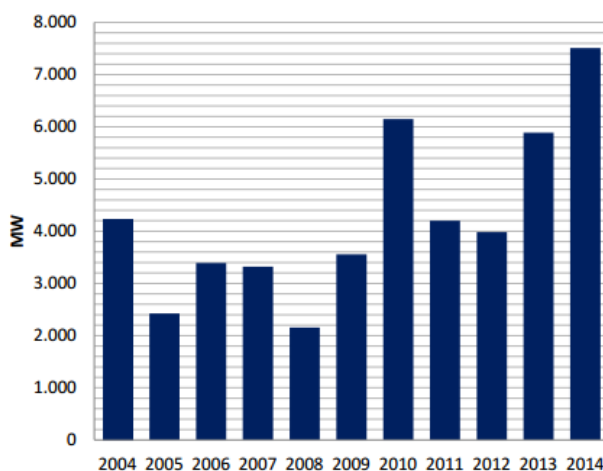


FIGURA 1 - CRESCIMENTO DA POTÊNCIA INSTALADA BRASILEIRA POR ANO, ADAPTADO DE [1].

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a potência instalada é a capacidade bruta (dada em kW) que determina o porte da central geradora para fins de outorga, regulação e fiscalização. Esta capacidade bruta é dada pelo somatório das potências elétricas ativas nominais das unidades geradoras

principais [1]. É visto na Figura 1 o crescimento da potência instalada brasileira por ano, de 2004 a 2014. A potência instalada total brasileira foi de 133913 MW ao término de 2014 [1]. É possível notar que os investimentos em potência instalada têm aumentado, uma vez que há um crescimento da potência instalada, desde 2012, de acordo com a Figura 1. Este aumento reflete ações do governo em parcerias/contratos com as companhias elétricas em direção à expansão energética.

Esta expansão ressalta a necessidade de monitoramento dos equipamentos de rede elétrica, não só nas usinas de geração, como também em toda a rede de distribuição até o usuário final. Assim, ao estruturar REIs, as concessionárias de energia poderão centralizar as informações e, a partir dessas informações, realizar ações de manutenção preditiva/preventiva, formas alternativas de cobranças além de assegurar a qualidade e confiança do abastecimento de energia aos consumidores.

No âmbito da distribuição de energia, um dos equipamentos que fazem parte da rede de distribuição elétrica são os transformadores de potência. Estes transformadores geralmente não possuem suas instalações projetadas para receber sensores cabeados. Nesse contexto, as RSSF podem ser uma aplicação viável a fim de integrar tais equipamentos elétricos às REIs. Desta forma, é importante caracterizar o enlace RF, a fim de garantir o devido funcionamento da RSSF no ambiente vislumbrado para a aplicação.

O monitoramento de transformadores de potência já foi abordado em trabalhos encontrados na revisão de literatura (capítulo 2). Nestes trabalhos os autores apontam alguns parâmetros de monitoramento como a temperatura e vibração. A temperatura e vibração, respectivamente, estão relacionadas à vida útil do transformador e a falhas mecânicas.

Objetivando caracterizar a comunicação RF, os parâmetros de temperatura e vibração foram escolhidos para serem transmitidos a partir de um nó sensor a um nó concentrador. Ambos os nós são compostos por um microcontrolador e um módulo de comunicação RF e o nó sensor possui integração com sensores de temperatura e vibração. O módulo RF opera com o padrão LoRa®. Este padrão foi concebido, para otimizar comunicações de longa distância com mitigação de ruído.

Nesta dissertação foi caracterizada a resposta de radiofrequência (RF) de um protótipo de nó sensor/concentrador, para RSSF de longo alcance vislumbrando

aplicações em REIs. O perfil de consumo de ambos os nós também foi caracterizado. O nó sensor consome menos de 120 mW (potência média) em um cenário em que há uma transmissão de 768 bits de dados a cada 68 s, e os resultados dos testes mostraram comunicação em longa distância de até 1000 m com 1% de taxa de erro para um ambiente urbano de um Campus Universitário. Estes protótipos podem ser explorados para diferentes aplicações em REIs, como o monitoramento de vibração e temperatura de superfície de transformadores de distribuição.

1.1 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

A estrutura deste documento é composta por 5 Capítulos. Esta divisão seguiu uma ordem cronológica do que foi pesquisado e feito.

No Capítulo 2 é fornecido o embasamento teórico para o trabalho além de revisão bibliográfica. É abordado o conceito de monitoramento de transformadores, parâmetros de interesse, REIs, RSSF e considerações em RF. Também é apresentada uma síntese sobre trabalhos correlatos.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada. Esta metodologia teve como base os conceitos e trabalhos correlatos apresentados no Capítulo 2. São apresentadas características particulares dos protótipos desenvolvidos bem como a descrição dos testes executados para análise do desempenho RF.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos do desempenho RF para um Campus Universitário. Por fim, no capítulo 5 são fornecidas as conclusões e considerações finais sobre o trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MONITORAMENTO DE TRANSFORMADORES

Antes de detalhar a técnica de monitoramento de transformadores, faz-se necessária uma breve explanação sobre transformadores. O transformador é um equipamento formado por mais de um enrolamento acoplado por um fluxo magnético [2]. Geralmente, os transformadores fazem parte de sistemas de potência e possuem porte que varia da ordem de kVA a MVA, e possuem vida útil de 20 a 60 anos, desde que tenham manutenção apropriada [3].

Os transformadores podem ser classificados como de sinal, neste caso, eles são utilizados para casar impedâncias como no caso de amplificadores e alto-falantes. Nesta dissertação serão tratados apenas os transformadores de potência, referenciados como transformadores. De maneira geral, estes transformadores são utilizados para elevar ou reduzir a tensão em redes elétricas.

Com o uso, os transformadores são deteriorados internamente. O desgaste interno está relacionado ao risco de falha do equipamento [3], [4], [5], [6], [7]. A falha de um transformador pode causar problemas para os estabelecimentos consumidores, para a concessionária elétrica e para o ambiente onde ele se encontra.

O monitoramento de transformadores é uma técnica que reduz problemas de interrupção de energia e eleva a confiabilidade da rede elétrica. A implementação da técnica deve apresentar autonomia, análise simples e confiabilidade. Além dessas características, a técnica não deve interferir na integridade do sistema elétrico nem apresentar manutenção excessiva [4].

Tradicionalmente, as concessionárias elétricas realizam manutenções preventivas programada nos transformadores. Geralmente, estas manutenções requerem a interrupção do fornecimento elétrico, alocação de recursos humanos e deslocamento até o local. Estes requerimentos demandam custos e há uma tendência nas concessionárias de mudar do modelo tradicional de manutenção programada para um modelo baseado nas condições do transformador [3].

O modelo de manutenção baseado em condições do transformador é vantajoso pois só serão alocados recursos quando o equipamento precisar. Além

disso, o modelo baseado em condições fornece assinaturas de futuras falhas, problemas de estresse e ajuda em planejamentos de substituição e expansão [3].

2.1.1 TRANSFORMADOR ISOLADO A ÓLEO

Existem vários tipos de transformadores. Basicamente os transformadores são agrupados em três categorias: isolados a gás, isolados secos e isolados a óleo [5].

Os transformadores isolados a gás utilizam filmes de polietileno tereftalato (PET) como isolantes em seu enrolamento e são postos em um reservatório hermeticamente fechado cheio de gás SF₆ (hexafluoreto de enxofre). O SF₆ é um composto sintético e tem desempenho dielétrico superior ao ar atmosférico. Por serem hermeticamente fechados, estes transformadores são resistentes à umidade e poeira [5].

Os transformadores secos podem ser isolados de várias maneiras. Estes transformadores geralmente têm seu enrolamento pré-aquecido e banhado em verniz isolante. O resfriamento destes transformadores é feito por dutos de exaustão a ar [5].

Os transformadores isolados a óleo são caracterizados por possuírem papel tipo Kraft (papelão) embebido, geralmente, com óleo mineral em seu enrolamento. Este óleo mineral confere tanto isolamento como resfriamento. Estes transformadores são considerados de alto risco para áreas urbanas, devido ao risco de explosão.

Os transformadores isolados a óleo são geralmente utilizados em redes aéreas de distribuição. Um exemplo de transformador de distribuição isolado a óleo é visto na Figura 2, com detalhes de cada componente e possível local de sensores.

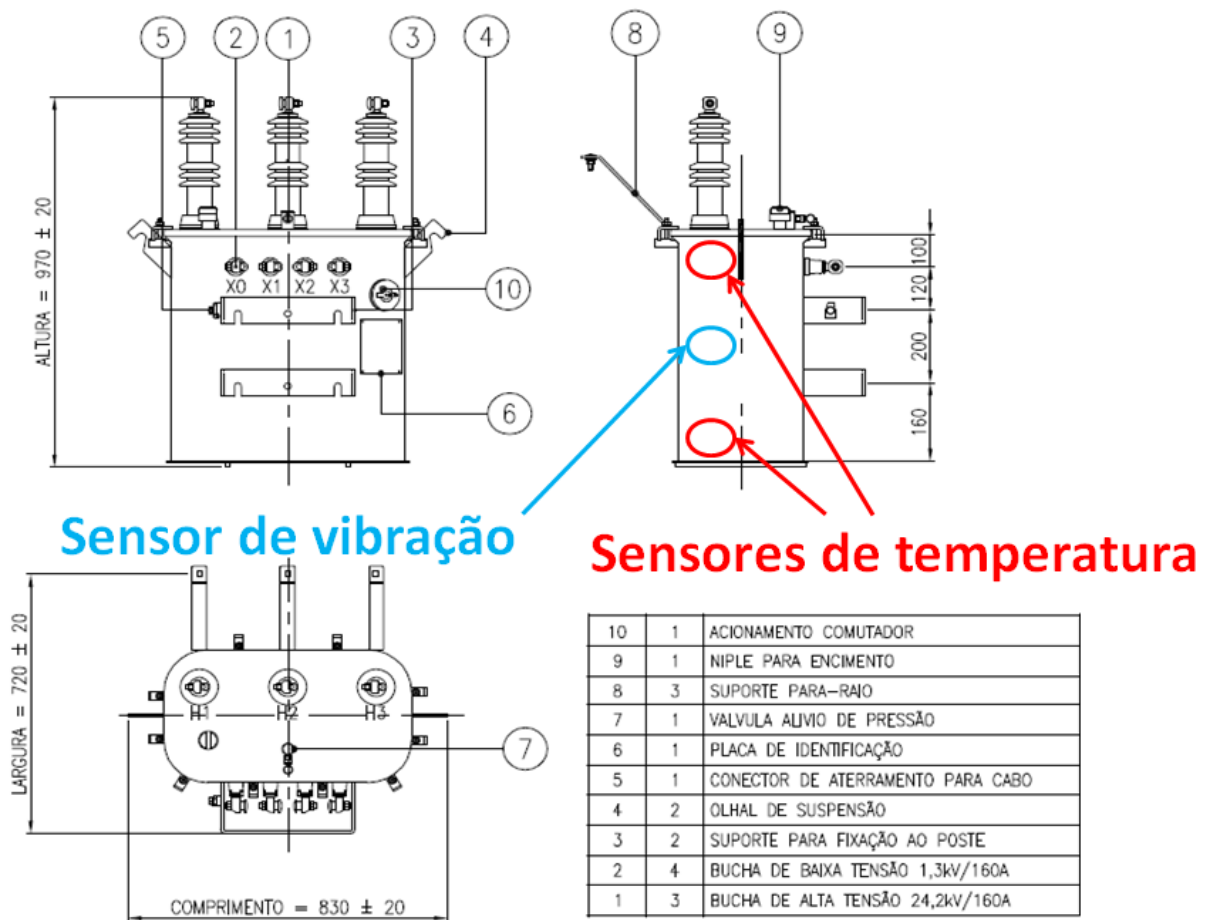


FIGURA 2 - TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO ISOLADO A ÓLEO, ADAPTADO DE [8].

Os sensores de temperatura e vibração podem ser instalados em transformadores de distribuição a fim de monitorá-los. O monitoramento das condições de um transformador se faz através de conjunto de técnicas que determinam o estado de operação do equipamento, para que se possa avaliá-lo para determinar possíveis problemas em estágios iniciais, planejar intervenções/reparos para tais problemas e acompanhar o envelhecimento do equipamento. De maneira geral, o estado de operação do equipamento é definido pela interpretação da medição de parâmetros [4], [5].

2.1.1.1 PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

a) TEMPERATURA

No Brasil, a Norma NBR 5416/1997 categoriza duas classes de transformadores: a classe 55 °C e a classe 65 °C. De acordo com a Norma, os transformadores da classe 55 °C podem ter no máximo 65 °C de diferença entre o ponto mais quente do enrolamento e a temperatura ambiente. Os transformadores da classe 65 °C podem ter no máximo 80 °C graus de diferença entre o ponto mais quente do enrolamento e a temperatura ambiente. A Norma também define a temperatura limite máxima de topo do óleo para as classes 55 °C e 65 °C, respectivamente, em 95 °C e 105 °C e de ponto mais quente em 105 °C e 120 °C. Os valores padrão indicados na Norma são semelhantes aos valores indicados em [5], listados no Quadro 1. O limite padrão de temperatura para ponto quente não deve exceder 140 °C em transformadores isolados a óleo [3].

QUADRO 1 - TRANSFORMADORES ISOLADOS A ÓLEO E SECOS, ADAPTADO DE [5].

Padrão de temperatura de aquecimento (°C)		Capacidade de sobrecarga (%)	
Isolado a óleo	Seco	Isolado a óleo	Seco / seco fundido
55	80	0	30/15
65	115	0	15/0
55/65	150	12	0/0

Em geral, a vida útil de um transformador é equivalente à vida útil de seu isolamento, o qual está intimamente relacionado com a temperatura de operação [3]. A vida útil do transformador é reduzida consideravelmente se sua temperatura de operação for alta [4]. Um aumento de 7 °C na temperatura causa o dobro de aumento na taxa de degradação do isolamento [5]. Quando a temperatura do ponto mais quente é superior aos limites de 105 °C e 120 °C, respectivamente, aos transformadores de classe 55 °C e 65 °C, a NBR5416 descreve que há o envelhecimento acelerado da celulose.

A temperatura é um parâmetro importante e com o passar do tempo provoca reações químicas no interior dos materiais isolantes fazendo com que sejam degradados, e se esta temperatura for elevada o processo de degradação é acelerado.

Há várias formas de medir temperatura em transformadores de acordo com a literatura [3], [4], [7]. O uso de infravermelho é indicado para realizar a medição de temperatura de superfície, a fim de encontrar pontos quentes e problemas internos relacionados ao resfriamento [3]. Porém, esta abordagem necessita de um operador, com equipamento de infravermelho direcionado ao transformador, para realizar a devida medição da imagem de calor.

A temperatura interna pode ser medida utilizando-se sensores de fibra ótica instalados ao longo do enrolamento [3]. O problema desta abordagem é a necessidade de instalação dos sensores na montagem do transformador. É possível estimar a temperatura do enrolamento medindo a temperatura do óleo no topo do tanque e no fundo do tanque [3].

Sensores de fibra ótica foram utilizados dentro do transformador para medir a temperatura em [4]. Entretanto, esta técnica apresenta abordagem invasiva semelhante à usada por [3].

Existem três maneiras de realizar a medição de temperatura em transformadores: medida laser, medida direta e medida indireta [7]. A medição por laser e via medida direta envolvem o monitoramento usando sensores instalados internamente no transformador. Os autores consideram a medição por laser, muito complicada. A medição direta envolve o uso de sensores óticos, de maneira similar a [3] e [4]. A medição indireta não é capaz de localizar o ponto quente, porém estima a temperatura interna do transformador. São listadas, no Quadro 2, as falhas em transformadores de um estudo feito com 359 transformadores, indicando que 63% dos transformares apresentam falha devido a superaquecimento e 10% apresentam falha devido a superaquecimento e sobrecarga de potência.

QUADRO 2 - ESTATÍSTICAS DE FALHA DE TRANSFORMADORES, SEGUNDO [7].

Tipo de falha	Número de falhas	Taxa (%)
Superaquecimento	226	63

Sobrecarga de potência	65	18,1
Superaquecimento e sobrecarga de potência	36	10
Descarga ionizante	25	7
Descarga parcial	7	1,9

A Norma NBR 5416/1997 não define como a temperatura deve ser medida. Entretanto, a Norma determina que os transformadores sejam monitorados pela sua temperatura e não só pela carga. Apesar de não especificar a forma de medição de temperatura, a Norma estabelece equações para cálculo de perdas devido a carga e equações para a estimativa do ponto quente.

Para medir a temperatura no tanque, de maneira não invasiva, podem-se utilizar circuitos integrados, termistores, termopares ou RTD, fixados na parede do tanque na parte superior e/ou inferior. O circuito integrado é recomendado pela literatura [9].

b) VIBRAÇÃO

As vibrações do transformador são de múltiplas origens tais como bobina, núcleo, enrolamento, micromovimentações de metais e descargas parciais. O uso de sensores vibracionais visa detectar falhas mecânicas no interior do transformador.

Em [10], os autores caracterizam vibrações de enrolamento e de núcleo. As vibrações de enrolamento são causadas por forças eletrodinâmicas. Estas forças são originadas das interações da corrente alternada e da corrente de fuga dos enrolamentos e são proporcionais ao dobro da corrente de carga [10].

Já as vibrações de núcleo são causadas pelo efeito de magnetoestricção dos materiais que compõem o núcleo [10]. Este efeito causa mudança no formato dos componentes devido a magnetização do núcleo. As vibrações de núcleo são da ordem do dobro da frequência da tensão e apresentam efeitos não-lineares em harmônicas ímpares.

As observações de [10] são similares às feitas por [11]. Em [11], os autores realizaram um estudo das características vibracionais em transformadores, uma primeira etapa executou testes laboratoriais. Estes testes foram feitos para

caracterizar os sinais no domínio do tempo e no domínio da frequência com transformadores em circuito aberto e fechado em frequência de 50 Hz. Os resultados apontaram que transformadores novos têm resposta senoidal de 100 Hz, transformadores usados têm aumento de harmônicas da frequência fundamental e para transformadores anômalos é comum o aumento da relação sinal/ruído mesmo em carga baixa.

Uma segunda etapa dos testes de [11] testou transformadores ativos em campo e foi constatado que para transformadores novos os resultados são similares aos resultados de laboratório da primeira etapa. Entretanto, para transformadores velhos/usados foi observado um aumento na amplitude de frequências que, segundo os autores, é devido à presença de descargas parciais e/ou degradação mecânica em geral.

Sensores vibracionais podem ser utilizados para captar o grau de vibração em transformadores. Em [10], os autores utilizaram sensores B&K 4381 e PCB 357B33 fixados ao tanque e suas posições de fixação podem ser vistas na Figura 3. Em [11], os autores também utilizaram sensores presos ao tanque, PAC R6i, Endevco 751-10 e Shadow SH-2001. As posições de fixação de sensores em [11] podem ser vistas na Figura 4.

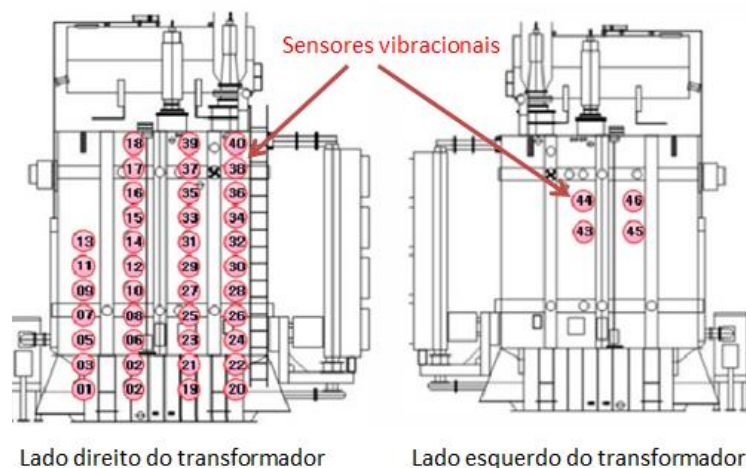


FIGURA 3 - SENSORES DE VIBRAÇÃO FIXADOS AO TRANSFORMADOR, ADAPTADO DE [10].



FIGURA 4 - SENSORES DE VIBRAÇÃO FIXADOS AO TRANSFORMADOR, ADAPTADO DE [11].

Em [12], os autores avaliaram a vibração no tanque e núcleo de um transformador. É visto na Figura 5 (A, B e C) o local em que os sensores foram instalados, e na Figura 5 (D) a potência do sinal de vibração na frequência de 100 Hz, de acordo com a tensão aplicada ao transformador e o torque de aperto do núcleo em Newton-metro (Nm). Há uma variação mais brusca da potência do sinal de vibração quando o núcleo é mais apertado (45 Nm).

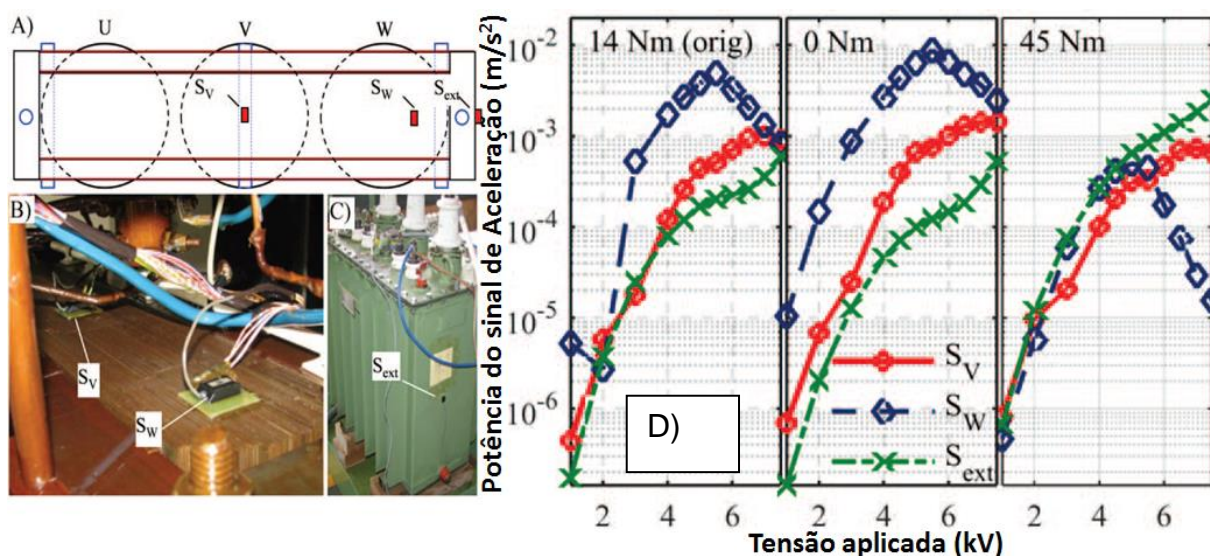


FIGURA 5 - SENSORES DE VIBRAÇÃO FIXADOS AO TRANSFORMADOR. (A) VISTA SUPERIOR. (B) VISTA INTERIOR. (C) VISTA EXTERIOR. (D) RESPOSTA DA VIBRAÇÃO DE ACORDO COM A TENSÃO NO TRANSFORMADOR E TORQUE DOS PARAFUSOS DO NÚCLEO. ADAPTADO DE [12].

