

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

LUÍS FABIANO DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DA MOBILIDADE DE
ELEMENTOS NA REDE IEEE 802.15.4 ATRAVÉS DO
DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
SIMULAÇÃO**

PUC CAMPINAS

2008

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

GRÃO-CHANCELER

Dom Bruno Gamberini

MAGNÍFICO REITOR

Prof. Pe. Wilson Denadai

VICE-REITORA

Prof^a. Dra. Ângela de Mendonça Engelbrecht

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Prof^a. Dra. Vera Engler Cury

**DIRETOR DO CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE
TECNOLOGIAS**

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

COORDENADOR DO PROGRAMA DE

PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO DE REDES DE
TELECOMUNICAÇÕES**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GESTÃO DE REDES E SERVIÇOS

Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade

LUÍS FABIANO DA SILVA

**INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DA MOBILIDADE DE
ELEMENTOS NA REDE IEEE 802.15.4 ATRAVÉS DO
DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
SIMULAÇÃO**

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação na área de concentração Gestão de Redes e Serviços, Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

PUC CAMPINAS

2008

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas e
Informação - SBI - PUC-Campinas

t621.3845 Silva, Luís Fabiano da.
S586i Investigação do impacto da mobilidade de elementos da rede
IEEE 802.15.4 através do desenvolvimento de uma plataforma de
simulação / Luís Fabiano da Silva. - Campinas: PUC-Campinas, 2008.
103p.

Orientador: Omar Carvalho Branquinho.
Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de
Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias,
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui anexos e bibliografia.

1. Sistemas de comunicação sem fio. 2. Engenharia elétrica.
3. Sistemas de telecomunicações. 4. Sistemas de comunicação em
banda larga. I. Branquinho, Omar Carvalho. II. Pontifícia Universidade
Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de
Tecnologias. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

20.ed.CDD - t621.3845

LUÍS FABIANO DA SILVA

**" INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DA MOBILIDADE DE
ELEMENTOS NA REDE IEEE 802.15.4 ATRAVÉS DO
DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE
SIMULAÇÃO "**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional em Gestão de Redes de Telecomunicações do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações.

Área de Concentração: Gestão de Redes e Serviço.

Orientador: Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho

Dissertação defendida e aprovada em 17 de dezembro de 2008 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof.ª Dr.ª Norma Reggiani
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Prof. Dr. Paulo Cardieri
Universidade Estadual de Campinas

À minha esposa Juliete e aos meus pais que sempre me apoiaram e me deram incentivo para realizar mais esta etapa da minha formação.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

Pela força e proteção para vencer os obstáculos da vida.

Ao Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho,

Pela orientação, apoio, amizade e compreensão.

Aos doutores professores do programa,

Pelas valiosas informações e experiências compartilhadas durante as aulas.

Aos meus colegas de mestrado,

Pela convivência e amizade durante este programa.

À PST Eletronics S.A.,

Pelo apoio financeiro que me propiciou alcançar mais essa etapa na minha carreira.

À Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP,

Pelo apoio financeiro dado através do Laboratório de Pesquisa em Sistemas Rádio (LPSiRa).

“Mas o Senhor disse-lhe: ‘Não te deixeis impressionar pelo seu belo aspecto, nem pela sua alta estatura, porque eu o rejeitei. O que o homem vê não é o que importa: o homem vê a face, mas o Senhor olha o coração.’”

I Samuel 16:7

RESUMO

SILVA, Luís Fabiano. *Investigação do Impacto da Mobilidade de Elementos na Rede IEEE 802.15.4 através do Desenvolvimento de uma Plataforma de Simulação*. 2008. Folhas 103f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2008.