Os autores recomendam que os sensores de vibração instalados no tanque sejam sempre no mesmo local, e que as medidas de um local não são comparáveis com as de outro local. Quando a vibração de um transformador é analisada a longo prazo, é necessário também comparar as medidas de vibração com uma referência, como as referências de *footprints* [12]. Neste trabalho, o sensor de vibração utilizado foi especificado apenas quanto à sensibilidade de $10 \text{ mV} / (\text{m/s}^2)$.

2.1.2 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES (*SMART GRIDS*)

As redes elétricas inteligentes podem ser definidas como redes de distribuição modernas que melhoram a confiabilidade, eficiência e segurança, alocando mais eficientemente os recursos energéticos através de controle e comunicações modernas [13], [14]. Há vários conceitos para REIs. Um ponto comum para todas as definições é o uso de elementos digitais e de comunicações [15].

As subestações modernas já podem ser consideradas “inteligentes” (*smart*), pois possuem casa de controle, operação remota de relés e outros aparelhos que realizam medições na subestação em tempo real como os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs). Estes equipamentos geralmente são caros e requerem uma infraestrutura de cabos complexa.

Devido a redução de custos e novas tecnologias em sensores, os provedores de energia estão adotando conceitos de redes elétricas inteligentes em redes de distribuição elétrica. Esta tendência é devido à necessidade criada pela incorporação de fontes de energias alternativas como a eólica e a solar (geração distribuída) bem como a demanda crescente do setor elétrico [13], [15], [16], [17], [18], [19]. Nesse contexto, as redes de sensores sem fio (RSSF) vêm sendo exploradas e abordadas em vários trabalhos. Estas RSSF visam à integração de conceitos de REIs para os sistemas de distribuição elétrica [16], [17], [18], [20], [21], [22], [23], [24] bem como monitoramento em subestações [13], [14], [25], [26], [27], [28].

2.1.3 REDES DE SENSORES SEM FIO (RSSF)

Uma RSSF é uma rede formada por nós sensores que é usada para o monitoramento sobre o ambiente e/ou equipamentos que nele se encontram. Ela é formada por nós que possuem sensores de grandezas físicas, tais como luminosidade, temperatura, pressão, etc.

Estes nós são caracterizados quanto à comunicação, dimensão física, capacidade de processamento, etc. Os recursos de hardware que os nós de RSSF possuem são limitados e dependem da aplicação. Além disso, os nós podem ter controle dinâmico do consumo de energia [29], [30]. Este controle dinâmico é essencial para diminuir o consumo de energia no nó sensor. Quando inativo, o nó sensor pode desligar áreas que não são requeridas a fim de poupar energia e até entrar em estado de hibernação. A comunicação pode ser agrupada por um nó especial concentrador (*sink node*). Geralmente, o concentrador é quem faz a comunicação dos dados da RSSF para o usuário/sistema final.

A RSSF pode apresentar topologia em malha, anel, árvore ou estrela, dependendo do tipo de aplicação. Para coberturas de áreas extensas, podem-se utilizar as topologias em malha, árvore ou estrela exemplificadas nas Figuras 6, 7 e 8 respectivamente.

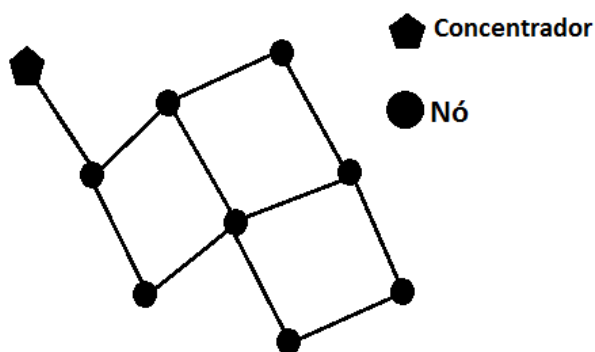


FIGURA 6 - TOPOLOGIA EM MALHA. FONTE: AUTOR.

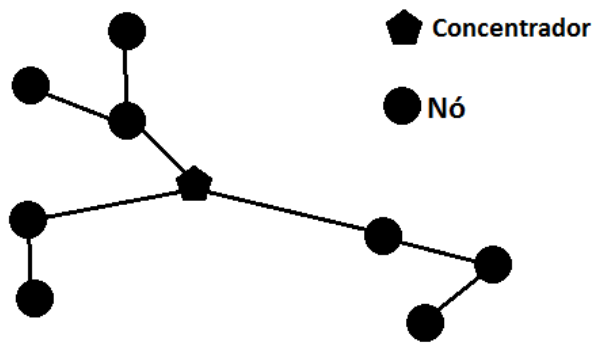


FIGURA 7 - TOPOLOGIA EM ÁRVORE. FONTE: AUTOR.

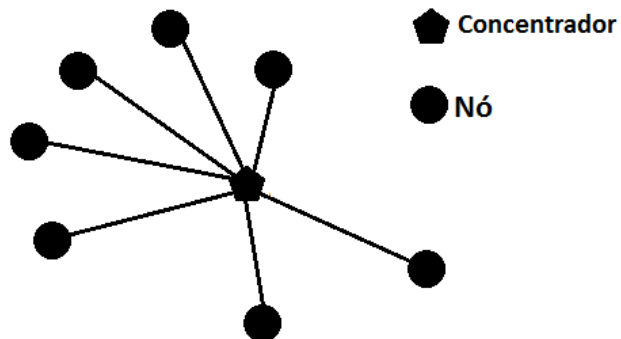


FIGURA 8 - TOPOLOGIA EM ESTRELA. FONTE: AUTOR.

Na grande maioria das implementações de RSSF estudadas, a programação é feita em nível de sistema operacional, fazendo com que programadores enfrentem diversos tipos de dificuldades. Assim, a escolha da plataforma para a RSSF requer um conhecimento técnico e aprofundado sobre a aplicação em que ela será utilizada [31], o que explica a pesquisa sobre transformadores apresentada em tópicos anteriores.

2.2 CONCEITOS EM RÁDIO COMUNICAÇÃO

As ondas de rádio frequência foram demonstradas por Heinrich Hertz que detectou e produziu ondas de rádio em 1888, depois de quase 80 anos de avanços e estudos científicos datados no começo do século XIX. Porém, a invenção do rádio como aplicação prática é atribuída a Guglielmo Marconi em 1901, quando sinais de

rádio frequência foram transmitidos da Europa (Inglaterra) à América do Norte (Canadá) [32].

Os avanços tecnológicos e científicos durante as décadas seguintes até os dias atuais tornaram possíveis o monitoramento e controle de setores industriais, rurais, residenciais, etc. utilizando RSSF. Entre estes avanços é importante citar: a comunicação celular e a teoria da informação propostas por integrantes da Bell Labs no fim da década de 1940, a produção dos transistores na década de 1950, ainda na mesma década a concepção de circuitos integrados (CI) que na década de 1970 vieram a ser altamente integrados, através do processo de *Very Large Scale Integration* (VLSI). Outros conceitos mais relevantes ao trabalho estão listados na próxima seção.

2.2.1 RUÍDO, DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA E SENSIBILIDADE

O ruído é uma perturbação aleatória presente no sinal de interesse e o desempenho de transmissão sem fio é limitado pelo ruído [32]. Devido o ruído ser um processo aleatório, trabalha-se com análise em frequência.

Uma das principais características de um sinal de ruído é sua Densidade Espectral de Potência (DSP), que é a quantidade de potência do sinal por unidade de banda (Hz). Ilustra-se a caracterização experimental da DSP de um sinal por meio da Figura 9, em que um banco de filtros é ligado a medidores de potência.

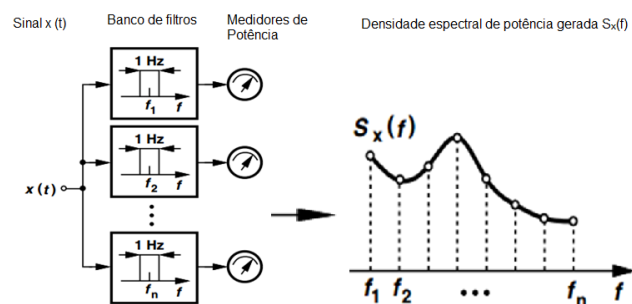


FIGURA 9 - BANCO DE FILTROS PARA AQUISIÇÃO DA PSD, ADAPTADO DE [32].

Os tipos mais comuns de ruído intrínseco são térmico, Schottky (*shot noise*), *flicker* e geração-recombinação. Cada tipo de ruído possui sua DSP definida e estão listadas no Quadro 3, onde a constante de Boltzmann (k) é $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, T é a

temperatura absoluta, R a resistência sob temperatura T , q é a carga do elétron, K_f é uma constante específica do dispositivo, A é uma constante que depende da variância do número de portadoras do dispositivo, τ é o tempo característico de recombinação de cada processo e I é a corrente.

QUADRO 3 - DSP POR TIPO DE RUÍDO.

Tipo de ruído	DSP	Origem
Térmico	$4kTR$ (V^2/Hz)	Agitação térmica
<i>SHOT</i>	$2qI$ (A^2/Hz)	Passagem de barreira de potencial
<i>Flicker</i>	$K_f \cdot I^n/f$ (A^2/Hz)	Não há origem universal
Geração-recombinação	$\frac{A}{1 + (2\pi f\tau)^2}$ (V^2/Hz)	Recombinação de elétrons e lacunas

A sensibilidade de um receptor é definida como a potência mínima de sinal que o receptor pode detectar com “qualidade aceitável”, que depende do nível de relação sinal-ruído (SNR), da corrupção do sinal aceitável (como por exemplo, a taxa de erro de bits) e do tipo de modulação do sinal. Matematicamente a SNR e a sensibilidade são definidos respectivamente em (3.1) e (3.2) [32].

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log (P_{\text{SINAL}} / P_{\text{RUÍDO}}) \quad (3.1)$$

$$P_{\text{mín}} \text{ (dBm)} = -174 \text{ (dBm/Hz)} + 10 \log (\text{SNR}_{\text{entrada}} / \text{SNR}_{\text{saída}}) + 10 \log (B) + \text{SNR}_{\text{mín}} \quad (3.2)$$

Para 3.2 o primeiro termo é o ruído térmico em temperatura ambiente em 1 Hz de largura de banda, o segundo termo é a Figura de Ruído do receptor, B é a largura de banda em Hz e o último termo é a SNR necessário pela modulação.

2.2.2 EQUAÇÃO DE TRANSMISSÃO NO ESPAÇO LIVRE

A equação de transmissão no espaço livre proposta por Friis em 1946 é amplamente aceita e usada até os dias atuais. A equação é definida em (4) [33], onde P_{RX} é a potência de recepção, P_{TX} é a potência de transmissão, G_{RX} é o ganho

da antena de recepção, G_{TX} é o ganho da antena de transmissão, λ é o comprimento de onda, d a distância entre as antenas.

$$P_{RX} / P_{TX} = G_{RX} \cdot G_{TX} \cdot (\lambda / 4\pi d)^2 \quad (4)$$

Para ambientes fora do espaço livre, o expoente do último termo é chamado de expoente de perda de caminho (N), que é um valor tipicamente entre 2 e 6, que varia de acordo com o ambiente, podendo ser obtido empiricamente [34].

A equação (4) mostra que a potência recebida P_{RX} decai conforme o quadrado da distância d se $N = 2$ (espaço livre). Assim, P_{RX} decai 20 dB/década. Por exemplo, na Figura 10 é mostrado o gráfico de potência recebida com o uso da equação (4) para $P_{TX} = 10$ dBm, $G_{TX} = G_{RX} = 2,5$ dBi e $\lambda = 0,346$ m (868 MHz).

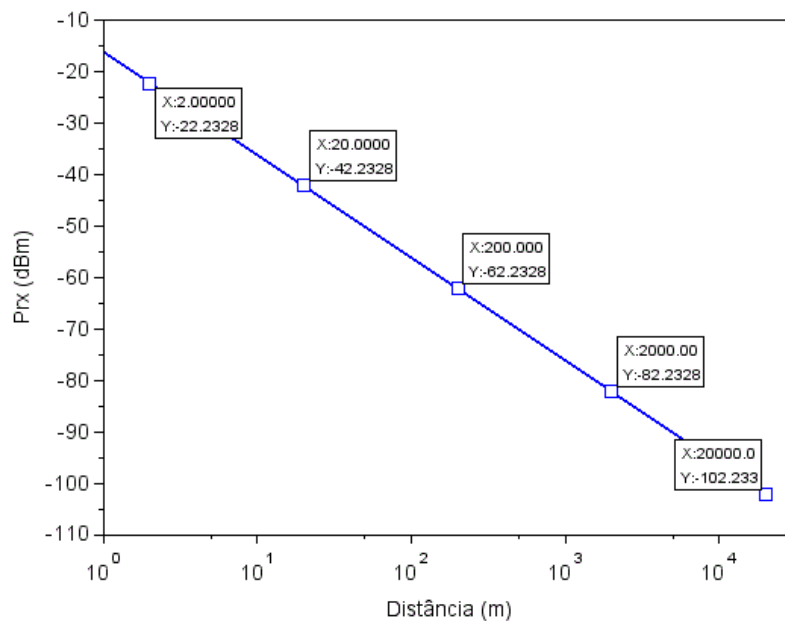


FIGURA 10 - CURVA DA DISTÂNCIA PELA POTÊNCIA RECEBIDA USANDO (4). FONTE: AUTOR

Os pontos em evidência na Figura 10 são de: 2 m (-22,23 dBm), 20 m (-42,23 dBm), 200 m (-62,23 dBm), 2 km (-82,23 dBm) e 20 km (-102,23 dBm). Estes pontos exibem a queda de 20 dB/década. No caso de um transceptor que tenha uma sensibilidade de -100 dBm o alcance, com base na equação (4), será de aproximadamente 20 km no espaço livre.

2.3 REVISÃO DE LITERATURA DE TRABALHOS CORRELATOS

As redes de sensores sem fio trazem várias melhorias na comunicação para concessionárias elétricas [13]. Dentre estas melhorias a integração de informações da rede elétrica de geração, transmissão e distribuição apresentam-se com destaque para monitoramento de equipamentos e telemetria de variáveis.

Entretanto, quando a comunicação via redes de sensores é utilizada em ambientes de perfil elétrico complexo há limitações. Estas limitações estão diretamente relacionadas ao ambiente onde as RSSFs atuam. Tais ambientes estão sujeitos a ruído impulsivo que é proveniente de equipamentos elétricos. Os equipamentos elétricos podem gerar descargas parciais e arcos elétricos, causando assim ruído impulsivo. O ruído impulsivo geralmente é composto por uma série de oscilações com uma vasta potência espectral, num pequeno tempo de duração [35].

Em [13], foi empiricamente medido o impacto na comunicação RF em ambientes de perfil elétrico complexos. Os autores utilizaram rádios CC2420, que possuem sensibilidade de -94 dBm, operando na frequência de 2,4 GHz para realizar transmissões com até 20 m de distância em diferentes ambientes: uma subestação de 500 kV, próximo a um transformador subterrâneo e uma sala de controle da subestação.

Para o ambiente de subestação de 500 kV, os autores verificaram que o ruído de fundo é aproximadamente -105 dBm, enquanto nos outros dois ambientes o ruído de fundo é cerca de -90 dBm. Os autores também afirmam que estes valores servem de referência para futuras aplicações de redes de sensores sem fio. Adicionalmente, os autores realizaram estudo de correlação entre a taxa de pacotes recebidos, o indicador de potência do sinal recebido (RSSI) e o indicador de qualidade de enlace (LQI).

Em [14], os autores utilizaram um transceptor operando em 2,4 GHz, com chipset Nordic nRF2401, para transmissão de dados de aquisição em uma subestação. Os autores verificaram que para distâncias superiores a 100 m a comunicação sofre interferência que impossibilita a comunicação de dados, que até 90 m de distância a comunicação apresenta cerca de 10% de PER (taxa de erro de pacote).

Outros trabalhos realizaram estudos sobre uso de rádio frequência para telemetria em ambientes próximos a equipamentos de alta tensão, [35], [36] e [37] apresentando relevante importância para o objetivo deste trabalho.

Em [35] os autores fizeram uma caracterização de ruído impulsivo em bandas 915 MHz, 2,4 GHz e 5-6 GHz. Em um primeiro momento, foi realizada a captura de dados em uma subestação isolada a ar. Esta amostra de dados indicou a influência direta do valor da alta tensão no ruído impulsivo (quanto maior a tensão, maior a amplitude e duração do ruído).

Porém, por questões de dificuldade e limitação no controle do ambiente, os autores realizaram uma segunda etapa de captura de dados em um ambiente de laboratório para avaliar o impacto do ruído impulsivo. Para a segunda etapa, os dados foram capturados em ambiente de laboratório usando uma barra de geração para tensões de 2 kV a 12 kV e uma bobina de tesla com *gaps* de 2,5 mm, 3,5 mm e 5 mm.

Os resultados indicaram que quanto menor o *gap*, maior é a amplitude do ruído e da potência do espectro em direção as bandas de comunicação sem fio (900 MHz, 2,4 GHz e 5-6 GHz). Os autores sugerem cuidado ao implementar redes de sensores em subestações de energia, levando em conta o equipamento, a dimensão dos isolantes, a presença de arcos elétricos e a tensão de alimentação.

No trabalho [36], os autores realizaram um estudo simulado de desempenho para o padrão IEEE 802.11n (5 GHz) em uma subestação elétrica. O estudo usou como parâmetro de qualidade a taxa de erro de bits (BER) para transmissão e recepção para dois arranjos de antenas. O primeiro arranjo foi composto de duas antenas para transmissão/recepção e o segundo foi composto por apenas uma antena para transmissão/recepção, ambos quando influenciados pelo ambiente de alta tensão e quando sob influência de um ruído branco. Os resultados afirmam que o ruído do ambiente de alta tensão causa mais degradação no desempenho do que quando sob influência do ruído branco, e que mesmo usando um arranjo de duas antenas para transmissão/recepção, os resultados não compensaram a perda de desempenho.

Em [37] os autores tratam de uma análise simulada de ruído impulsivo em bandas em torno de 915 MHz e 2,4 GHz. Os autores informaram que o ruído impulsivo pode apresentar espectro em bandas de até 3 GHz, influenciando as

frequências de operação de rádio frequência (porém, conforme já mencionado, em [35], foi mostrado que o ruído impulsivo de subestações pode influenciar também as bandas de 5-6 GHz). Para a avaliação dos resultados, o BER foi o indicador da qualidade (quanto menor, melhor), variando-se a distância e a amplitude do sinal também variada, sempre mantendo uma relação SNR fixa. Os resultados indicaram melhor desempenho da banda de 2,4 GHz em relação à banda de 915 MHz. Os autores sugeriram que a faixa de 915 MHz seja usada para sensores de descargas parciais, já que ela é mais sensível a descargas parciais, e pode, portanto, servir de detector de sua ocorrência.

Outros trabalhos relevantes realizaram estudos simulados sobre ruído branco [38] e interferência eletromagnética [39] e suas influências em transceptores IEEE 802.15.4.

Em [38], foi realizado um estudo simulado de transceptor sem fio baseado no padrão ZigBee para 915 MHz e 2,4 GHz de baixo consumo para REIs. As simulações do estudo foram feitas com auxílio do software MATLAB usando os requisitos de *direct sequence spread spectrum* (DSSS) e modulação *offset quadrature phase shift keying* (OQPSK) para bandas de 915 MHz e 2,4 GHz, com inclusão de ruído branco gaussiano e um sinal enfraquecido baseado em *Rayleigh flat-fading*. O indicador de qualidade foi o BER e os resultados do experimento indicaram que o BER de um transceptor DSSS pode chegar ao limiar de 10^{-5} e este valor é limitado pelo protocolo ZigBee para uma relação SNR de 6 dB. Assim, os autores confirmaram que o padrão ZigBee é resistente a ruído.

No estudo [39], os autores avaliaram de forma simulada a confiabilidade de redes ZigBee sob interferência eletromagnética. O estudo também define uma forma de determinar a quantidade de nós redundantes necessários para se alcançar uma desejada confiabilidade. A interferência eletromagnética foi inserida diretamente na rede cabeada, e tem características impulsivas. Esta interferência é considerada pior, quando comparada com o ruído branco. O indicador de qualidade foi a taxa de erro de pacote (PER). Os autores relataram que a rede ZigBee é impactada de acordo com o nível do ruído. Dessa forma, se a correlação do tipo de ruído aumentar, o PER também aumenta, bem como a necessidade de proximidade dos nós e suas potências de transmissão para que a confiabilidade se mantenha. Os

autores sugeriram que técnicas de mitigação sejam usadas como canal adaptativo e processamento digital de sinal para remoção de ruído.

Os trabalhos apresentados nesta seção possuem características comuns que são elencadas abaixo:

- A RSSF para REIs deve possuir nós de baixo consumo, autônomos, escaláveis e flexíveis;
- Deve-se levar em conta as características físicas do equipamento elétrico a ser monitorado tais como dimensão dos isolantes e tensões para se ter ideia do grau de influência de ruídos impulsivos;
- Os nós sensores devem apresentar poder de mitigação de ruído.