O padrão de rede IEEE 802.15.4 vem sendo utilizado como solução adequada para redes de sensores sem fio em muitos ambientes e áreas de atuação. Este tipo de rede tem características específicas que a diferem de outros tipos de rede sem fio. Este trabalho visa avaliar o impacto da mobilidade de elementos na rede IEEE 802.15.4. Para isso, foi desenvolvida uma plataforma de simulação que contém os requisitos específicos necessários para avaliar e comparar ambientes com e sem mobilidade. Os resultados vão mostrar que a mobilidade dos elementos nos cenários avaliados provocou degradação do sinal em pequenas distâncias, mas em distâncias entre 30 e 40 metros a mobilidade causou uma melhora na taxa de transmissão dos elementos, assim como em distâncias maiores que 60 metros.

Termos de indexação: IEEE 802.15.4, Mobilidade, Simulação, Weibull.

ABSTRACT

SILVA, Luís Fabiano. *Mobility Impact Research on IEEE 802.15.4 Network through Simulation Platform*. 2008. Folhas 103f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campinas, 2008.

The IEEE 802.15.4 network standard is being used as a suitable solution for wireless sensor networks in many environments and areas of expertise. This kind of network has specific characteristics that differ from others types of wireless network. This work intends to analyse the mobility impact on IEEE 802.15.4 elements. For this reason it was developed a simulation platform that contains specific requirements necessary to evaluate and compare environments with and without mobility. The results will show that the mobility of elements in the scenarios evaluated caused degradation of the signal at short distances, but for distances between 30 and 40 meters in mobility caused an improvement in the rate of transmission of elements, as well as at distances greater than 60 meters.

Index terms: IEEE 802.15.4, Mobility, Simulation, Weibull.

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Áreas de atuação das redes de sensores sem fio.....	22
Figura 2. Estrutura de um elemento sensor.	23
Figura 3. Exemplo da miniaturização como no sensor Mica2DOT2.....	23
Figura 4. Exemplo da estrutura das redes de sensores sem fio.....	26
Figura 5. Categorias das redes sem fio.....	27
Figura 6. Classificação das redes sem fio de acordo com a taxa de transmissão. ...	29
Figura 7. Pilha de protocolos definido no padrão IEEE 802.15.4.	31
Figura 8. Modulação e espalhamento espectral.....	33
Figura 9. Exemplo das temporizações nas transmissões em modo slotted e un-slotted.....	36
Figura 10. Exemplo do uso da técnica de CSMA/CA.	38
Figura 11. Fluxograma da técnica CSMA/CA.....	39
Figura 12. Topologias possíveis para redes IEEE 802.15.4. a) ponto multiponto b) ponto a ponto e c) mesh ou cluster-tree.....	42
Figura 13. Tipos de comunicação entre os elementos da rede IEEE 802.15.4. a) comunicação direta b) comunicação indireta.....	43
Figura 14. Estrutura dos pacotes para o padrão IEEE 802.15.4.	44
Figura 15. Resultados de BER para os padrões IEEE 802.15.4, IEEE 802.11b, IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.3.	45
Figura 16. Atenuação (L) em função do coeficiente γ	53
Figura 17. Diferentes valores de σ	54
Figura 18. Variação da intensidade de sinal.....	56
Figura 19. Modelo do canal.....	56
Figura 20. Gráfico de BER considerando mobilidade.....	58
Figura 21. Procedimento completo da simulação.....	60
Figura 22. Fluxograma básico da plataforma de simulação. As etapas de Definições (1), Tentativa de envio de pacote (2), Registro do envio de pacote (3) e Análise dos resultados (4) serão detalhados.....	62
Figura 23. Fluxograma do processo de Definições (1).....	64
Figura 24. Fluxograma do processo de Tentativa de envio de pacote (2).....	66
Figura 25. Fluxograma do processo de Registro de envio de pacote (3).	67
Figura 26. Fluxograma do processo de Análise dos resultados (4).....	68
Figura 27. Exemplo da disposição dos elementos ao longo das simulações. Nas condições (1)(2)(3) e (4) os elementos mantêm a distância constante de (a)(b)(c) e (d), respectivamente, em relação ao coordenador.	74
Figura 28. Gráficos da taxa de transmissão média da rede por tamanho de payload para o Cenário 1 e Cenário 2. O número de elementos também foi alterado para verificar o impacto na taxa de transmissão, mantendo a distância de 10 metros.....	78
Figura 29. Gráfico da taxa de transmissão de acordo com o tamanho do payload para o Cenário 1 e o Cenário 2. A análise foi feita para 10 elementos e distância de 10 metros.	79
Figura 30. Gráfico da taxa de transmissão de 1 elemento no Cenário 1 para payload de 1 até 40 bytes durante a transição de SIFS para LIFS.	80