2.3.1 SISTEMAS DE RÁDIO TRANSMISSÃO

a) IEEE 802.15.4 E ZIGBEE

A especificação IEEE 802.15.4 estabelece um padrão de comunicação sem fio na camada física e camada de enlace (camada 1 e 2 respectivamente do modelo OSI). Sua função é permitir a comunicação entre dispositivos que utilizem o mesmo padrão, assim, dispositivos de fabricantes diferentes podem se comunicar contanto que obedeçam ao padrão. O padrão também define diretivas que favorecem o baixo consumo tais como taxa de dados de 20 kbps, 40 kbps, 250 kbps e controle de potência além de trabalhar em banda ISM (banda industrial, científica e médica de 868 MHz, 915 MHz ou 2,4 GHz).

O padrão 802.15.4 utiliza a técnica de espalhamento em espectro (*Direct Sequence Spread Spectrum*) para modular o sinal de informação. Este processo de modulação faz com que o sinal de informação ocupe um amplo espectro, porém com menor densidade de potência. Dessa forma, a modulação provê robustez contra ruído, melhorando o SNR do sinal visto pelo receptor além de ser decodificado com facilidade. A potência de transmissão mínima definida pelo padrão IEEE 802.15.4 é de -3 dBm e a sensibilidade mínima de -92 dBm.

Já o padrão ZigBee foi arquitetado para trabalhar nas camadas superiores a do padrão 802.15.4, ou seja, a partir da camada de nível 3 do modelo OSI. Este

padrão foi projetado por um conjunto de empresas que fazem parte da ZigBee Alliance. Sua função é prover serviços de topologia de rede, serviços de segurança e de comunicação com as camadas superiores do modelo OSI.

Em [26], os autores utilizaram módulos XBee-PRO da Digi, com taxa de 250 kbps operando em 2,4 GHz, que conta com topologia em estrela, malha e árvore, esta última foi utilizada pelos autores para transmitir pacotes de 47 bytes a cada 26 s. O trabalho dos autores contou com 2 nós sensores/atuadores, 2 nós roteadores e 1 nó concentrador (coordenador) distribuídos em dois pátios de alta tensão de 525 kV e de 138 kV com respectivas distâncias de 180 m e 230 m. O valor médio do RSSI para o coordenador são de -85 dBm dos roteadores e -85 dBm dos nós sensores. Porém, quando os nós sensores se comunicaram diretamente com o coordenador o RSSI reportado foi de -90 dBm para o sensor do pátio de 525 kV e de -95 dBm para o sensor do pátio de 138 kV.

Os trabalhos [9], [16], [17] e [18] utilizaram rádios ZigBee CC2530 da Texas Instruments. Os autores informam que a topologia utilizada foi árvore, consumo de até 40 mW para transmissão e que para distâncias de até 700 m o valor médio do RSSI recebido é -92 dBm. Os autores não quantificaram a taxa de dados utilizada nem a frequência de operação do rádio.

Em [13], os autores utilizaram em seu trabalho dois nós 802.15.4 com rádio CC2420 da Texas Instruments, para distâncias de 1 m até 20 m com incrementos de 1 m. A potência de transmissão foi definida em -25 dBm para transmissão de 20 pacotes com 30 bytes de dados cada. A taxa de transmissão foi fixada em 250 kbps e a frequência de operação em 2,4 GHz enviando dois pacotes por segundo. Os autores apontam que os resultados de RSSI possuem pouca correlação com a taxa de recebimento de pacotes. Assim, mesmo com RSSIs reportados próximos ao limiar de sensibilidade a taxa de perda de pacotes mostrou-se variável. Entretanto, os autores apontam que as medidas são apenas de referência e que dependem do ambiente de propagação.

Os autores, em [25], utilizaram módulos CC430F5137 da Texas Instruments que operam com o transceptor CC1101 (também da Texas) em 433 MHz com topologia em malha. Os autores reportaram necessidade de nós roteadores a cada 200 m para potências de transmissão de 10 dBm com corrente de 26 mA quando os sensores estão ativos.

Alguns trabalhos não tratam informações relevantes no que diz respeito à rádio transmissão, tais como potência de transmissão, medidas de RSSI, taxa de dados e/ou outras características como o consumo. São eles [20], [21], [22], [27] e [28].

O trabalho de [20] utilizou módulos EZ430-RF2500 (rádio CC2500) da Texas Instruments que operam em 2,4 GHz. O trabalho de [21] utilizou módulos IRIS da Crossbow compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4. Em [22] os autores utilizaram módulos ZigBee Jennic em 2,4 GHz, não foi especificado o modelo. O trabalho de [27] utilizou módulos 802.15.4 Micaz da Memsic em 2,4 GHz para transmissões em laboratório de 12 m a 17 m de distância a cada 4 minutos, os autores reportaram consumo médio de 0,3 mW. O trabalho [28] utilizou módulos CWDP1203 da Shenzhen Coolwave em 433 MHz para distâncias de até 450 m.

Os trabalhos deste subtópico são correlatos à área de monitoramento em ambientes de perfil elétrico complexo. Os trabalhos estudados apresentam distâncias de medições de até 700 metros. O próximo subtópico fará a apresentação do padrão LoRa® e apresentará trabalhos estudados que utilizam este padrão.

b) LORA

O padrão LoRa® (acrônimo para *Long-Range*), referenciado por apenas LoRa, especifica uma camada física de comunicação proprietária (camada 1 no modelo OSI). Este padrão foi concebido pela Semtech Corporation. Em 2015 foi criado o consórcio LoRa Alliance, semelhante ao ZigBee Alliance. A função do LoRa é permitir a comunicação entre dispositivos via rádio frequência, otimizando-os para longas distâncias.

O LoRa usa uma técnica de espalhamento em espectro tipo *chirp* para modular o sinal de informação. Assim, de maneira similar ao padrão 802.15.4, a modulação amplia o espectro, porém com frequência variável (controlada). Esta diferença provê capacidade de recuperar a informação mesmo quando o sinal está degradado ou até abaixo do nível de ruído [40], [41], [42], [43]. Além disso, o LoRa utiliza uma técnica de correção de erros FEC (*Forward Error Correction*) dependente da taxa de códigos (CR), que permite a recuperação de informação quando há corrupção devido ao ruído. Os valores do CR são configuráveis de 1 a 4 e geram um

CR equivalente a $4/4+CR$ que vão de $4/5$ até $4/8$. Assim, a cada 4 bits do pacote LoRa, CR gera de 5 bits a 8 bits, dos quais ao menos um bit 1 é redundante. Esta técnica de correção causa um *overhead* (sobrecusto) na transmissão devido a dados adicionais de correção [41], [42].

A família de chips Semtech Sx127x implementam o padrão LoRa. Estes chips foram desenvolvidos para operar na banda de 137 MHz até 1020 MHz, porém há uma implementação em 2,4 GHz desenvolvida pela EM Microelectronic [43]. A largura de banda é configurável entre 7,8 kHz até 500 kHz. Além disso, a sensibilidade do transceptor pode chegar até -148 dBm variável de acordo com o fator de espalhamento (SF) utilizado e a largura de banda [42]. O SF é configurável e varia de 6 a 12, quanto maior o SF, melhor é a sensibilidade do LoRa.

Quanto ao consumo de corrente, a família de chips Sx127x utilizam até 125 mA para transmissão em 20 dBm, enquanto em modo de recepção 11 mA. No quesito taxa de transmissão, os chips podem trabalhar de 18 bps até 40 kbps.

Adicionalmente, a Semtech dispõe de um *software* LoRa Calculator que serve para calcular taxa de transmissão, estimativa de consumo de corrente, etc [45]. Como o transceptor é programável, pode-se adaptá-lo de acordo com as necessidades de cada aplicação. Assim, o ajuste entre sensibilidade, consumo, taxa de transmissão, e fator de correção é personalizável.

O pacote LoRa é visto na Figura 11, que é composto por um preâmbulo, que serve para sincronizar o receptor com os dados a serem recebidos (deve ser conhecido pelo receptor), um cabeçalho opcional, que provê informações sobre o número de bytes e a taxa de CR, o *payload* (dados) e o código de verificação de redundância cíclica (CRC), que serve para checar se há erros.

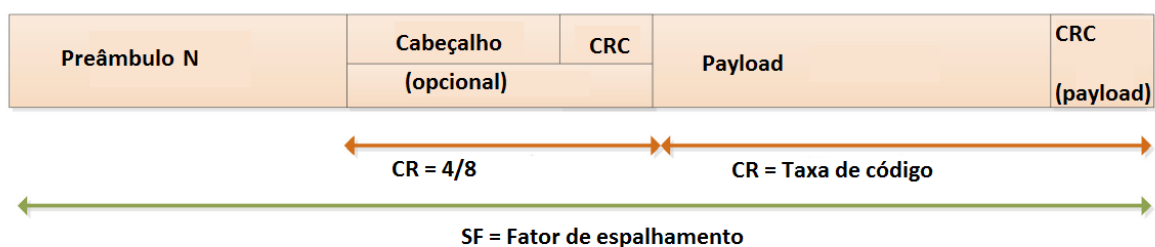


FIGURA 11 - CABEÇALHO DE PACOTE LORA, ADAPTADO DE [42].

Alguns trabalhos com LoRa encontram-se na literatura [46], [47], [48], [49]. Os trabalhos [46], [47] e [48] realizaram testes empíricos de alcance e qualidade. O trabalho [49] apresentou implementação de uma rede de sensores usando LoRa em uma zona rural.

O trabalho [46] apresentou dois cenários de medições em uma cidade costeira para caracterização do padrão LoRa, em 868 MHz. A estação de recepção foi a mesma para os dois cenários, contando com uma antena de 2 dBi posicionada a 24 m de altura. O primeiro cenário contou com um nó fixado ao teto de um carro para testes terrestres. O segundo cenário contou com um nó fixado a um barco para testes em mar. A potência de transmissão foi de 14 dBm em ambos os cenários. Não foi mencionado o tamanho do *payload*. Os resultados estão sumarizados no Quadro 4.

Além dessas medições, os autores calcularam empiricamente o expoente de perda de caminho N da eq. 4, para o cenário terrestre N é 2,32 e para o bote N é 1,76. Os resultados indicam que para ambientes urbanos a perda está relacionada diretamente com a distância bem como obstáculos no caminho apresentando expoente N maior que 2. Enquanto os resultados para medição no barco indicam comunicação até 30 km. Além disso, devido ao espaço aberto e o expoente N calculado foi menor que 2.

QUADRO 4 - RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE [46].

Distância (km) (intervalo)	Pacotes (un.)		RSSI (dBm) (intervalo)	Taxa de perda (%)
	Tx	Rx		
00 a 02 (carro)	894	788	> -90	12
02 a 05 (carro)	1215	1030	-90 a < -110	15
05 a 10 (carro)	3898	2625	-90 a < -110	33
10 a 15 (carro)	932	238	-90 a < -110	74
05 a 15 (barco)	2998	2076	< -110	31
15 a 30 (barco)	690	430	< -110	38

Em [47], os autores apresentaram medições ao longo de um rio (zona rural) em 868 MHz. A estação de recepção foi posicionada a 22 m de altura. Os autores informaram os parâmetros de SF = 10, CR = 2 e largura de banda de 250 kHz. Os

resultados para 100 bytes de dados enviados estão sumarizados no Quadro 5, evidencia-se a confiabilidade do LoRa para transmissões em longa distância para zonas rurais de até 7,4 km, visto que todos os pacotes transmitidos foram recebidos com taxa de perda de 0%, porém a taxa de erro foi de 24,4%, ou seja, mesmo recebidos todos os pacotes quase um quarto deles foram descartados.

QUADRO 5 - RESULTADOS DE MEDIÇÃO PARA 100 BYTES [47].

Distância (km)	Pacotes (un.)			Taxa de erro (%)	SNR (dB) (média)	RSSI (dBm) (média)	Taxa de perda (%)
	Tx	Rx	Válidos				
0,276	1000	1000	1000	0	> 0	-85	0
0,580	1000	1000	1000	0	> 0	-82,3	0
0,959	1000	1000	1000	0	> 0	-94	0
1,346	1000	1000	1000	0	> 0	-102,5	0
2,302	1000	1000	1000	0	-4,5	-118,5	0
3,575	1000	1000	997	0,3	-6,3	-120,3	0
5,031	1000	1000	1000	0	-6,3	-120,3	0
6,056	1000	1000	1000	0	-6,9	-120,9	0
6,667	1000	1000	927	7,3	-12,8	-126,8	0
7,482	500	500	378	24,4	-14,3	-128,3	0
8,149	500	0	0	-	-	-	100

Em [48] foram apresentados resultados de confiabilidade de transmissão do LoRa em 2,4 GHz. Os autores propuseram quatro cenários distintos. O primeiro cenário foi a comunicação de dispositivos LoRa com até 3 paredes de concreto como obstáculos com diferentes SF. O segundo cenário foi a comunicação entre transceptores num mesmo andar de um prédio com área de 600 m² em comparação com rádios Bluetooth. O terceiro cenário foi a comunicação de longa distância de 9,75 km, em visada direta com duas posições de antena, com SF de 12 e CR de 4. O quarto cenário foi a comunicação de dispositivos LoRa distantes de 2 metros com SF de 9, quando um é imerso em um tanque com volume de 0,2 m³ de solução salina com 0,77% de concentração. O mesmo quarto cenário foi repetido com rádios Bluetooth.

Os resultados reportados pelos autores, para o primeiro cenário, indicam que o SF=12 apresenta a melhor confiabilidade com 33% dos pacotes entregues (67% de PER), quando o número de paredes são 3, enquanto os outros SF apenas realizaram transmissão até 2 paredes. Quanto ao segundo cenário, apenas dois dispositivos LoRa são necessários para comunicação, enquanto que para rádios Bluetooth são necessários pelo menos quatro. No terceiro cenário os resultados indicaram que 81,58% dos pacotes foram recebidos quando a antena foi diretamente polarizada e que pouco mais de 50% dos pacotes foram recebidos quando a antena foi polarizada de maneira diferente. Por último, os resultados apontaram recepção de 94,5% para dispositivos LoRa quando o transmissor está até 12 cm de distância da parede do tanque além desta distância não houve comunicação, enquanto que para rádios Bluetooth não houve comunicação alguma.

Em [49] os autores utilizaram o LoRa para a telemetria do nível de água em celeiros de zona rural. Os autores propuseram uma rede de sensores sem fio distribuída em 5 celeiros de distâncias variadas. Em cada celeiro, a antena do nó sensor foi posicionada de duas maneiras. O transmissor foi elevado em 6 m de altura, enquanto o receptor a 8 m. Os resultados estão sumarizados no Quadro 6.

QUADRO 6 - RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE [49].

Distância (km)	Polarização da antena	RSSI (dBm)
0,5	Vertical	-96
	Horizontal	-98
1	Vertical	-100
	Horizontal	-101
1,5	Vertical	-100
	Horizontal	-102
2,2	Vertical	-103
	Horizontal	-103
2,7	Vertical	-103
	Horizontal	-104

Tratando das medições de [49], no Quadro 6, evidencia-se uma melhora de 1 a 2 dBm quando a polarização da antena é vertical. Este efeito pode ser uma particularidade do tipo de antena utilizado ou do próprio meio de propagação.

Os trabalhos estudados neste subtópico possuem características comuns, que serão tomadas como referência para parte da proposta de um sistema e para a parte metodológica de testes (capítulo 3):

- O padrão LoRa apresenta-se como promissora solução para REIs contando com ampla personalização, escalável e flexível e com grau superior de imunidade a ruído uma vez que pode operar com SNRs negativos, além de implementar técnica de FEC;
- Deve-se levar em conta características físicas do ambiente a ser monitorado tais como distância, anteparos, obstáculos, etc. para se ter ideia do comportamento do canal;
- Medições experimentais são recomendadas, uma vez que a polarização das antenas pode afetar a transmissão, além da caracterização empírica do canal seguindo a eq. 4 e parte do modelo proposto por [46].

2.4 COMENTÁRIOS

Foi apresentado neste capítulo uma revisão de literatura que confirma uma crescente tendência no tocante a flexibilidade, escalabilidade e imunidade a ruído quando utilizadas as RSSF em ambientes com perfil elétrico complexo.

O estado da arte traz o monitoramento de equipamentos elétricos com redes IEEE 802.15.4/ZigBee. Porém, com o advento do LoRa e baseado nos estudos feitos, foi desenvolvido um protótipo de nó sensor/concentrador para funcionar com o padrão LoRa. A metodologia de testes e os protótipos são detalhados no capítulo 3.

3 METODOLOGIA

3 METODOLOGIA

O t3pico de revis3o de literatura norteou parte das decis3es tomadas na metodologia da disserta3o. Assim, as seguintes caracter3sticas de RSSF foram contempladas: flexibilidade, escalabilidade, longa dist3ncia e mitiga3o de ru3ido.

Para realizar a caracteriza3o de resposta RF, foram escolhidos microcontroladores Atmel ATmega328p, comercialmente fornecidos pela RobotDyn, como placa de desenvolvimento codinome NanoV3, para serem parte do n3o sensor/concentrador. Esta placa de desenvolvimento foi escolhida devido 3 flexibilidade, 3 escalabilidade e ao tempo de prototipagem (≤ 6 meses). Estas placas s3o compat3veis com o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Arduino. Adicionalmente, a placa 3 alimentada por uma tens3o de 5 V, disp3e de 14 pinos digitais, 6 entradas anal3gicas, que atendem os requisitos dos sensores e do m3dulo RF, um cristal oscilador de 16 MHz, uma conex3o USB e um bot3o de reset. Al3m disso, fornece sa3da de alimenta3o em 5 V ou 3,3 V e corrente de at3 180 mA.

No que se refere aos sensores de temperatura e vibra3o foram escolhidos respectivamente o LM35 da National Semiconductors e MPU-6050 da Invensense. O LM35 3 um circuito integrado (CI) com sa3da anal3gica linear de 10 mV/3C que pode medir de -55 3C at3 +150 3C [50]. Este CI 3 recomendado pela literatura [9]. Sua corrente DC, quando ativo, foi medida com um mult3metro Agilent U125213, resultando em um valor de 61,1 μ A para uma tens3o de alimenta3o de 5 V provida pelo NanoV3.

O sensor MPU-6050 da Invensense 3 um sistema microeletromec3nico (MEMS) capaz de medir acelera3o triaxial em escalas de ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g, ou ± 16 g. Em [12], os autores medem pot3ncia de vibra3o na ordem de 10^{-7} (m/s²), cerca de 1 mg, ao determinar a raiz quadrada e converter para g. O sensor MPU-6050 pode medir vibra3o da ordem de 61 μ g, se configurado na menor escala, devido ao seu conjunto de ADCs de 16 bits. O sensor pode ser configurado para acionar um sinal de interrup3o, caso seja detectado um limiar de vibra3o. Em [26], os autores utilizam um sensor aceler3metro MEMS LIS3DH da ST Microelectronics, para sinalizar interrup3es relacionadas a eventos em chaves-fus3veis.

Nos testes de campo, o sensor foi configurado para a menor escala, objetivando a caracteriza3o experimental do n3vel de vibra3o residual presente no

ambiente, tendo o sensor sido colocado numa plataforma inerte. Para testes em laboratório, foram considerados os níveis de vibração geralmente constatados na bibliografia. Neste caso, o sensor foi configurado para a maior escala, evitando a saturação que ocorreria caso tivesse sido programado com sua menor escala. Em ambos os casos, o sensor foi devidamente ajustado com a referência de 16384 LSB/g para a menor escala e de 2048 LSB/g para a maior escala [51]. Sua corrente DC, quando ativo, foi medida com um multímetro Agilent U125213, resultando em um valor de 5,5 mA para uma tensão de alimentação de 5 V provida pelo NanoV3.

Quanto à comunicação RF, foi escolhido o módulo inAir9b da Modtronix para trabalhar em conjunto com o microcontrolador. A escolha deste módulo está relacionada ao seu chipset baseado no SX1276 da Semtech, que usa o padrão LoRa, placa PCB multicamada otimizada para aplicações RF (com design aprovado pela Semtech) e comunicação/programação via interface serial de periférico (SPI). O inAir9b é alimentado por uma tensão de 3,3 V, provida pelo NanoV3, pode operar em frequência 868-915 MHz, conexão coaxial SMA (50Ω) para antenas ou *pigtails*, e fornece até 20 dBm (100mW) de potência de saída. Sua corrente DC, quando ativo, foi medida com um multímetro Agilent U125213, para três potências de transmissão. As potências de 5 dBm, 13 dBm e 20 dBm resultaram, respectivamente em valores de 12,8 mA, 52,4 mA e 92,8 mA.

No quesito antenas, foram utilizadas antenas oriundas do kit educativo ME1000 da DreamCatcher. As antenas possuem ganho de 2,5 dBi na faixa de 806 MHz a 960 MHz, polarização predominantemente vertical e 21 cm de comprimento.

O microcontrolador foi programado com uso do Arduino IDE, disponível em www.arduino.cc. Existe um repositório de bibliotecas que são utilizadas para a programação destes microcontroladores. Dessa forma, foi utilizada a biblioteca RadioHead versão 1.57, fornecida pela AirSpayce disponível em www.airspayce.com. A biblioteca possui licença de uso GPL2, de código aberto, disponível em www.gnu.org. Assim, foi possível fazer ajustes necessários na biblioteca para que esta fosse enquadrada ao domínio da aplicação. Estes ajustes foram disponibilizados à comunidade *open source* da biblioteca, conforme especifica a licença, e um *patch* de correção foi sugerido. Após receber a programação, o NanoV3 está habilitado para desempenhar a função de nó sensor ou de nó concentrador, a depender da configuração de sua programação.

A topologia de rede escolhida foi estrela. A escolha da topologia estrela foi devido à sensibilidade do LoRa. Dessa forma, a rede se torna escalável ao ponto de que não é necessário *overhead* RF entre nós. Esta topologia também aumenta a autonomia e facilidade de instalação [43]. Contudo, é sabido que há uma relação de compromisso quanto à topologia de rede, no tocante ao *overhead* do canal, distância de comunicação, consumo, etc.

Quanto à autonomia do nó sensor, foi utilizado uma bateria portátil lítio-íon 1800 mAh de 5 V.

3.1 NÓ CONCENTRADOR

O nó concentrador é o *gateway* da rede e centraliza a comunicação da RSSF. Os dados recebidos são encaminhados para uma comunicação serial-USB. Assim, o concentrador provê compatibilidade de comunicação com um terminal serial de computador, para análise dos dados. Esta compatibilidade caracteriza uma arquitetura híbrida de comunicação, que é semelhante à proposta em [14]. É visto na Figura 12 o protótipo do nó concentrador, composto pelo NanoV3, módulo inAir9b e antena ME1000.

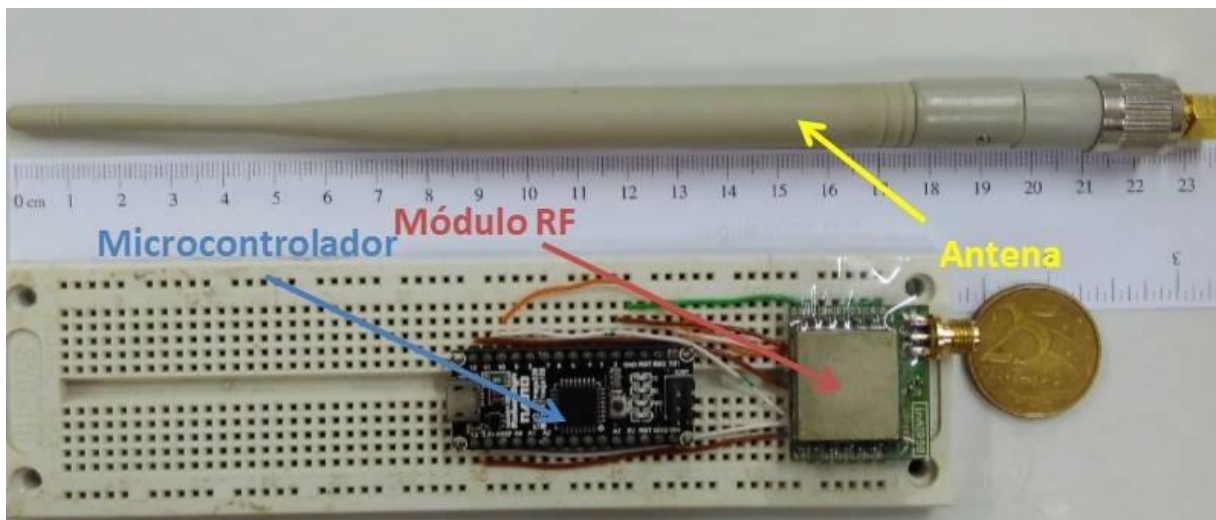


FIGURA 12 - PROTÓTIPO DO NÓ CONCENTRADOR. FONTE: AUTOR.

O nó concentrador foi programado para detectar atividade do canal de RF e realizar a leitura de transmissões. Esta detecção pode ser realizada de tempos em

tempos ou constantemente, a depender do ciclo de trabalho, da economia de energia e da legislação em vigor concernente ao canal de RF. Para prova de conceito, o nó concentrador permaneceu detectando o canal enquanto ligado.

Quando há recepção de transmissão, realiza-se a averiguação do CRC presente no cabeçalho do pacote recebido. Se o CRC for válido, há o incremento de contagem de transmissões válidas e o concentrador exibe os dados da transmissão recebida no terminal, por meio da saída serial-USB. Se o CRC não for válido, a transmissão é descartada e há um incremento para a contagem de transmissões inválidas. Os dados recebidos são referentes às variáveis monitoradas. Adicionalmente, o nó concentrador exibe informações referentes ao RSSI e SNR do enlace RF. É visto na Figura 13 os dados exibidos no terminal como SNR, número da requisição e a temperatura, o RSSI e estatísticas de recepção, respectivamente delimitados em vermelho, laranja, verde e amarelo.

```

SNR 8 Requisicao: 80 = 25.4 RSSI -106 txGood 0 rxGood 80 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 81 = 25.4 RSSI -106 txGood 0 rxGood 81 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 82 = 24.9 RSSI -106 txGood 0 rxGood 82 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 83 = 24.9 RSSI -106 txGood 0 rxGood 83 rxBad 0
SNR 7 Requisicao: 84 = 24.9 RSSI -106 txGood 0 rxGood 84 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 85 = 24.9 RSSI -107 txGood 0 rxGood 85 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 86 = 24.9 RSSI -106 txGood 0 rxGood 86 rxBad 0
SNR 7 Requisicao: 87 = 24.9 RSSI -106 txGood 0 rxGood 87 rxBad 0
SNR 7 Requisicao: 88 = 24.4 RSSI -106 txGood 0 rxGood 88 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 89 = 24.4 RSSI -106 txGood 0 rxGood 89 rxBad 0
SNR 8 Requisicao: 90 = 24.4 RSSI -106 txGood 0 rxGood 90 rxBad 0

```

FIGURA 13 - EXEMPLO DE DADOS EXIBIDOS NO TERMINAL DA ESTAÇÃO. FONTE: AUTOR.

3.2 NÓ SENSOR

O nó sensor realiza a aquisição de dados dos sensores, para enviá-los a um concentrador. Estes nós podem ser adaptados para outras topologias de rede, como a de malha, e eventualmente realizar transmissões entre nós vizinhos, como ponte. É visto na Figura 14 o protótipo do nó sensor formado pelo microcontrolador NanoV3, sensor de temperatura LM35, o sensor de vibração MPU-6050, antena ME1000, módulo RF inAir9B e bateria portátil.

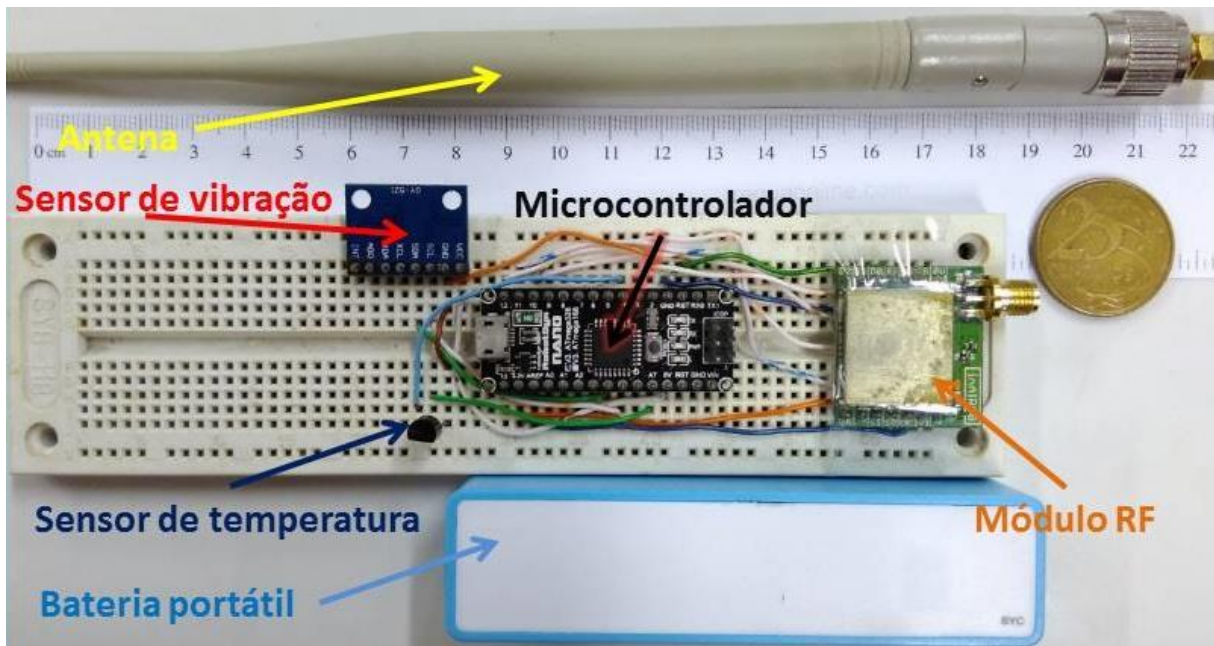


FIGURA 14 - PROTÓTIPO DO NÓ SENSOR. FONTE: AUTOR.

O nó sensor envia os dados coletados de acordo com o uma frequência programada. A frequência de transmissão foi definida como uma transmissão a cada 68 s. Esta frequência de transmissão é considerada suficiente [9]. Outros trabalhos usam frequência de transmissão de uma a cada 10 s [20], variáveis de uma a cada 12 horas até uma a cada 60 s [25], uma a cada 26 s [26] e uma a cada 4 min [27]. É visto na Figura 15 os dados exibidos no terminal (caso esteja conectado a uma saída serial), como número da requisição, a temperatura e o tempo que o rádio permaneceu ligado (tempo de transmissão do pacote), respectivamente delimitados em vermelho, laranja e verde.

```

Enviado requisicao: 80 = 25.4 Tempo: 601 ms
Enviado requisicao: 81 = 25.4 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 82 = 24.9 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 83 = 24.9 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 84 = 24.9 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 85 = 24.9 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 86 = 24.9 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 87 = 24.9 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 88 = 24.4 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 89 = 24.4 Tempo: 600 ms
Enviado requisicao: 90 = 24.4 Tempo: 600 ms
  
```

FIGURA 15 - EXEMPLO DE DADOS EXIBIDOS NO TERMINAL DO NÓ SENSOR. FONTE: AUTOR.

3.3 TESTE EM LABORATÓRIO

Foram testadas 4 configurações listadas no Quadro 7, para diferentes parâmetros LoRa. As configurações 1, 2, 3 e 4 estão no Quadro 7, a configuração 1 foi a primeira a ser testada e serviu de ponto inicial devido ao encontrado na literatura [47]. Algumas configurações são comuns às configurações: preâmbulo de 8 símbolos, frequência de operação de 868 MHz, *payload* de 100 bytes e CR de 4/6.

QUADRO 7 - PARÂMETROS LORA UTILIZADOS.

Parâmetro	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4
SF	10	12	12	7
Potência de transmissão	13 dBm	5 dBm	20 dBm	20 dBm
Largura de banda	250 kHz	250 kHz	250 kHz	500 kHz

Os valores listados no Quadro 7, de cada configuração, foram utilizados no utilitário Semtech LoRa Modem Calculator Tool (disponível em www.semtech.com). O perfil gerado pelo utilitário está sumarizado no Quadro 8.

QUADRO 8 – PERFIL DAS CONFIGURAÇÕES.

Parâmetro	Conf. 1	Conf. 2 / 3	Conf. 4
Taxa de transmissão	1627,6 bps	488,28 bps	18229,17 bps
Tempo de transmissão	599,04 ms	2297,86 ms	51,26 ms
Sensibilidade	-129 dBm	-134 dBm	-117 dBm

Cada transmissão possui 100 bytes de *payload*, que é suficientemente grande para acomodar as variáveis de medição de temperatura e vibração. Outro motivo da escolha de um *payload* de 100 bytes foi devido ao encontrado na literatura [47]. O *payload* pode ser de até 255 bytes.

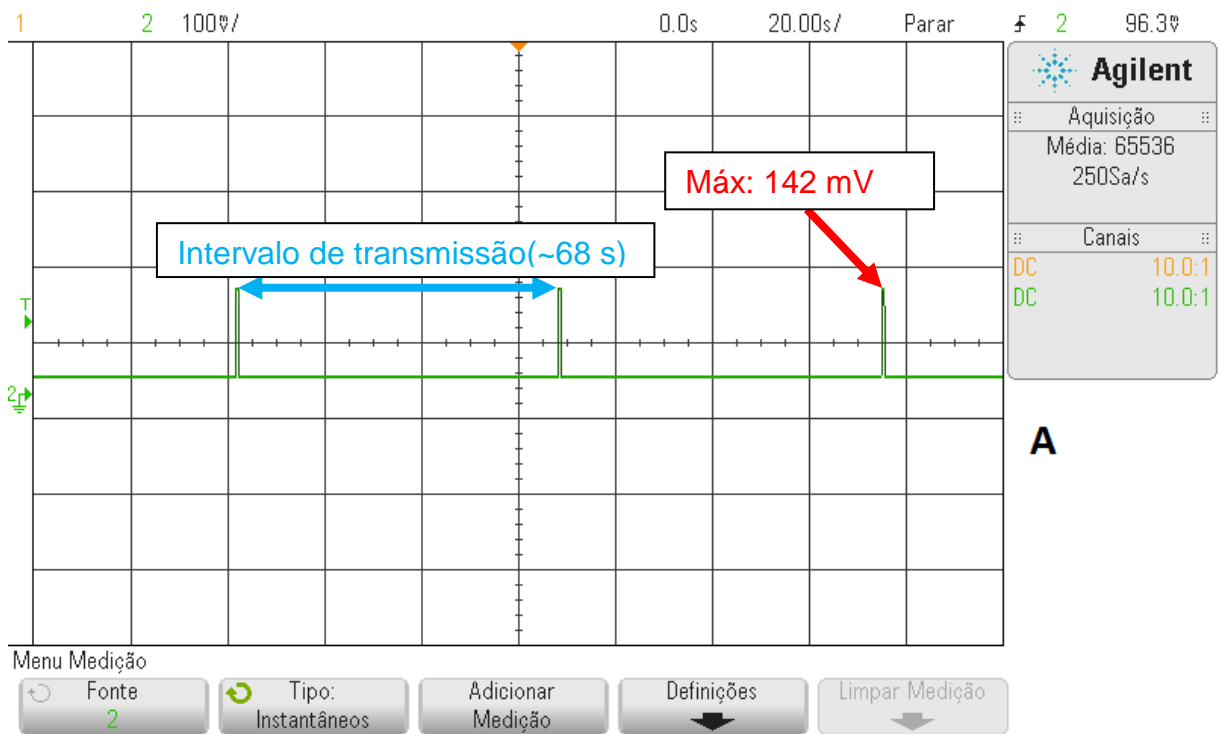
Para caracterizar o consumo dos protótipos, foi utilizado um resistor de 1 Ω que foi ligado em série com a entrada de alimentação de 5 V do NanoV3. Tanto o resistor como os cabos utilizados foram caracterizados em relação a suas

resistências, utilizando um multímetro Agilent U125213. A resistência equivalente encontrada foi de 1.16Ω . Foi utilizado um osciloscópio Agilent DSO-X2012A e os dados da medição foram exportados, em formato CSV, para se realizar os devidos cálculos com a ferramenta numérica Scilab.

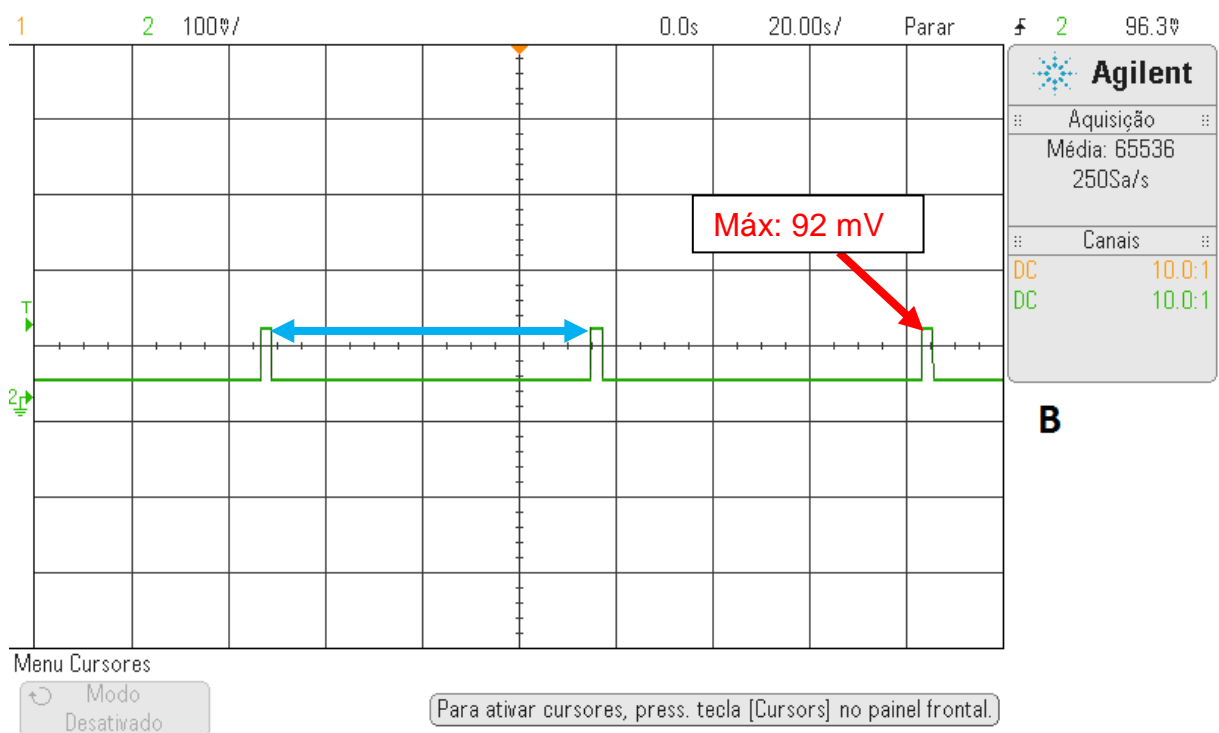
São vistas nas Figuras 16 (a), (b), (c) e (d) as curvas de tensão no resistor usando as respectivas configurações 1, 2, 3 e 4 do Quadro 7. Na Figura 16 (e) é vista a curva de tensão para o concentrador. Os resultados estão sumarizados no Quadro 9. A tensão média foi obtida dos arquivos CSV no intervalo de uma transmissão (68 s). A corrente média estimada foi calculada através da Lei de Ohm, para o resistor (equivalente). A potência média estimada, por transmissão, foi calculada de acordo com a corrente média estimada, e pela tensão de alimentação, 5 V.

QUADRO 9 – MEDIÇÕES DE TENSÃO NO RESISTOR EM SÉRIE COM OS PROTÓTIPOS.

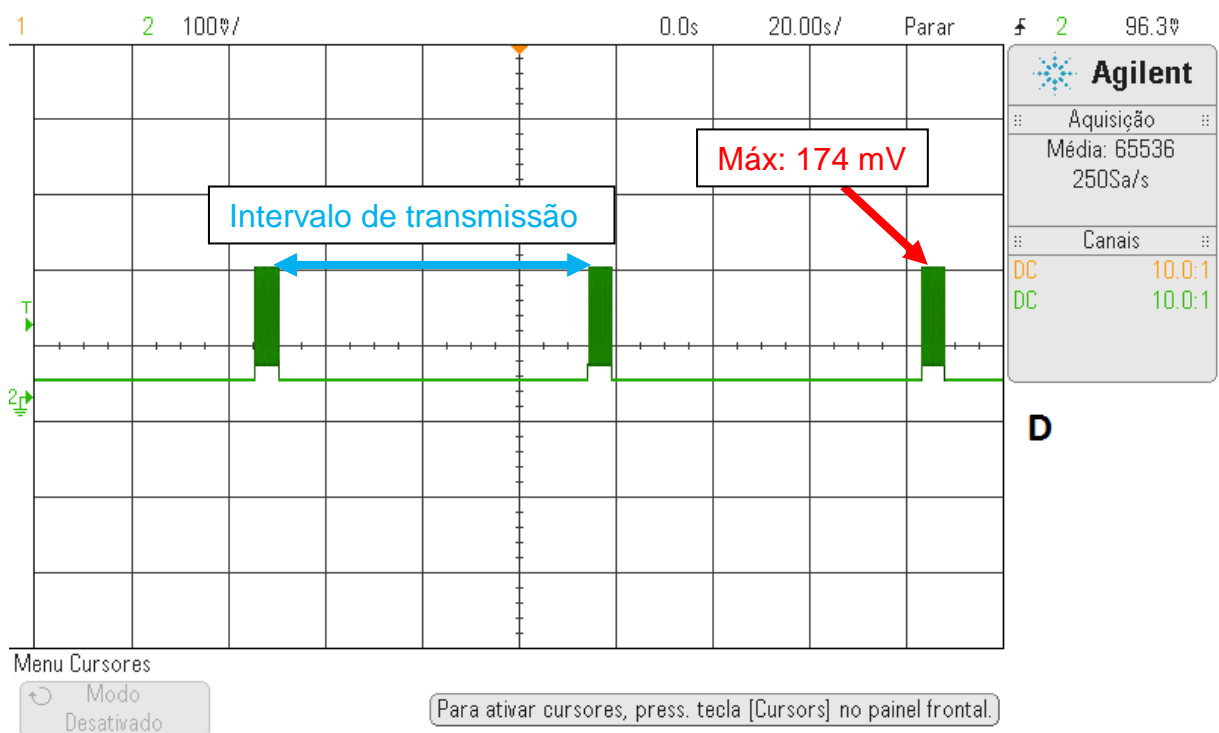
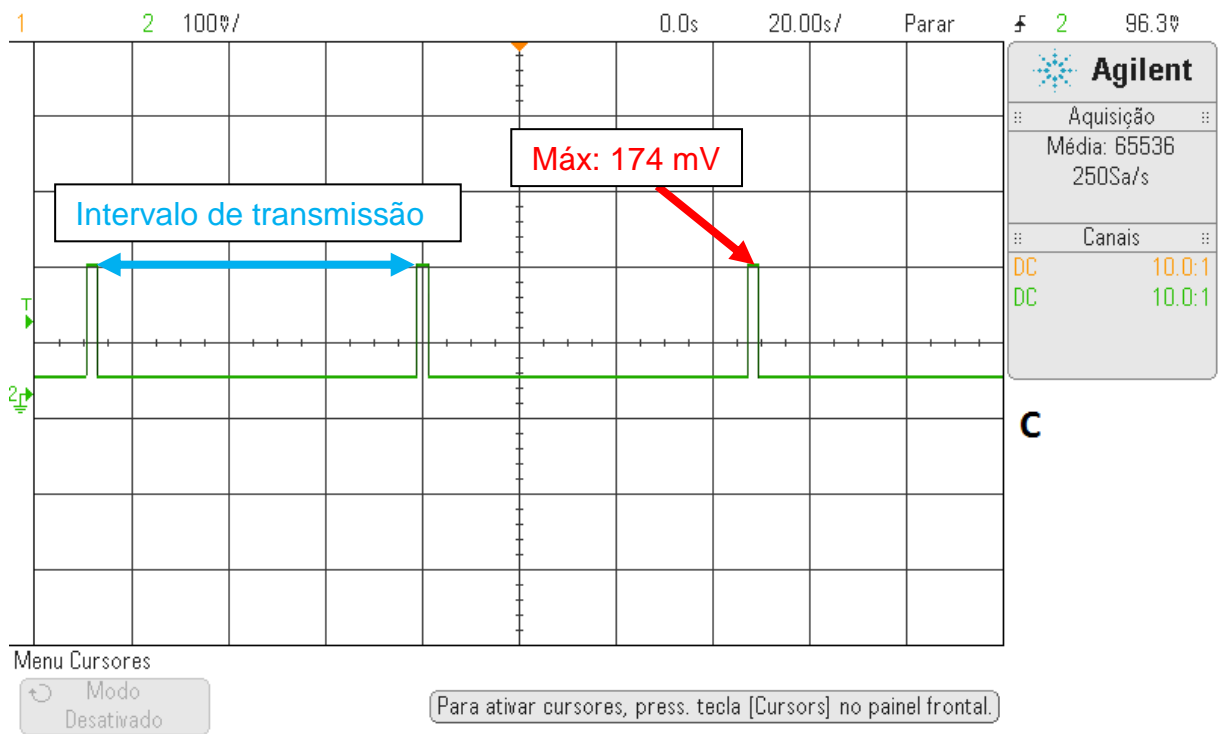
	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4	Concent.
Tensão média (mV)	23,5	25,0	27,4	24,3	50,1
Corrente média estimada (mA)	20,3	21,6	23,6	21,0	43,2
Potência média estimada (mW)	101,6	108,1	118,3	105,1	216,2



A



B



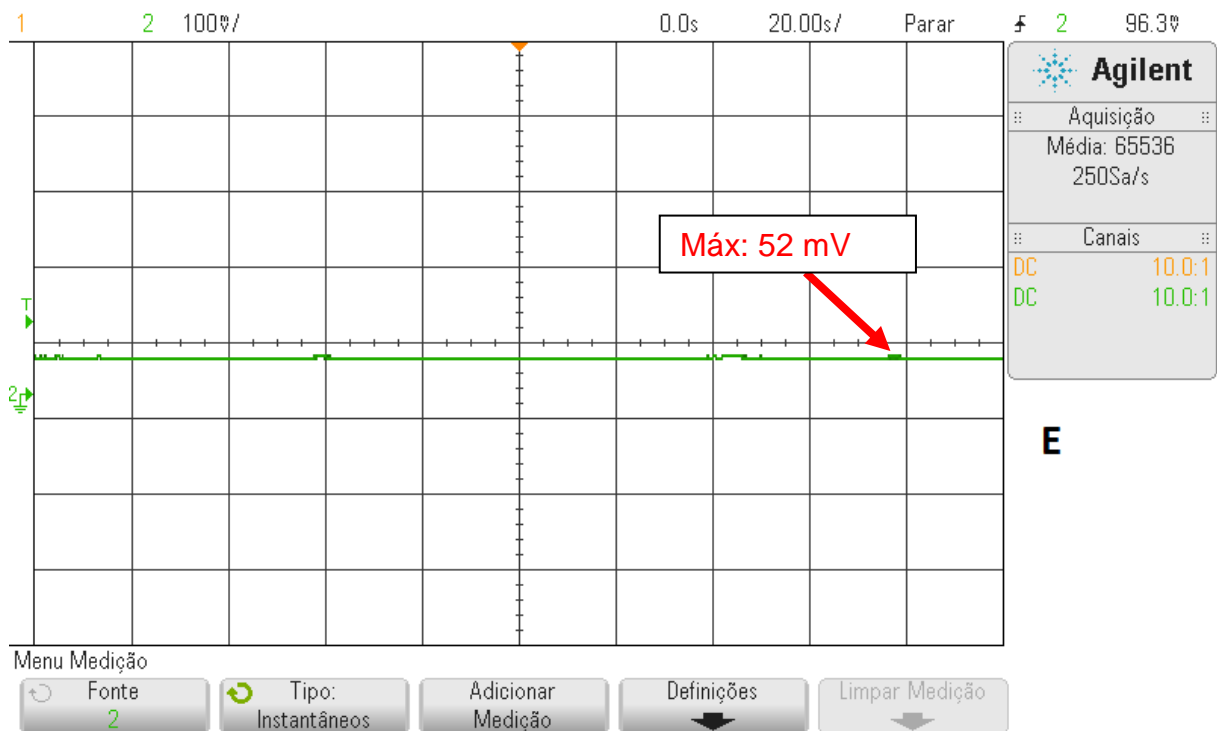


FIGURA 16 - CURVAS DE TENSÃO NO RESISTOR EM SÉRIE. (A) CONF. 1, (B) CONF. 2 (C) CONF. 3, (D) CONF. 4, (E) CONCENTRADOR FONTE: AUTOR.

Duas etapas foram elaboradas, para a verificação de conformidade do sensor de vibração. Para ambas etapas, optou-se por realizar análise e processamento dos dados na estação de trabalho, visto que o poder computacional do nó sensor é limitado para tal atividade. A primeira etapa foi a aquisição de uma curva de referência. Para tanto, foi criado um arquivo de som teste50Hz.wav com um sinal senóide de 50 Hz. O sensor de vibração foi instalado sobre um alto-falante de 3", conforme esquema visto na Figura 17.

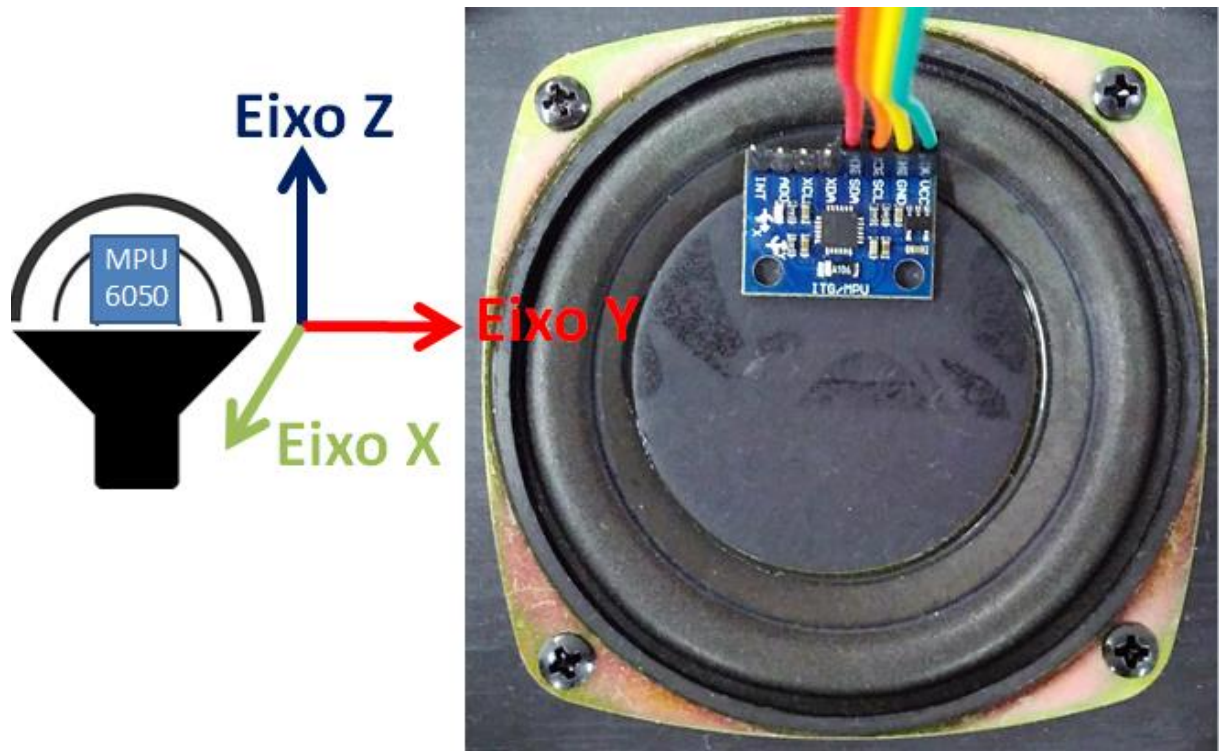


FIGURA 17 - ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DO SENSOR DE VIBRAÇÃO. FONTE: AUTOR.

O alto-falante foi conectado a um notebook e então foi executado o áudio teste50hz.wav. Foi feita uma aquisição local (sem transmissão RF), do eixo Z (perpendicular, conforme Figura 17), para servir de referência, com uma amostra de 10 s da vibração do alto-falante, com uma frequência de amostragem de 1 kHz. Estes dados foram gravados em um arquivo CSV. Os dados do sensor foram devidamente convertidos e analisados no domínio do tempo e da frequência, com o algoritmo FFT.

As respostas mecânicas de aceleração do alto-falante, no domínio do tempo e no domínio da frequência, são vistas nas Figuras 18 e 19, respectivamente. O sinal visto na Figura 18 foi janelado em 200 ms, para melhor visualização. Para a resposta em frequência, da Figura 19, é visto uma raia próxima de 50 Hz, com magnitude de 4,62895 g. Na Figura 19, o termo DC indica a própria gravidade (1 g).

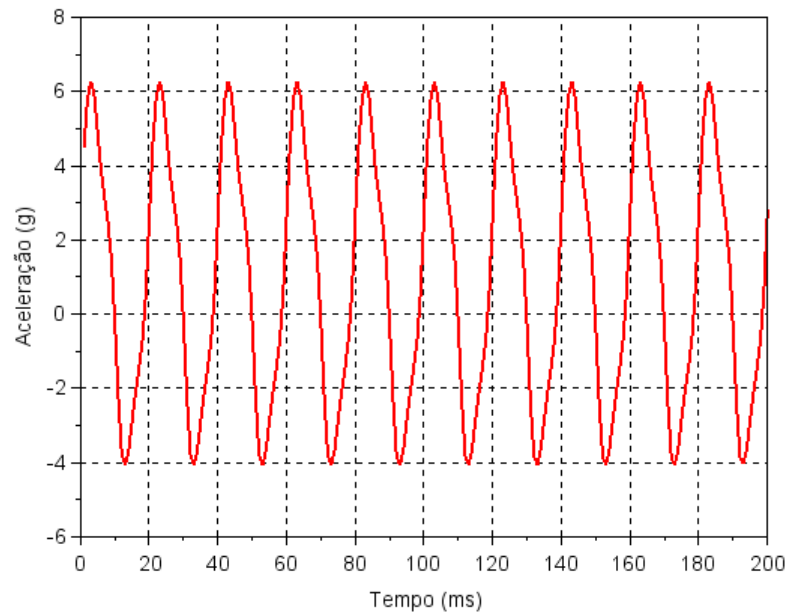


FIGURA 18 - RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO. CURVA DE REFERÊNCIA FONTE: AUTOR.

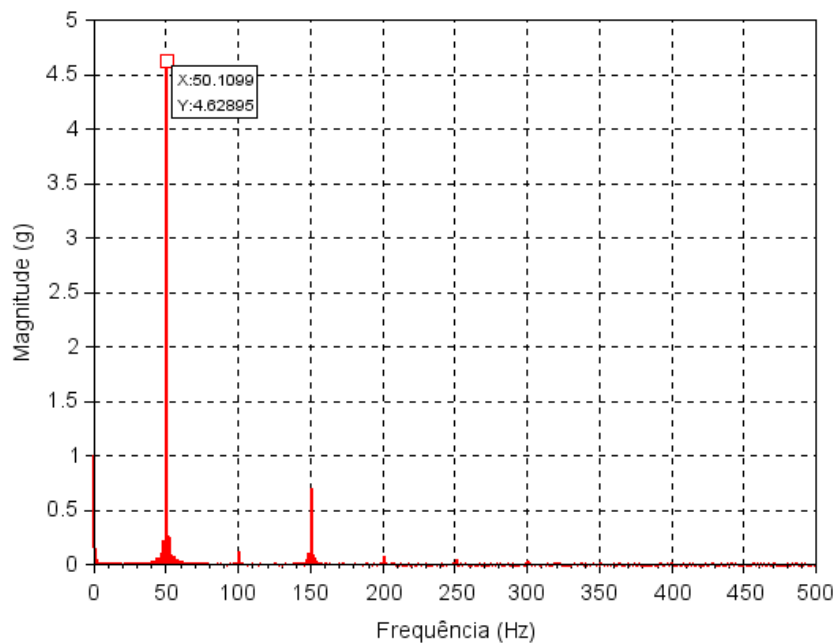


FIGURA 19 - RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA. CURVA DE REFERÊNCIA. FONTE: AUTOR.

A segunda etapa foi a utilização da configuração 4, do Quadro 7, para aquisição remota dos dados do sensor. Esta configuração possui uma taxa de transferência elevada, em relação às outras. Assim, foi utilizada para transmitir pacotes com dados referentes à vibração. O nó sensor foi posto no Laboratório

RFWild, distante de 20 m do nó concentrador, no Laboratório LPS, ambos no mesmo andar do Bloco KLM do Centro de Tecnologia da UFPB. O nó sensor foi programado para enviar 50 pacotes. Estes 50 pacotes continham uma amostra de 2,3 s de vibração no eixo perpendicular ao sensor enquanto o alto-falante estava ligado com o mesmo áudio. O tempo de transmissão de cada pacote é de aproximadamente 0,1 s. É possível visualizar na Figura 16 (D) transmissões de 50 pacotes.

A resposta mecânica de aceleração do alto-falante, no domínio do tempo, para os dados recebidos, é vista na Figura 20. O sinal visto na Figura 20 foi janelado em 200 ms, para melhor visualização.

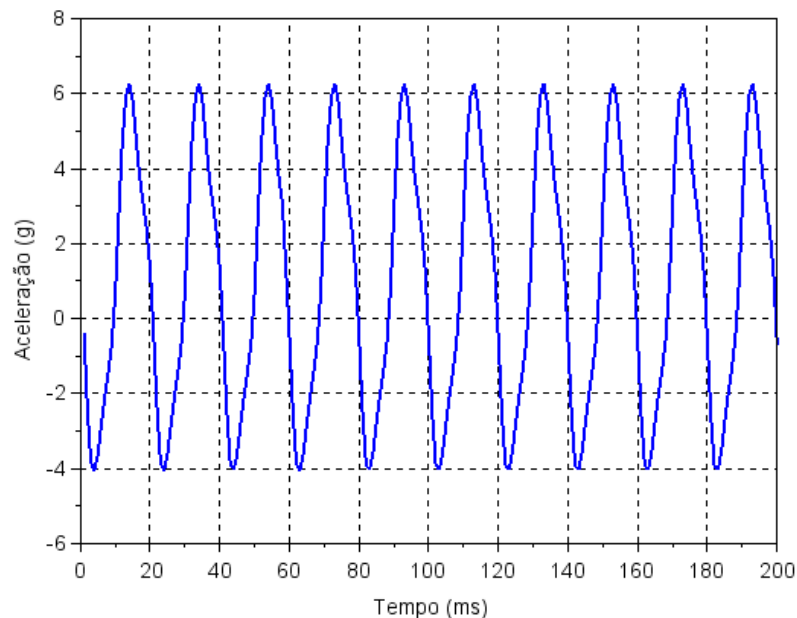


FIGURA 20 - RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO. DADOS RECEBIDOS DO NÓ SENSOR. FONTE: AUTOR.

A resposta em frequência foi realizada com o algoritmo FFT e é vista na Figura 21, em conjunto com a resposta da curva de referência, em uma janela de 2,3 s. As raias próximas de 50 Hz estão marcadas na Figura 21. Para a curva de referência, a magnitude da raia é de 4,55 g, e para os dados recebidos é de 4,28 g.

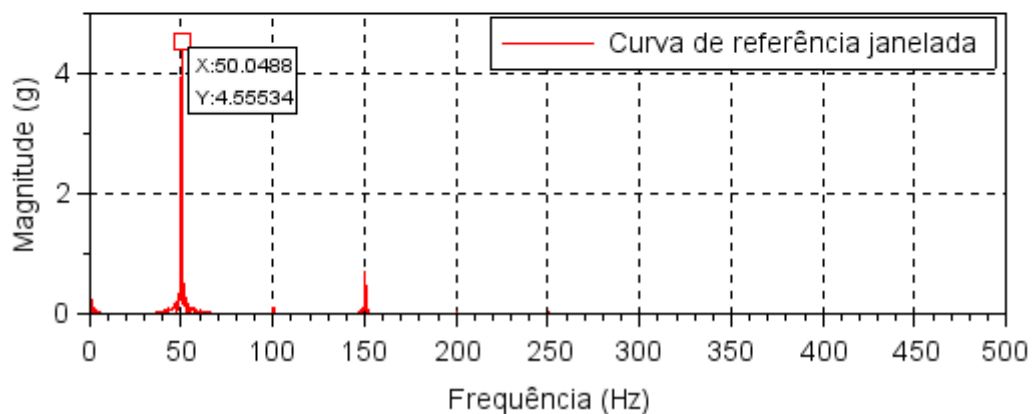
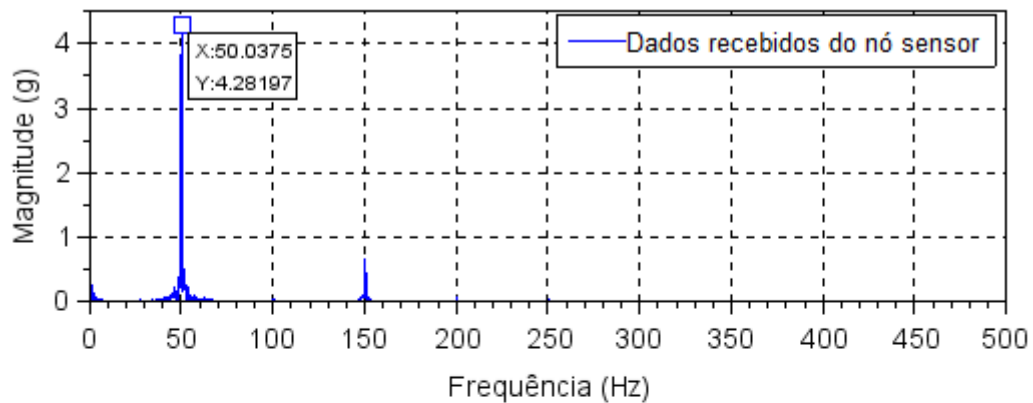


FIGURA 21 - COMPARATIVO DE RESPOSTA DO SENSOR DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA. DADOS RECEBIDOS DO NÓ SENSOR EM AZUL. CURVA DE REFERÊNCIA EM VERMELHO. FONTE: AUTOR.

Os dados de média, desvio padrão, máximo e mínimo estão sumarizados no Quadro 10. A aceleração média no eixo perpendicular é a própria gravidade (1 g). Os dados de vibração recebidos são semelhantes aos dados de referência, com desvio padrão de 0,12 g.

QUADRO 10 – SUMÁRIO DOS DADOS DE VIBRAÇÃO.

Parâmetro	Referência	Dados recebidos
Média (g)	1,003	0,999
Desvio padrão (g)	3,462	3,342
Máximo (g)	6,379	6,061
Mínimo (g)	-4,162	-4,002

3.4 TESTE EM CAMPO ABERTO

a) TESTE EM CAMPO ABERTO 1 (TCA1)

Uma primeira sequência de testes, em campo aberto, foi feita para se avaliar a potência de recepção e SNR do LoRa usando os parâmetros de configuração 1 listados no Quadro 7. O espaço escolhido para o teste foi o estacionamento da Central de Aulas da UFPB.

O espaço é visto na Figura 22 e dispõe de pouco mais de 280 metros em visada direta sem obstáculos ao longo do percurso. Também são vistos na Figura 22 os 3 pontos escolhidos, que são 4 m (ponto B), 16 m (ponto C) e 256 m (ponto D). Além disso, os testes foram feitos em um sábado, para garantir a mínima influência de corpos metálicos (carros).



FIGURA 22 - LOCAL PARA TESTES TCA1. FONTE: AUTOR.

O transmissor foi posto em um banco plástico rígido de altura 50 cm, enquanto o receptor está em um banco plástico dobrável de altura 30 cm. Para cada distância foi realizada uma série de 100 transmissões de dados do nó sensor ao nó concentrador.

b) TESTE EM CAMPO ABERTO 2 (TCA2)

Em um segundo momento, o TCA2 foi feito para se avaliar o comportamento RF do LoRa para diferentes posições de antena de recepção. A medição contou

com 8 pontos para caracterizar o comportamento ao longo do caminho. O espaço escolhido para o teste foi o mesmo do TCA1. O espaço é visto na Figura 23 com os 8 pontos escolhidos, que compreendem de 2 a 256 metros, com base na potência de 2^1 a 2^8 .

As medições foram feitas para 4 posições diferentes de antena receptora nomeadas de A, B, C e D. As posições servem para determinar a melhor posição de polarização da antena e características do meio. Adicionalmente, o TCA2 também foi feito em um sábado, para garantir a mínima influência de corpos metálicos (carros). Contudo, durante as medições, uma equipe de manutenção, da prefeitura universitária, realizou procedimentos na rede elétrica próxima ao local do experimento.

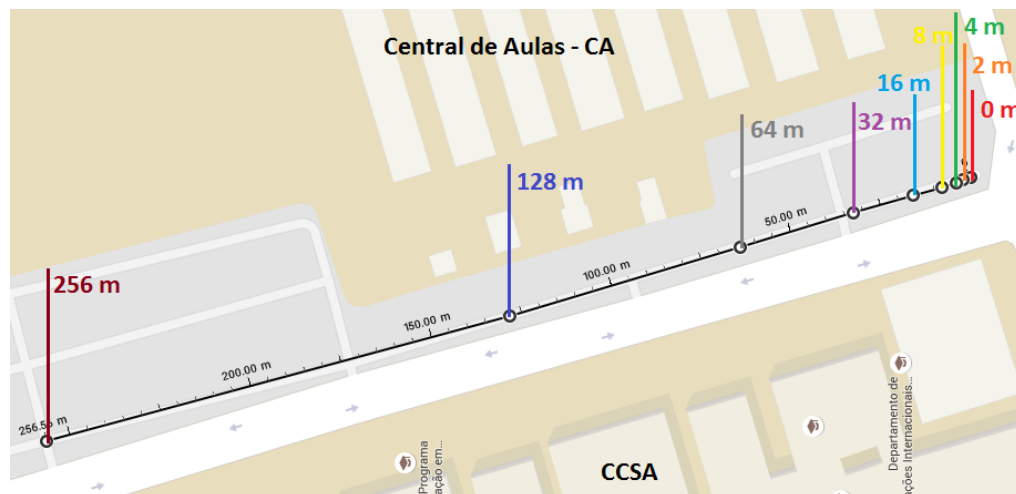


FIGURA 23 - LOCAL PARA TESTES TCA2. FONTE: AUTOR.

As posições A, B, C e D são vistas, em destaque vermelho, nas Figuras 24 e 25 e estão a uma distância de 2 metros da antena receptora, em destaque verde. É visto na Figura 24 a posição A da antena receptora. As posições B, C e D da antena receptora são vistas na Figura 25. De maneira similar ao TCA1, o transmissor está em um banco plástico rígido de altura 50 cm, enquanto o receptor está em um banco plástico dobrável de altura 30 cm.



FIGURA 24 - VISADA DE RECEPÇÃO NA POSIÇÃO A. FONTE: AUTOR.

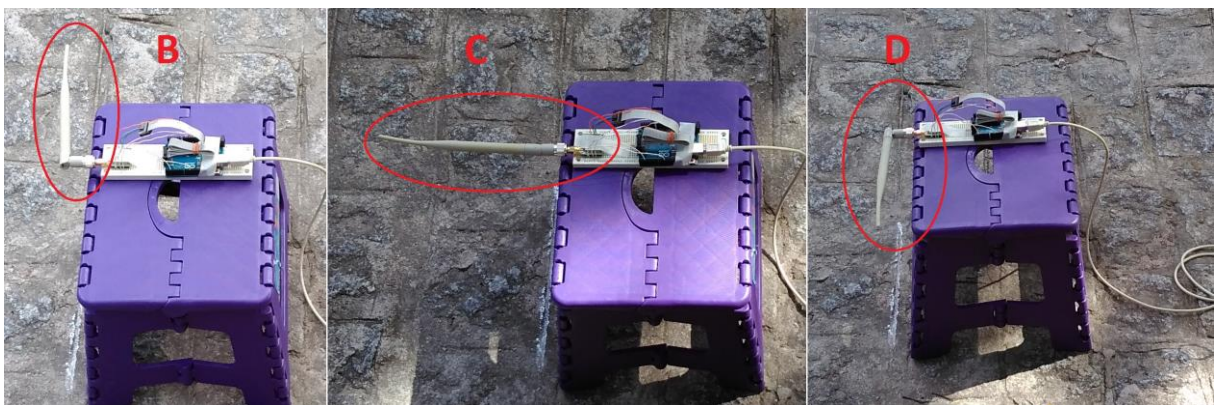


FIGURA 25 - VISADA DE RECEPÇÃO NA POSIÇÃO B, C E D. FONTE: AUTOR.

Para cada distância foram realizadas quatro medições, uma para cada posição de antena. Cada medição consistiu em 100 transmissões de dados de temperatura do nó sensor ao nó concentrador. As configurações LoRa utilizadas foram de acordo com a configuração 1 do Quadro 7. As medições de distância foram realizadas com uma trena de aço de 7,5 m, e cada ponto de medida foi marcado no solo com giz branco, conforme visto nas Figuras 24 e 25.

c) TESTE EM CAMPO ABERTO 3 (TCA3)

O TCA3 consistiu em 3 medições (a), (b) e (c), para as configurações 1, 2 e 3 do Quadro 7, respectivamente. O espaço onde foram feitas as medições é visto na Figura 26 com os 8 pontos escolhidos, que compreendem de 125 a 1000 m, com incrementos de 125 m. O local dispõe de pouco mais de 1000 metros em uma rua dentro da UFPB, que vai do Centro de Comunicação, Turismo e Artes até o Centro de Ciências da Saúde. As medições foram feitas para a posição A da antena receptora.



FIGURA 26 - LOCAL PARA TESTES TCA3. FONTE: AUTOR.

Para cada distância, 100 transmissões foram medidas do nó sensor ao nó concentrador. Além da temperatura, o nó sensor enviou os dados de aceleração. De maneira similar ao TCA1 e TCA2, o transmissor foi colocado em um banco plástico rígido de altura 50 cm, enquanto o receptor estava em um banco plástico dobrável de altura 30 cm.

3.5 COMENTÁRIOS

Em TCA1 e TCA2 foram utilizados microcontroladores ATmega328p em placas de desenvolvimento Arduino Uno R3. Estas placas possuem limitação de corrente de até 40 mA para alimentação de 3,3 V. Devido a esta limitação, os testes do TCA3 foram abordados com o NanoV3, que é capaz de fornecer corrente para toda a gama de configuração de potências de transmissão. O TCA3 também cobre todas as distâncias, para TCA1 e TCA2.

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada para realizar as medições RF. Foram descritos o material e o método para a prova de conceito em relação à medição de longa distância, monitoramento de temperatura e vibração. As definições de testes foram apresentadas e os resultados das medições RF para os TCAs serão apresentados no capítulo 4.

4 RESULTADOS

4 RESULTADOS

A ideia de realizar uma medição de longa distância depende de vários fatores, a saber: do ambiente, das antenas, da potência de transmissão, etc. A fim de compreender melhor e saber, empiricamente, quão longe o rádio SX1276 consegue se comunicar, em um ambiente urbano, os testes descritos no capítulo 3 foram propostos. Os testes em campo aberto fornecem informações de como a comunicação se comporta em um ambiente urbano. Neste capítulo os resultados estão apresentados a seguir, bem como suas discussões.

a) TESTE EM CAMPO ABERTO 1 (TCA1)

É visto nas Figuras 27 e 28, respectivamente, o gráfico de índice de transmissão por RSSI (dBm) e o gráfico de índice de transmissão por SNR (dB). É visto nas Figuras 29 e 30, respectivamente, o gráfico de distância por média de RSSI (dBm) e o gráfico de distância por média de SNR (dB). Em todos os casos, nenhuma transmissão deixou de ser recebida.

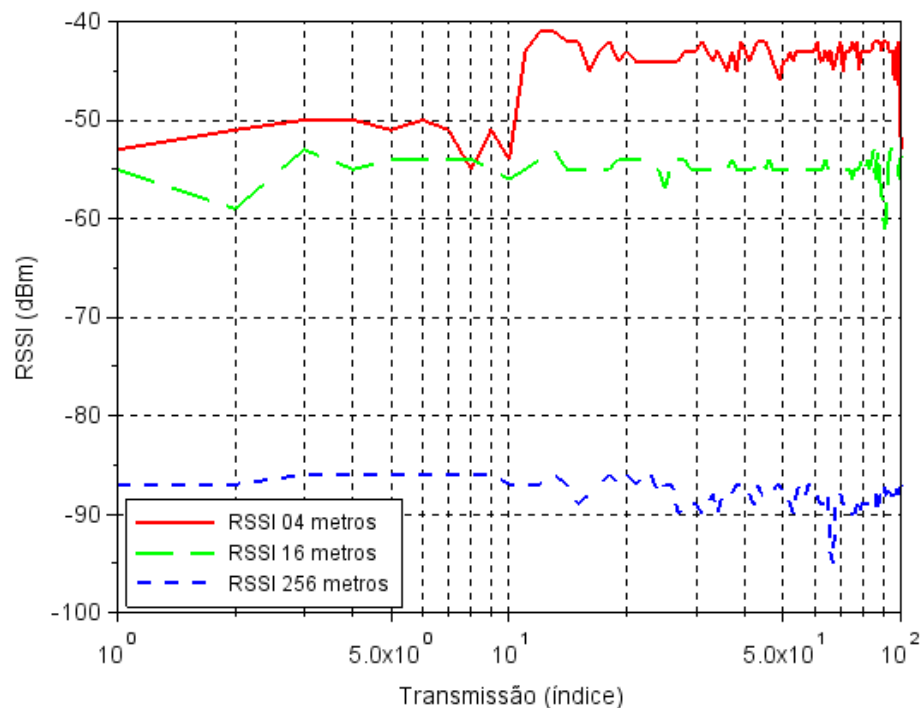


FIGURA 27 - GRÁFICO TCA1 DE TRANSMISSÃO POR RSSI. FONTE: AUTOR.

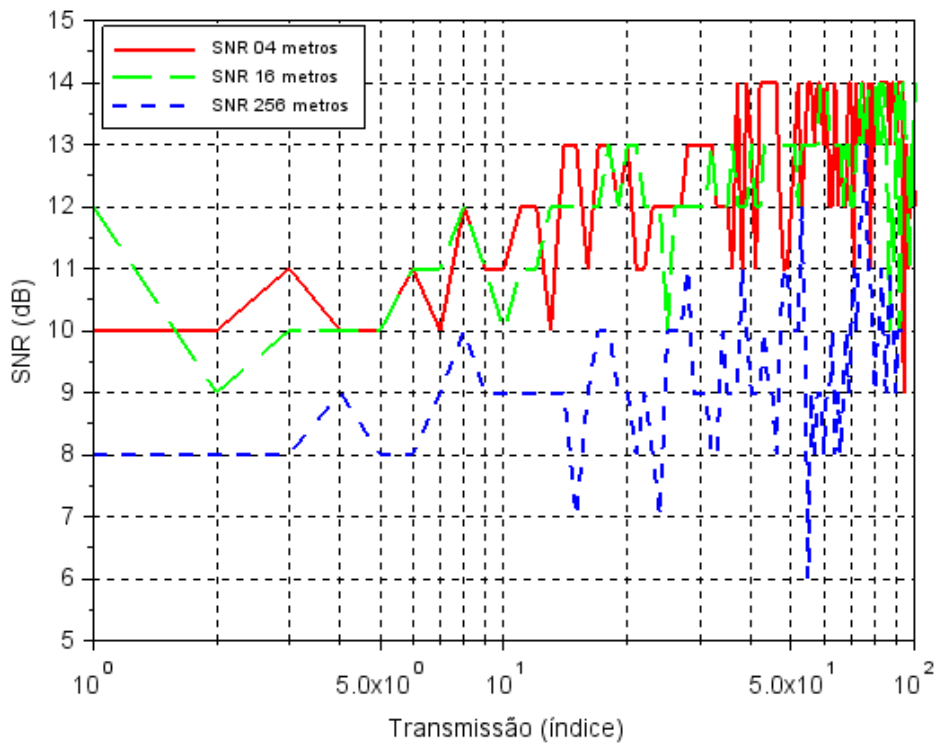


FIGURA 28 - GRÁFICO TCA1 DE TRANSMISSÃO POR SNR. FONTE: AUTOR.

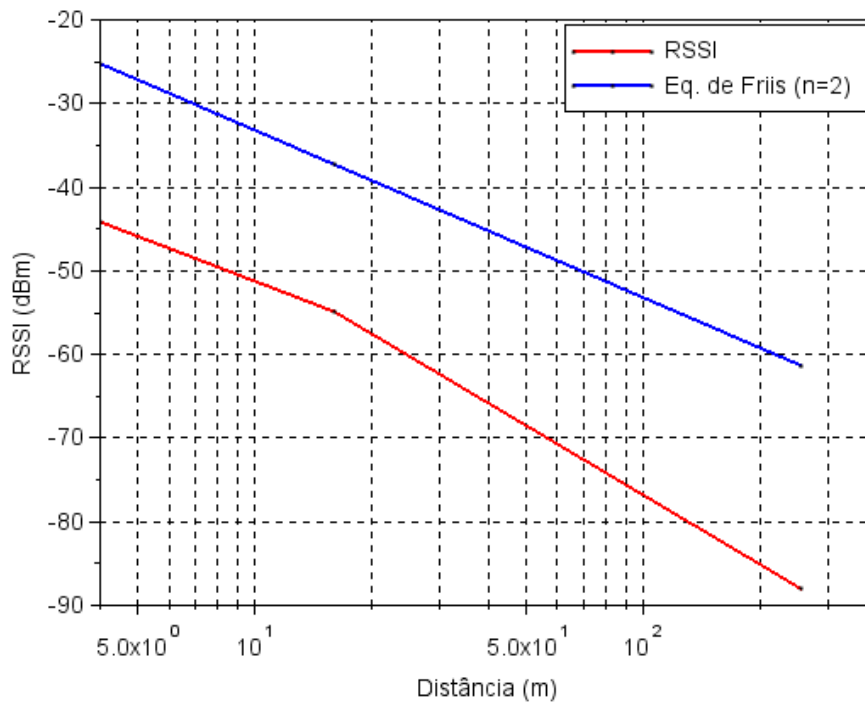


FIGURA 29 - GRÁFICO TCA1 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE RSSI. FONTE: AUTOR.

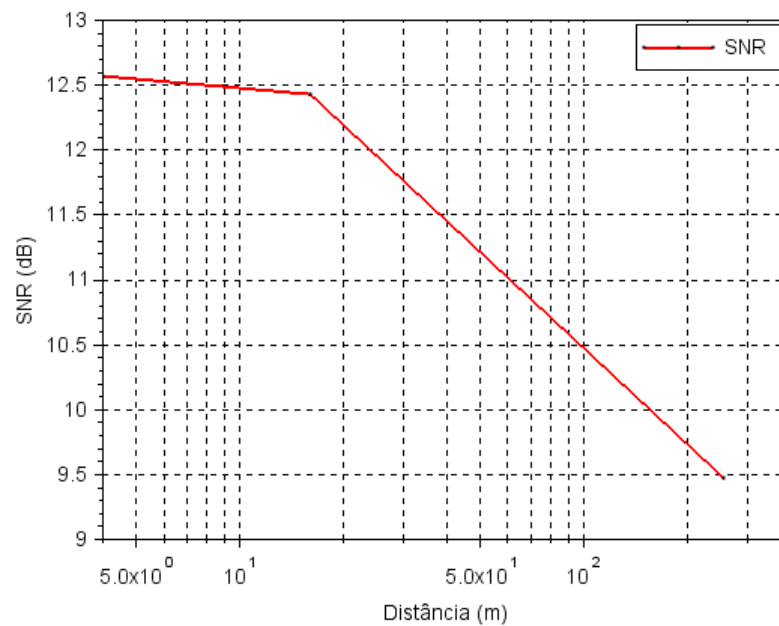


FIGURA 30 - GRÁFICO TCA1 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE SNR. FONTE: AUTOR.

São sumarizados no Quadro 11 os parâmetros de observação para PER, máximo, mínimo, média e desvio padrão de RSSI (dBm) e SNR (dB) de cada experimento.

QUADRO 11 - PARÂMETROS DE OBSERVAÇÃO PARA TCA1.

Experimento	PER (%)	RSSI (dBm)				SNR (dB)			
		Max	Min	Med	D. P.	Max	Min	Med	D.P.
d = 04 metros	0,0	-41	-55	-44,17	2,93	14	9	12,57	1,28
d = 16 metros	0,0	-53	-61	-54,88	1,24	14	9	12,43	1,10
d = 256 metros	0,0	-86	-95	-88,06	1,48	13	6	9,47	1,13

Nos três experimentos todas as transmissões foram recebidas sem erros, conforme visto no Quadro 11.

A análise das curvas de RSSI e SNR nas Figuras 27, 28, 29 e 30 sugere que o experimento apresentou resultado esperado. Visto que, o comportamento de RSSI decai ao longo da distância (Figuras 27 e 28) e mantém-se abaixo da curva teórica (comparativo, em azul na Figura 29).

b) TESTE EM CAMPO ABERTO 2 (TCA2)

É visto na Figura 31 o gráfico de distância por RSSI. Em azul marinho a curva TCA1 (comparativa), em vermelho a curva com antena na posição A, em verde a curva com antena na posição B, em azul a curva com antena na posição C, em ciano a curva com antena na posição D e em magenta a curva teórica (comparativa). As curvas apresentam decaimento conforme a distância o que era esperado.

Na Figura 32, é visto o gráfico de distância por SNR, que descreve o comportamento da qualidade do enlace. As cores dos traços das curvas da Figura 32 são semelhantes aos da Figura 31 já descritos.

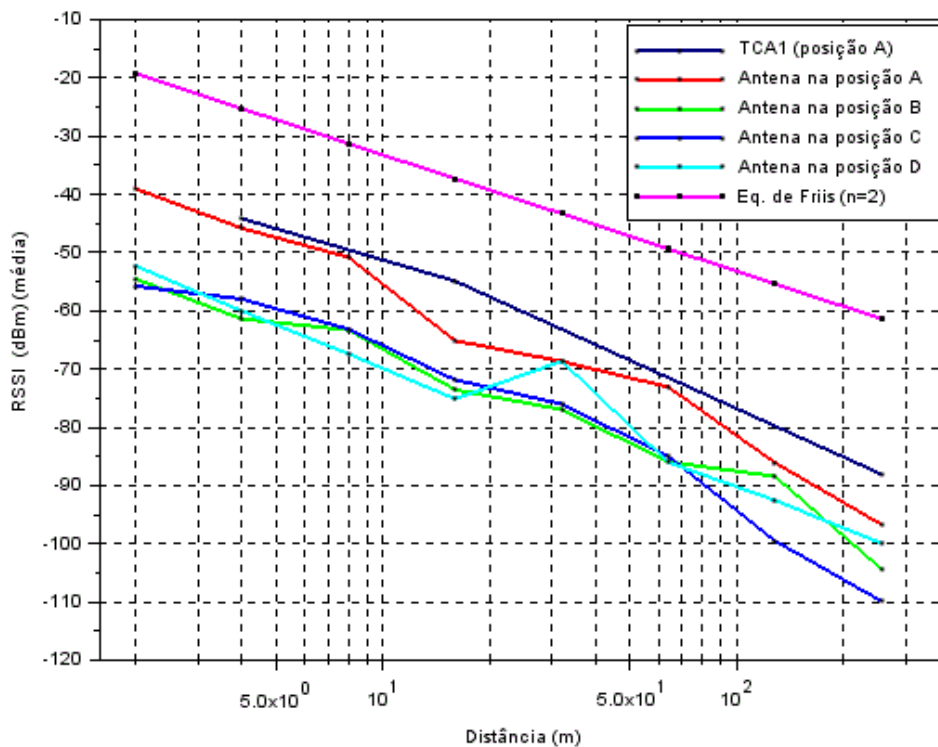


FIGURA 31 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE RSSI. FONTE: AUTOR.

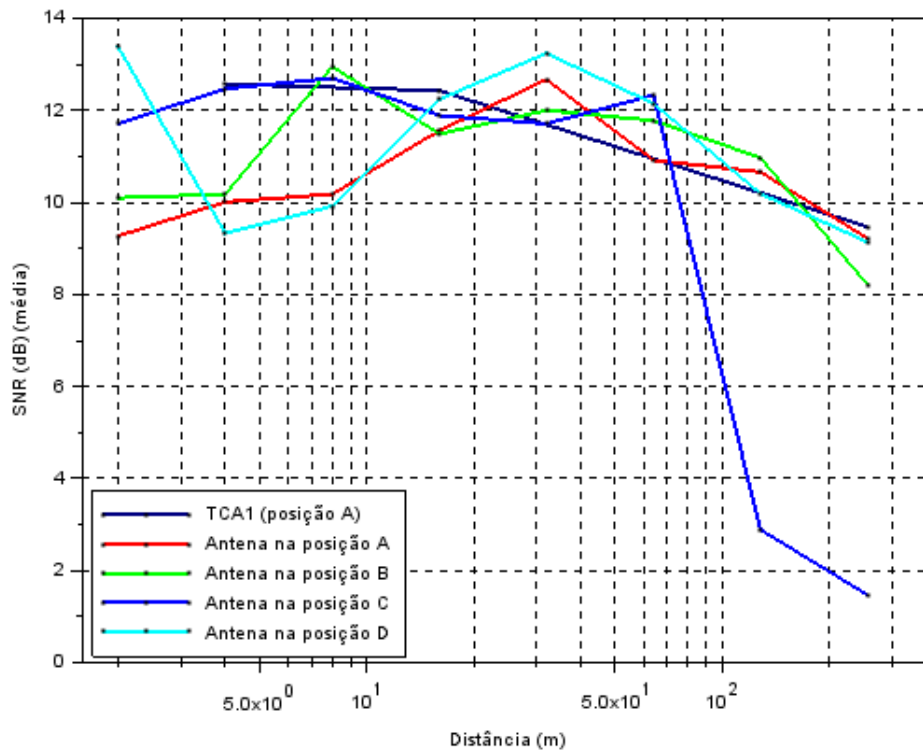


FIGURA 32 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE SNR. FONTE: AUTOR.

É visto na Figura 33 um prolongamento teórico (em tracejado) das curvas da Figura 31. Na Figura 34, é vista uma ampliação da Figura 33 com pontos de interesse marcados. Estes pontos indicam a distância máxima de comunicação para cada curva conforme o limiar de sensibilidade (-129 dBm). Na Figura 35 é visto um empilhamento das Figuras 31 e 32, em conjunto com o gráfico da taxa de recebimento de pacotes sem erros de CRC, para uma melhor visualização. O nó sensor reportou uma temperatura ambiente média total de 30,74 °C.

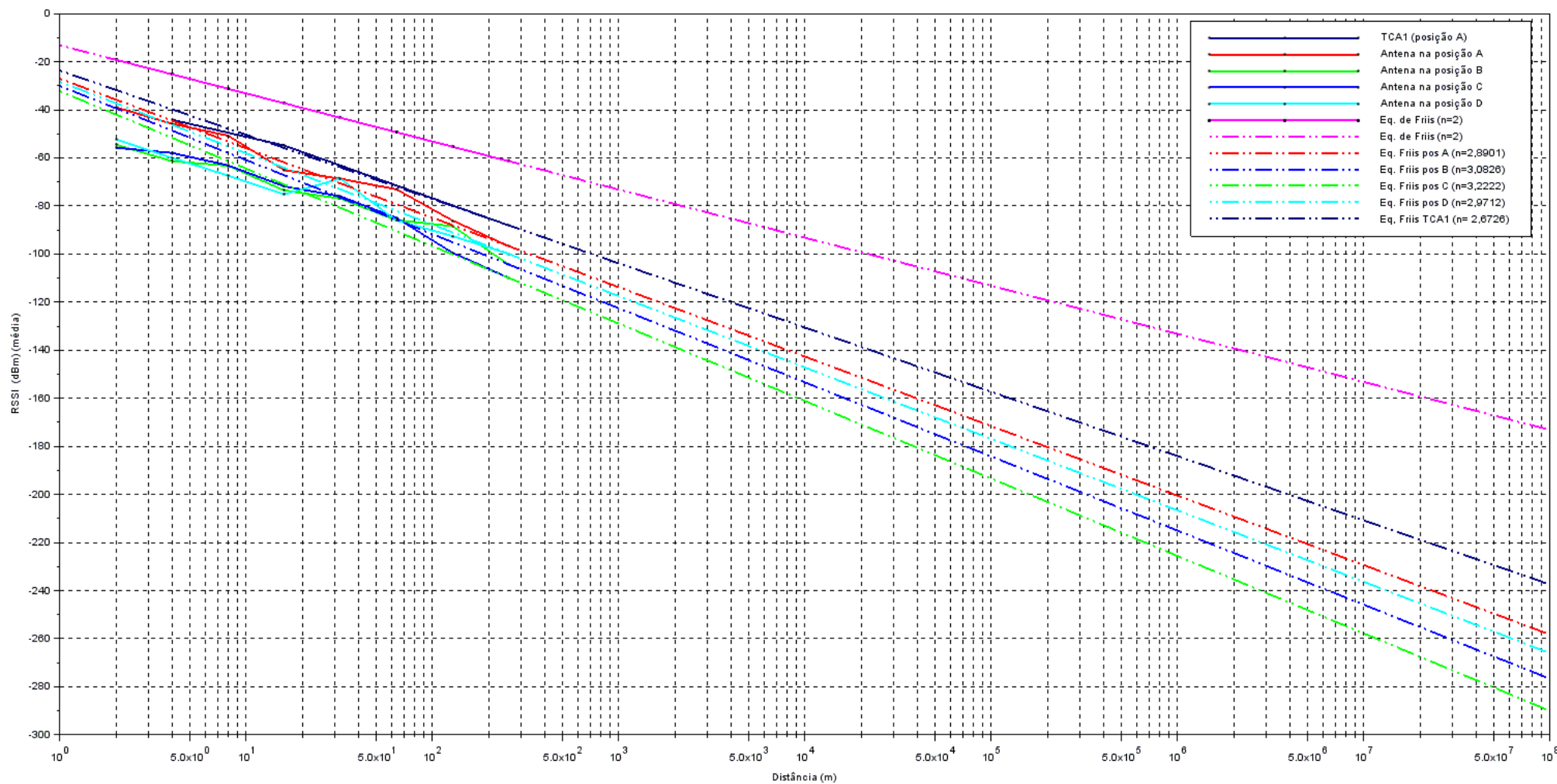


FIGURA 33 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIA POR MÉDIA DE RSSI. FONTE: AUTOR.

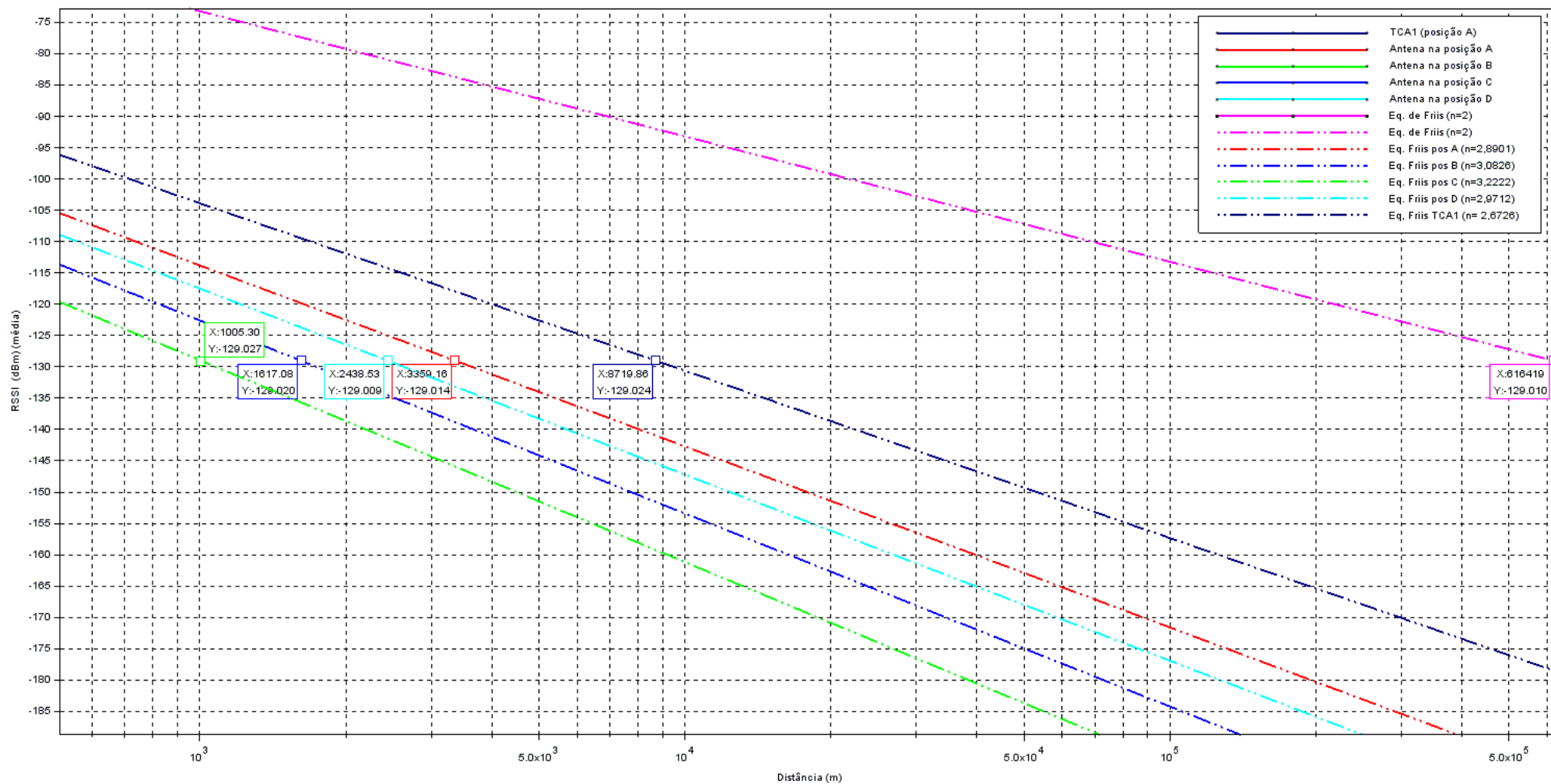


FIGURA 34 - GRÁFICO TCA2 AMPLIAÇÃO DA FIG. 33 COM PONTOS MARCADOS. FONTE: AUTOR.

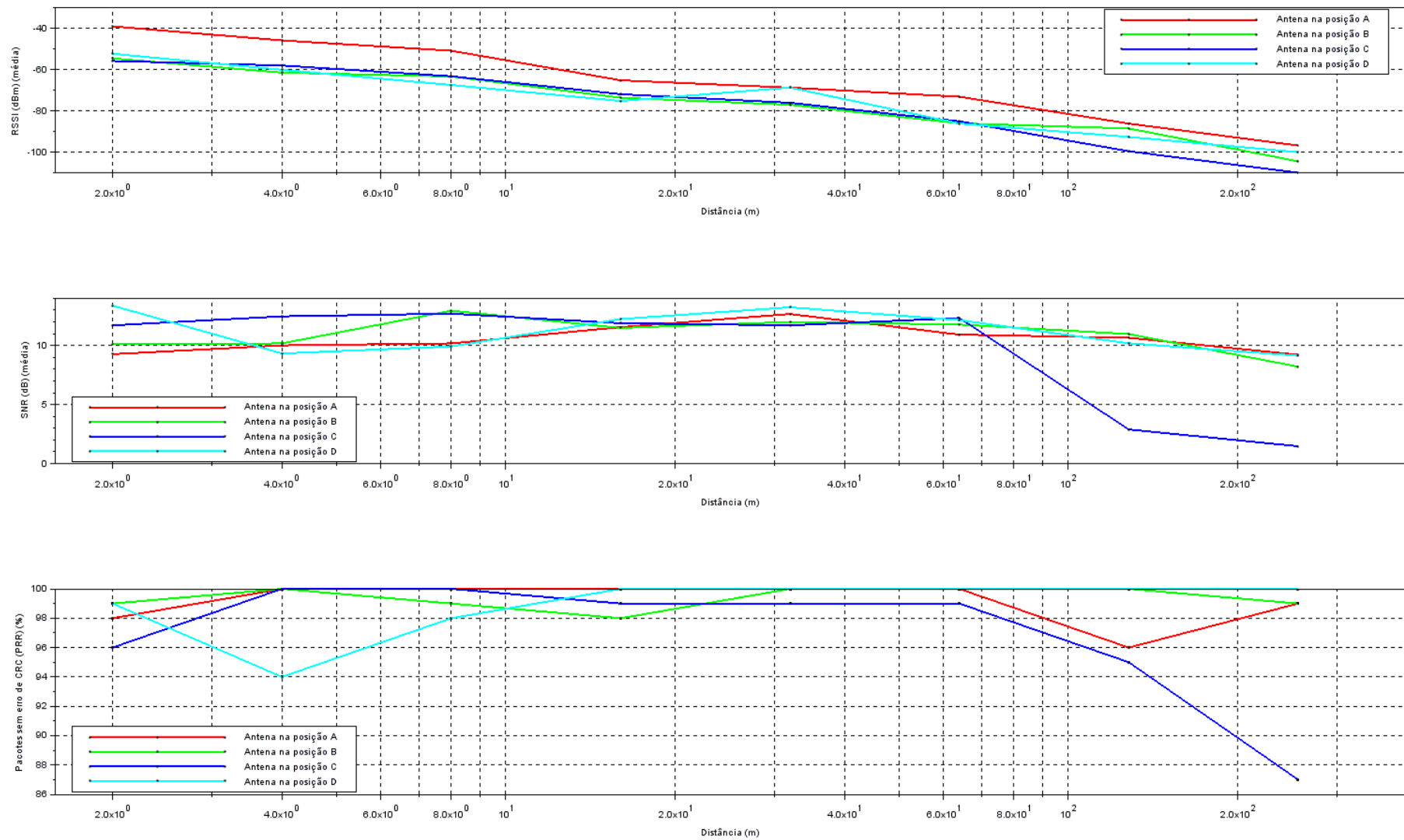


FIGURA 35 - GRÁFICO TCA2 DE DISTÂNCIAS POR RSSI, SNR E TRANSMISSÕES SEM ERRO DE CRC. FONTE: AUTOR.

São sumarizados no Quadro 12 os parâmetros de observação para PER, máximo, mínimo, média e desvio padrão de RSSI (em dBm) e SNR (em dB) de cada experimento. Na Figura 36, é visto de forma mais conveniente o gráfico em barras (histograma) de transmissões com erros de CRC para cada distância. A posição C apresentou a maior quantidade de erros no total de 25.

QUADRO12 - PARÂMETROS DE OBSERVAÇÃO PARA TCA2.

Experimento (pos. ant. / d)	PER (%)	RSSI (dBm)				SNR (dB)			
		Max	Min	Med	D. P.	Max	Min	Med	D.P.
A / 2 m	2,0	-36	-40	-39,01	0,48	10	6	9,27	0,83
B / 2 m	1,0	-53	-57	-54,51	0,90	13	5	10,1	1,32
C / 2 m	4,0	-54	-58	-55,76	0,81	14	6	11,71	2,04
D / 2 m	1,0	-51	-54	-52,27	0,61	14	10	13,38	0,83
A / 4 m	0,0	-44	-47	-45,82	0,68	13	6	10,01	0,93
B / 4 m	0,0	-59	-64	-61,39	1,04	13	5	10,18	1,54
C / 4 m	0,0	-57	-60	-57,96	0,68	14	8	12,47	1,70
D / 4 m	6,0	-58	-62	-60,04	0,89	14	4	9,33	2,48
A / 8 m	0,0	-49	-52	-50,81	0,50	11	10	10,18	0,38
B / 8 m	1,0	-60	-68	-63,29	1,39	14	10	12,95	1,15
C / 8 m	0,0	-61	-70	-63,17	1,42	14	10	12,7	1,42
D / 8 m	2,0	-65	-74	-67,39	1,58	14	5	9,92	1,80
A / 16 m	0,0	-61	-69	-65,12	1,71	14	9	11,56	1,47
B / 16 m	2,0	-67	-88	-73,55	3,60	14	9	11,49	1,48
C / 16 m	1,0	-68	-76	-71,85	1,90	14	10	11,89	1,36
D / 16 m	0,0	-72	-79	-75,13	1,53	14	10	12,24	1,40
A / 32 m	0,0	-67	-71	-68,68	0,88	14	11	12,67	1,04
B / 32 m	0,0	-73	-86	-76,96	2,67	14	10	12	1,42
C / 32 m	1,0	-73	-81	-76,01	1,73	14	8	11,71	1,66
D / 32 m	0,0	-67	-70	-68,64	0,65	14	11	13,24	0,85
A / 64 m	0,0	-72	-76	-73,08	0,78	14	6	10,92	1,84
B / 64 m	0,0	-81	-99	-85,96	3,01	14	9	11,78	1,49

C / 64 m	1,0	-81	-92	-84,98	1,93	14	7	12,33	1,45
D / 64 m	0,0	-82	-92	-86,03	2,06	14	10	12,15	1,43
A / 128 m	4,0	-84	-90	-86,07	1,29	14	4	10,66	1,87
B / 128 m	0,0	-84	-93	-88,42	1,78	14	9	10,97	1,38
C / 128 m	5,0	-90	-118	-99,48	5,45	13	-13	2,89	6,67
D / 128 m	0,0	-88	-103	-92,54	2,84	14	7	10,19	1,34
A / 256 m	1,0	-94	-101	-96,69	1,26	11	6	9,22	1,15
B / 256 m	1,0	-98	-110	-104,3	2,61	10	5	8,21	1,34
C / 256 m	13,0	-101	-123	-109,8	3,94	10	-20	1,47	7,9
D / 256 m	0,0	-96	-108	-99,9	2,31	12	4	9,14	1,45

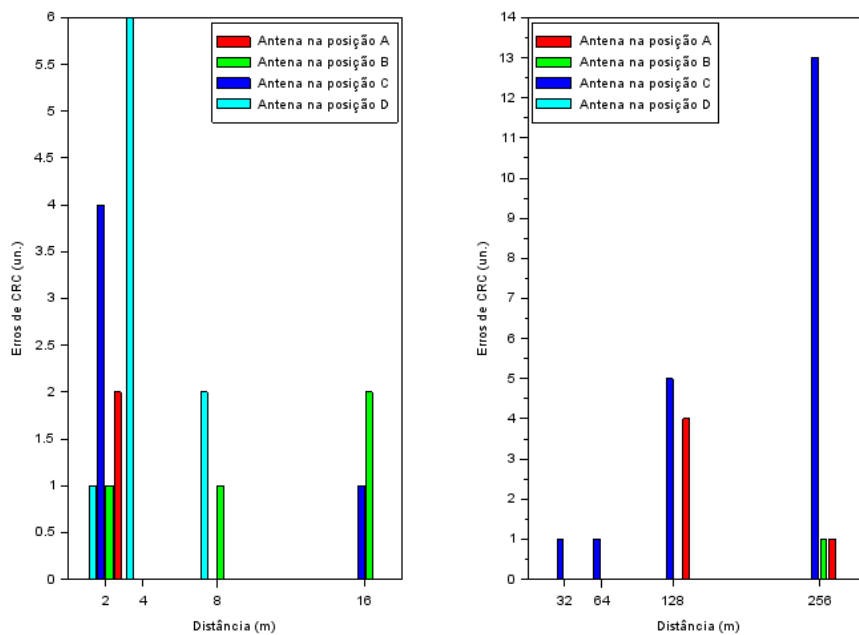


FIGURA 36 - GRÁFICO TCA2 HISTOGRAMA DE TRANSMISSÕES COM ERROS DE CRC PARA CADA DISTÂNCIA. FONTE: AUTOR.

Os dados empíricos serviram para calcular o expoente de perda de caminho através da eq. 4. Para tanto, foi escolhido a maior distância e então o valor de P_{RX} médio do Quadro 12, para $d = 256$ metros foi substituído na eq. 4 e o expoente passou a ser a incógnita. Os expoentes foram usados para traçar os prolongamentos (em tracejado) das curvas da Figura 33. Além disso, é visto na Figura 34, que é uma

ampliação da Figura 33, a distância máxima para o limiar de sensibilidade de -129 dBm. Os parâmetros usados e valores encontrados estão sumarizados no Quadro 13. Para o TCA2, quando a antena de recepção está na posição A, seria possível comunicação com distância de até 3360 m, de acordo com o limiar de sensibilidade.

Devido à posição da antena do TCA1 ter sido semelhante à posição A, pode-se comparar os dois resultados. Enquanto o TCA1 resultou em uma curva com expoente $N_{TCA1} = 2,6726$, o resultado TCA2 apresentou um expoente $N_{TCA2,A} = 2,8901$. Estes coeficientes ditam o quão forte o ambiente influencia a perda de caminho. Quanto maior o coeficiente, maior é a influência. Portanto, para a medição TCA1, o ambiente impactou menos na perda de caminho do que para a medição TCA2. De acordo com [46], $N = 2,32$ foi calculado para uma área urbana. Já em [34], uma área urbana pode ter N compreendido no intervalo de 2,7 a 3,6. Assim, os resultados obtidos condizem com os valores apresentados na literatura.

O fato de que o ambiente impactou mais a perda de caminho no TCA2 pode estar relacionado à manutenção da rede elétrica, com presença de corpos metálicos (caminhão de manutenção, rolo de condutores, etc) que ocorreu durante as medições ou até mesmo das próprias condições climáticas (comportamento natural do canal). Para o TCA1, não houve nenhuma transmissão com erro de CRC.

QUADRO 13 - PARÂMETROS PARA CALCULO DE N.

Experimento (pos. ant. / d)	P_{rx} (RSSI)	Parâmetros				N (calculado)	Distância (limiar de sensibilidade)
		P_{tx} (dBm)	G_{rx} (dBi)	G_{tx} (dBi)	λ (m)		
A / 256 m	-96,69	13	2,5	2,5	0,346	2,8901	3360 m
B / 256 m	-104,3	13	2,5	2,5	0,346	3,0826	1005 m
C / 256 m	-109,8	13	2,5	2,5	0,346	3,2222	1620 m
D / 256 m	-99,9	13	2,5	2,5	0,346	2,9712	2440 m
TCA1 / 256m	-88,06	13	2,5	2,5	0,346	2,6726	8720 m

O comportamento das curvas de SNR, RSSI e PRR na Figura 35 indicam uma melhor correlação entre o SNR e PRR do que RSSI e PRR. Para confirmar, os dados empíricos foram analisados quanto à correlação entre PRR, RSSI e SNR

seguindo o coeficiente de Pearson (ρ) usado por [13] para medir este tipo de correlação. Este coeficiente determina o grau da correlação entre as variáveis medidas assumindo valores no intervalo fechado $[-1,1]$. Valores negativos indicam correlação negativa, ao passo que valores positivos indicam correlação positiva. Caso o coeficiente seja zero, as variáveis não apresentam correlação linear.

Por fim, constatou-se um $\rho_{(RSSI,PRR)} = 0,0923$ e para $\rho_{(SNR,PRR)} = 0,4246$. Como ambos foram positivos, e $\rho_{(SNR,PRR)} > \rho_{(RSSI,PRR)}$ tem-se que o SNR é um melhor indicador da probabilidade de recepção de pacotes sem erros.

Após esta fina análise para transmissões de até 256 m de distância, foi realizado o TCA3 para se avaliar o alcance e potência de transmissão necessárias para comunicação dos protótipos. Utilizou-se também a posição de antena A devido ao seu melhor desempenho geral comprovado no TCA2.

c) TESTE EM CAMPO ABERTO 3 (TCA3)

É visto, respectivamente, nas Figuras 37, 38 e 39 os gráficos de distância por RSSI (dBm), SNR (dB) e PRR (%) para $P_{TX} = 13$ dBm e SF = 10 (medição a), $P_{TX} = 5$ dBm e SF = 12 (medição b) e $P_{TX} = 20$ dBm e SF = 12 (medição c). Nos gráficos, a curva azul (marcações em X) representa a taxa de recepção de pacotes sem erros de CRC, em relação a 100 pacotes, a curva vermelha (marcações em cruz) representa o SNR médio e a curva negra (marcações em bola com cruz) representa a potência de recepção, em RSSI.

As curvas de potência decaem conforme a distância até 375 m. Após esta distância, alguns pontos apresentam aumento na potência recebida, este comportamento é notável nos pontos de 500 m e 875 m, da Figura 37 e 750 m da Figura 39. Enquanto que, para os pontos de 500 m até 875 m, da Figura 38, a potência recebida, praticamente, permanece constante. As curvas 37 e 38 atingiram o limiar de sensibilidade para a distância máxima de 1000 m.

As curvas de SNR decaem conforme a distância até 500 m e a partir desta distância apresentam SNR negativo, exceto na Figura 38 onde o SNR apresentou comportamento singular na distância de 750m.

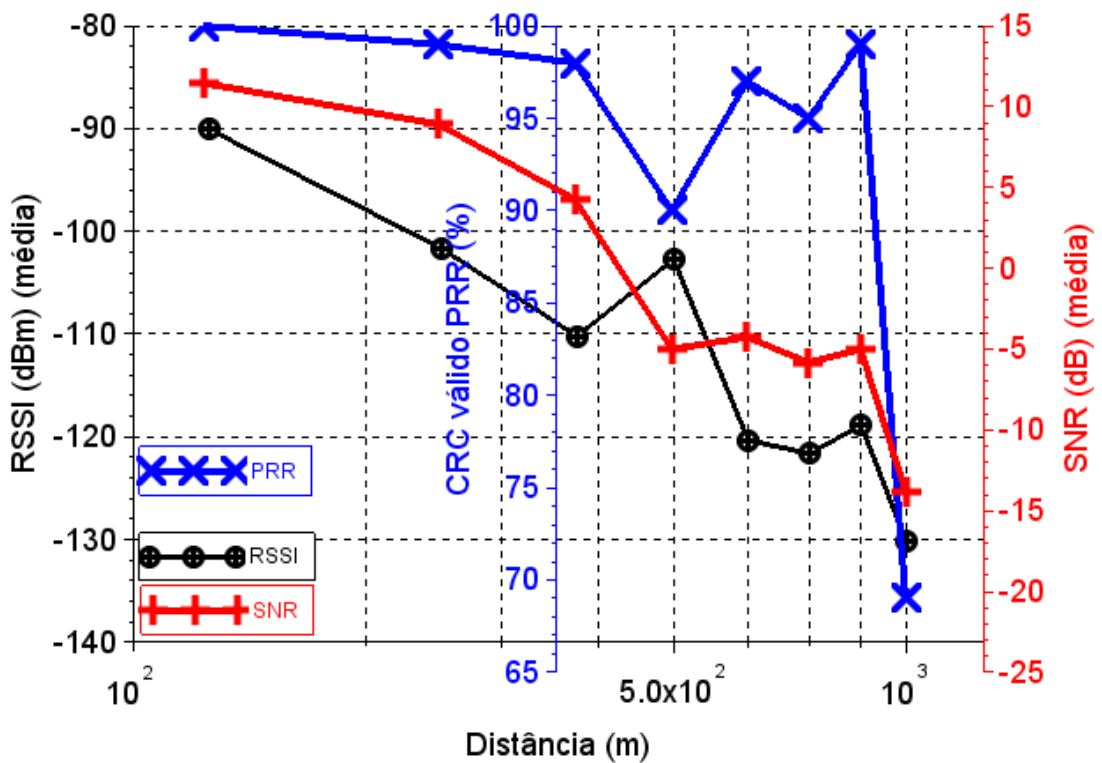


FIGURA 37 - GRÁFICO TCA3 RSSI, SNR E PRR DE ACORDO COM A DISTÂNCIA. MEDIÇÃO (A), PTX = 13 DBM, SF = 10, SENSIBILIDADE = -129. FONTE: AUTOR.

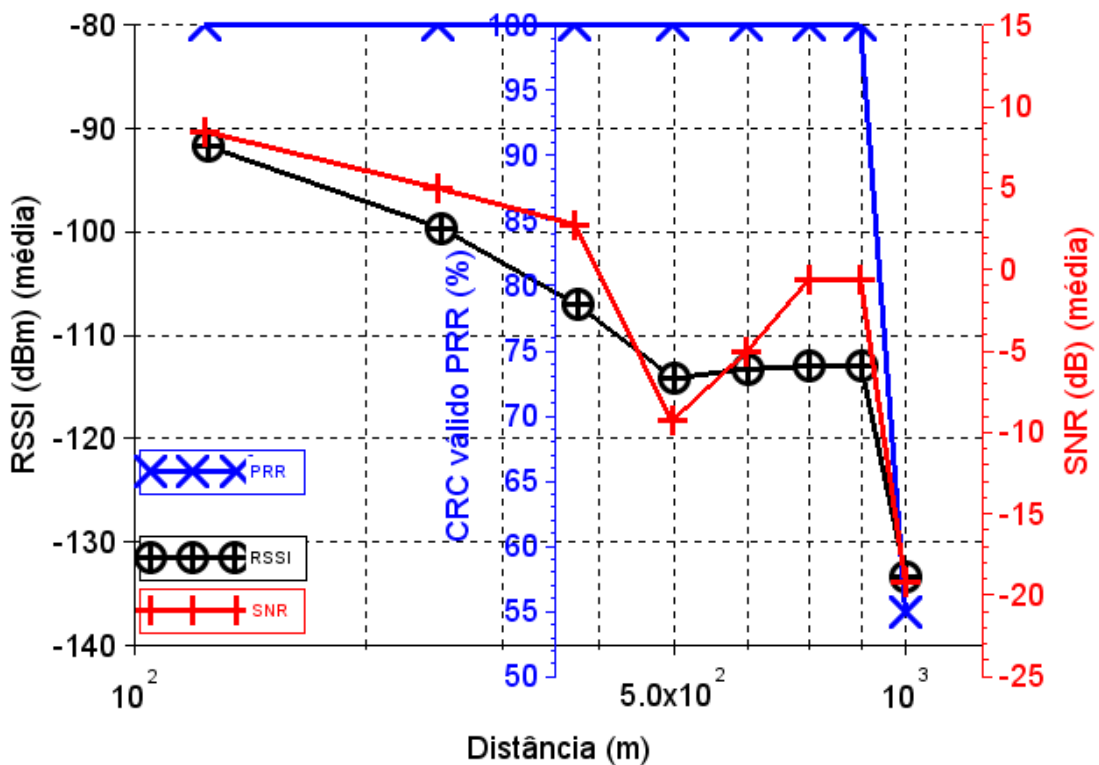


FIGURA 38 - GRÁFICO TCA3 RSSI, SNR E PRR DE ACORDO COM A DISTÂNCIA. MEDIÇÃO (B), PTX = 5 DBM, SF = 12, SENSIBILIDADE = -134. FONTE: AUTOR.

(a)	-130,1	13	2,5	2,5	0,346	3,2477	925 m
(b)	-133,4	5	2,5	2,5	0,346	3,1446	1045 m
(c)	-117,1	13	2,5	2,5	0,346	3,1161	3450 m

As distâncias estimadas foram obtidas de acordo com o limiar de sensibilidade, apesar de haver comunicação de até 1000 m para a medição (a) e (b) percebe-se que há degradação devido à perda de pacotes.

A medição (a) foi realizada em 16/01/2017 no período da tarde e o nó sensor reportou uma média total da temperatura ambiente de 29,18 °C. As medições (b) e (c) foram realizadas dia 21/01/2017 no período tarde/noite, reportando médias totais da temperatura ambiente de, respectivamente, 24,87 °C e 25,97 °C.

Na Figura 40 é visto um gráfico da aceleração (em g) reportada para 100 amostras transmitidas, para distância de 125 m da Figura 38. A aceleração nos eixos X e Y são praticamente zero. Enquanto para o eixo Z é a própria gravidade (1 g).

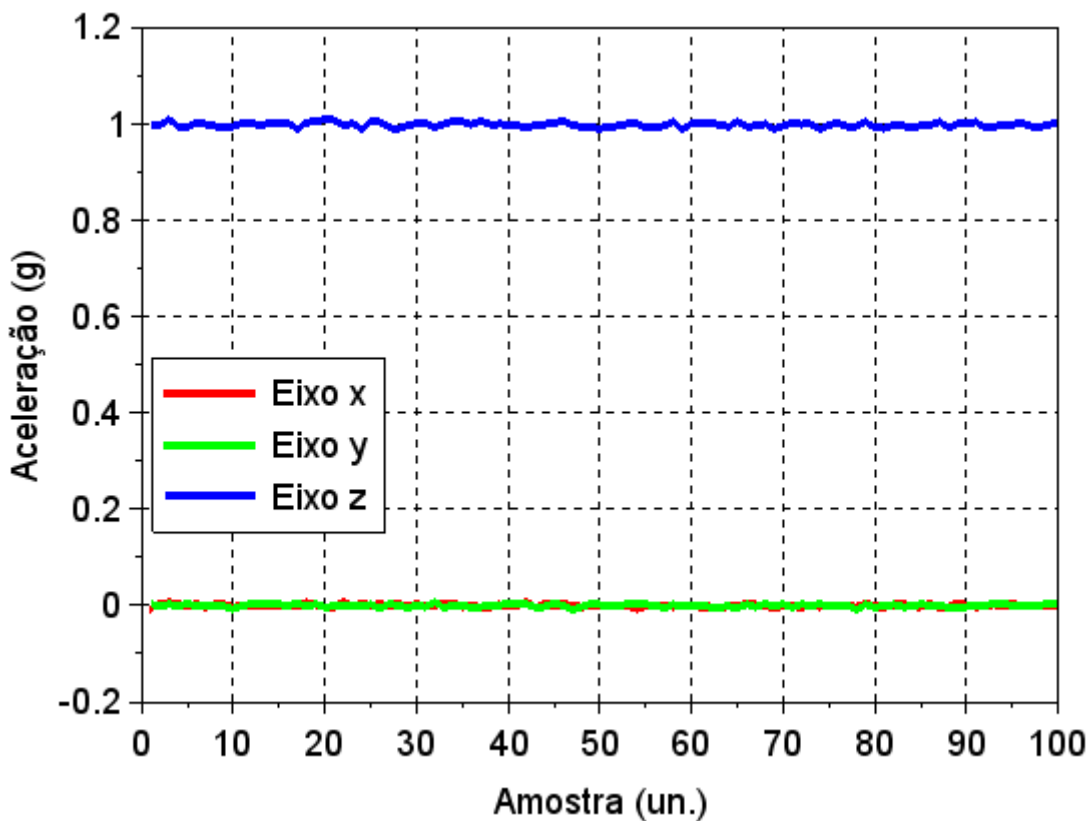


FIGURA 40 - GRÁFICO DA ACELERAÇÃO POR AMOSTRA.

4.2 COMENTÁRIOS

A ordem de testes TCA1, TCA2 e TCA3 foi importante para a caracterização do enlace RF. Cada teste contribuiu com escolhas para o próximo teste no ambiente interno à UFPB. Algumas limitações foram encontradas durante o trabalho, como a limitação de capacidade de fornecimento de corrente da placa de desenvolvimento Arduino Uno R3.

No tocante à confiabilidade, em termos de PRR, a potência de transmissão de 20 dBm apresentou 100% de PRR para a distâncias até 875 m. As potências de 13 dBm e 5 dBm apresentaram ao menos 90% PRR para a mesma distância. Potências menores podem ser exploradas, admitindo-se cerca de 10% de PER, no monitoramento de temperatura.

No tocante à análise de vibração, os dados do acelerômetro podem ser adquiridos no eixo desejado. Posteriormente, uma análise espectral dos dados pode ser feita para encontrar a magnitude/frequências de vibração. Na literatura [10], [11] e [12], os trabalhos utilizam a análise do eixo perpendicular ao sensor. A configuração 4 do Quadro 7 pode ser utilizada para uma maior taxa de dados.

Para TCA3, é possível que a medição (a) tenha sofrido mais influência de veículos (corpos metálicos) que (b) e (c). Os veículos são encontrados em ambientes urbanos, e estavam presentes ao longo do trajeto medido. Em particular, a medição (a) foi feita em um dia de semana, com maior movimentação de veículos.

5 CONCLUSÕES

5 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado versa sobre as características do enlace RF para comunicação entre o nó concentrador e o nó sensor prototipados. Estes nós podem ser utilizados no conceito de *smart grids*, fornecendo o monitoramento de parâmetros de temperatura e vibração por longas distâncias. Estas distâncias foram medidas até 1000 m. Na distância de 1000 m, 99% dos pacotes foram recebidos sem erros. A máxima distância de transmissão, medida, excede o que foi encontrado na literatura para RSSF e estimou-se que pode alcançar comunicação de aproximadamente 3500 m.

Foram apresentados estudos correlatos no âmbito de *smart grids* como o monitoramento de parâmetros em transformadores e influência de ruídos em RF. Além disso, foram apresentados dois padrões de comunicação via RF que apresentam mitigação de ruído e são utilizados para RSSF.

Também foi apresentado um protótipo do nó sensor/concentrador, com o padrão LoRa e sensores de temperatura e vibração. Estes dispositivos foram caracterizados quanto ao consumo e resposta RF. O protótipo desenvolvido consome menos de 120 mW (potência média) no cenário de transmissão escolhido. Foram descritas metodologias para testes em laboratório e em campo. Para os testes em campo aberto, os resultados possuem comportamento semelhante com os encontrados na literatura [13], [34] e [46].

Em relação ao trabalho [13], foi confirmada uma melhor correlação entre o PRR e SNR, que do PRR e RSSI, nas medições do enlace RF. Assim o SNR e o PRR podem ser considerados melhores indicadores da qualidade do enlace.

Os coeficientes de perda de caminho calculados variam de 2,67 até 3,24 e apresentaram conformidade com o encontrado na literatura [34] e [46], de 2,32 até 3,6.

De posse dos resultados, conclui-se que os protótipos estão aptos a realizar monitoramento das variáveis e reportá-las por longas distâncias em um ambiente urbano com relativa confiabilidade de recepção de pacotes.

Os códigos *open-source* foram disponibilizados à comunidade da biblioteca RadioHead. Foram sugeridas melhorias na parte de medição RSSIs e SNRs, em

conformidade com [42]. As sugestões foram aceitas e incorporadas a partir da versão 1.69 da biblioteca RadioHead.

Parte dos resultados deste trabalho foram utilizados para elaborar um artigo científico, aceito para publicação e apresentação oral no 2017 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS'2017): Segundo, J. T. D.; Souza, A. A. L., "Long range, low power wireless sensor network for temperature monitoring".

Alguns trabalhos futuros podem ser explorados a partir do que foi desenvolvido. Entre estes trabalhos, pode-se citar:

- Melhoria de consumo dos protótipos;
- Adaptação do nó sensor, para outros ambientes e/ou outras variáveis de monitoramento;
- Adaptação do nó sensor seguindo parte da proposta de [14], para redundância de comunicação de dados.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, Boletim Nº 2 de Janeiro - Acompanhamento da expansão da oferta, 2015.
- [2] Fitzgerald, A. E.; Kingsley, Jr. C.; Umans, S. D., Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência, 6. ed. Bookman, 2006.
- [3] Wang, M., Vandermaar A.J; Srivastava K.D, Review of Condition Assessment of Power Transformers In Service, IEEE Electrical Insulation Magazine. 2002. pp. 12-25.
- [4] Harris, D.; Saravolac, M.P, Condition monitoring in power transformers, IEE Colloq. Condition Monitoring Large Machines Power Transformers, pp. 7/1 - 7/3, June 1997.
- [5] Metwally, I. A., Failures, Monitoring and New Trends of Power Transformers, Potentials, IEEE, vol. 30, pp. 36-43, 2011.
- [6] Ribeiro, C. d. J.; Marques, A. P.; Azevedo, C. H. B.; Souza, D. C. P.; Alvarenga, B. P.; Nogueira, R. G, Faults and defects in power transformers - a case study, IEEE Electrical Insulation Conference. EIC 2009, pp. 142-145, 2009.
- [7] Zeng, Q.; Chen, H.; Bao, J. L.; Meng, Q. Z.; Lv, X. J.; Zhang, R. J., A survey of condition based maintenance and diagnosis technology in power distribution networks, 2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Piscataway, NJ, USA, 2012, p. 6 pp.
- [8] Weg, Transformador Óleo 30.0kVA 13.8/0.38kV CST ONAN, Catálogo online, <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%93leo/30-a-300-kVA/Transformador-%C3%93leo-30-0kVA-13-8-0-38kV-CST-ONAN/p/11861787>, acesso em Junho/2016.
- [9] Moghe, R., Yang, Y., Lambert, F.C., Divan, D., Design of a low cost self powered stick-on current and temperature wireless sensor for utility assets, in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., Sep. 2010.
- [10] Yoon, J. T.; Youn, B. D.; Park, K. M.; Lee, W., Vibration-based robust health diagnostics for mechanical failure modes of power transformers, 2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM). 2013.
- [11] Bartoletti, C.; Desiderio, M.; Di Carlo, D.; Fazio G.; Muzi F.; Sacerdoti G.; Salvatori F., Vibro-acoustic techniques to diagnose power transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19. 2004.

- [12] Beltle, M.; Tenbohlen, S., Power transformer diagnosis based on mechanical oscillations due to AC and DC currents, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 3, pp. 1515-1522, 2016.
- [13] Gungor, V. C.; Lu, B.; Hancke, G. P., Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *Industrial Electronics, IEEE Transactions* vol. 57, 2010.
- [14] F. Salvadori, C. S. Gehrke, A. C. de Oliveira, M. de Campos and P. S. Sausen, "Smart Grid Infrastructure Using a Hybrid Network Architecture," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1630-1639, Sept. 2013.
- [15] Grupo de Trabalho de Redes Eléctricas Inteligentes. Ministério de Minas e Energia. Relatório Smart Grid. Disponível em: www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf. Acesso em: 12/12/2016.
- [16] Moghe, R., Iyer, A.R., Lambert, F.C., Divan, D. M., A Low-Cost Wireless Voltage Sensor for Monitoring MV/HV Utility Assets. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 4, pp. 2002-2009, 2014.
- [17] Moghe, R., Lambert, F.C., Divan, D., Smart "Stick-on" Sensors for the Smart Grid, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, pp. 241-252, 2012.
- [18] Moghe, R., Yang, Y., Lambert, F.C., Divan, D., Design of a low cost self powered stick-on current and temperature wireless sensor for utility assets, in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo.*, Sep. 2010.
- [19] Braquehais, J. E. P.; Souza, A. A. L., Energy-autonomous wind speed smart sensor, 2014 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings*, Montevideo, 2014, pp. 931-935.
- [20] Xu, Q.; Send, R.; Paprotny, I.; White, R. M.; Wright, P. K., Miniature self-powered stick-on wireless sensor node for monitoring of overhead power lines, in *Proc. IEE E Energy Convers. Congr. Expo.* , pp. 2672–2675. 2013.
- [21] Yerra, R. V. P.; Bharathi, A. K.; Rajalakshmi, P.; Desai, U. B., WSN based power monitoring in smart grids, *Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, 2011 Seventh International Conference on, Adelaide, SA, 2011, pp. 401-406.
- [22] Sultan, S.; Rana, U.; Ahmed, I.; Rabbani, S., A New Technology of Online-Condition Monitoring of Energy Conservation Generation & Loads, *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 4 No. 1, 2013
- [23] Sung, W. T.; Hsu, C. C., Intelligent environment monitoring system based on innovative integration technology via programmable system on chip platform and ZigBee network, in *IET Communications*, vol. 7, no. 16, pp. 1789-1801, November 5 2013.

- [24] Lima, S. S., Sistema de monitoramento de transformadores de distribuição utilizando modelos térmicos e tecnologias Java e Bluetooth. 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012
- [25] Semedo, S. M. V.; Oliveira, J. E. G.; Cardoso, F. J. A., Remote monitoring of high-voltage disconnect switches in electrical distribution substations, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, 2014, pp. 2060-2064.
- [26] Amigo, B. N.; De Paula, P. H. O.; Segatto, M. E. V.; Garcia, A. S.; Peixoto, S.; Marsola, V. J.; Kamizaki S., Implementation of an autonomous monitoring network in a 525kv substation using ZigBee technology. 2013 IEEE PES Conference On Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA). 2013.
- [27] Roscoe, N. M.; Judd, M. D., Harvesting Energy From Magnetic Fields to Power Condition Monitoring Sensors, in IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 6, pp. 2263-2270, June 2013.
- [28] Niancheng Z.; Jingwei, Z.; Hong G., An Online Temperature Measurement System Based Wireless Communication Technology, 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006, pp. 1-3.
- [29] Dargie, W. Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art. IEEE Sensors Journal vol. 12, 2012.
- [30] Salvadori F. et al., "Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network With Dynamic Power Management," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 9, pp. 3104-3111, Sept. 2009.
- [31] Mottola, L.; Picco, G. P., Programming Wireless Sensor Networks: Fundamental Concepts and State of the Art. ACM Computing Surveys (CSUR'2011). 2011.
- [32] Razavi, B., RF Microelectronics. 2nd Ed. Prentice Hall.
- [33] Friis, H. T., A Note on a Simple Transmission Formula, in Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.
- [34] Rappaport, T.S., Comunicações sem Fio: Princípios e Práticas. Prentice Hall, Ed.2, 2002.
- [35] Sacuto F.; Agba, B. L.; Gagnon, F.; Labeau F., Evolution of the RF characteristics of the impulsive noise in high voltage environment, SmartGridComm 2012 Workshop – Communications within power substations: breaking the EM barrier. 2012.

- [36] Zhou, Z.; Wu, J.; Tariq, M.; Sato, T., Performance evaluation of WLAN under impulsive electromagnetic interference in substation, IEEE International Conference on ICT Convergence (ICTC), 2013. 2013.
- [37] Jia, J.; Meng, J., Partial discharge impulsive noise in electricity substations and the impact on 2.4 GHz and 915 MHz ZigBee communications, IEEE Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013. 2013.
- [38] Yuehong, C.; Yong, X.; Xiao, Y.; Kaiyu, Q. Wireless ZigBee transceiver for smart meter reading system, IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM), 2012. 2012.
- [39] Woo, L.; Ferens, K.; Kinsner, W. Reliability of ZigBee networks under broadband electromagnetic noise interference, 23rd Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010. 2010.
- [40] Goursaud, C.; Gorce, J., Dedicated networks for IoT : PHY / MAC state of the art and challenges, EAI endorsed transactions on Internet of Things, 2015.
- [41] Semtech Corporation, "SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Design Guide, AN1200.13, Rev. 1", Julho de 2013.
- [42] Semtech Corporation, "SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver", Datasheet 4a Revisão, Março de 2015.
- [43] Semtech Corporation, "Lora Modulation Basics, AN1200.22, Rev. 2", Maio de 2015.
- [44] EM Microelectronic, "Fact sheet EM9101", Fact Sheet Versão 2.1, Agosto de 2014.
- [45] Semtech Corporation, "SX1272/3/6/7/8 LoRa Modem Low Energy Consumption Design, Rev. 1", Julho de 2013.
- [46] Petajajarvi, J.; Mikhaylov, K.; Roivainen, A.; Hanninen, T.; Pettissalo, M., On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology, ITS Telecommunications (ITST), 2015 14th International Conference on, Copenhagen, 2015, pp. 55-59.
- [47] Aref M.; Sikora, A., Free space range measurements with Semtech Lora™ technology, Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS-SWS), 2014 2nd International Symposium on, Offenburg, 2014, pp. 19-23.
- [48] Wendt, T.; Volk F.; Mackensen, E., A benchmark survey of long range (LoRa™) spread-spectrum-communication at 2.45 GHz for safety applications, Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON), 2015 IEEE 16th Annual, Cocoa Beach, FL, 2015, pp. 1-4.

- [49] Lukas; Tanumihardja, W. A.; Gunawan, E., On the application of IoT: Monitoring of troughs water level using WSN, Wireless Sensors (ICWiSe), 2015 IEEE Conference on, Melaka, 2015, pp. 58-62.
- [50] National Semiconductor, "LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors", Novembro de 2000.
- [51] InvenSense Inc., "MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Rev. 4.2", Agosto de 2013.