Figura 31. Gráficos da taxa de transmissão média por elemento de acordo com o tamanho do payload no Cenário 1 e no Cenário 2. A análise foi feita para 1 elemento, 2 elementos, 5 elementos e 10 elementos, mantendo a distância de 10 metros.....	81
Figura 32. Gráficos da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado para o Cenário 1 e o Cenário 2. A análise foi feita utilizando payload de 1 byte, 13 bytes, 55 bytes e 127 bytes.....	82
Figura 33. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando o Cenário 1 e o Cenário 2 para payload de 55 bytes com 1 elemento.....	83
Figura 34. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando os cenários 1 e 2 para payload de 55 bytes com 2 elementos.	84
Figura 35. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando os cenários 1 e 2 para payload de 55 bytes com 5 elementos.	85
Figura 36. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando os cenários 1 e 2 para payload de 55 bytes com 10 elementos.	85
Figura 37. Gráficos da taxa de transmissão para diferentes valores de macMinBE e para diferentes quantidades de elementos para o Cenário 1 e o Cenário 2. A análise foi feita utilizando 55 bytes de payload e distância de 10 metros.	86
Figura 38. Gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenador com o valor do macMinBE variando de 1 a 5 para o Cenário 1 e o Cenário 2.	87
Figura 39. Gráficos da taxa de transmissão pela distância do elemento em relação ao coordenador com o valor 1 do macMinBE e 1 elemento com 55 bytes de payload para o Cenário 1 e o Cenário 2.....	88
Figura 40. Gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 1 variando a quantidade de elementos.	89
Figura 41. Gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 2 variando a quantidade de elementos.	90
Figura 42. Gráficos da porcentagem de colisão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 1, variando a quantidade de elementos.	91
Figura 43. Gráficos da porcentagem de colisão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 1 e Cenário 2 para 5 e 10 elementos com payload de 55 bytes.	92
Figura 44. Gráficos da porcentagem de colisão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 2, variando a quantidade de elementos.	93
Figura 45. Gráficos da porcentagem de pacotes errados pela distância dos elementos em relação ao coordenador para o Cenário 1 e o Cenário 2, variando o tamanho do payload.	94
Figura 46. Gráfico da porcentagem de pacotes errados pela distância do elemento em relação ao coordenador para o Cenário 1 e o Cenário 2 com payload de 55 bytes para 1 elemento.	95

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1. Mapeamento de símbolo para chip.	34
Quadro 2. Bandas de frequência e taxa de transmissão.....	34
Quadro 3. Valores para as constantes utilizadas na MAC.	38
Quadro 4. Valores sugeridos para SIFS e LIFS.	40
Quadro 5. Fator de atenuação em função do ambiente.	52
Quadro 6. Desvio padrão da log-normal em função do ambiente	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	=	<i>Acknowledgment</i>
Anatel	=	Agência Nacional de Telecomunicações
ASK	=	<i>Amplitude shift keying</i>
AWGN	=	<i>Additive White Gaussian noise</i>
BE	=	<i>Backoff exponential</i>
BER	=	<i>Bit error rate</i>
BPSK	=	<i>Binary phase-shift keying</i>
CCA	=	<i>Clear channel assessment</i>
CRC	=	<i>Cyclic redundancy check</i>
CSMA/CA	=	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CSMA/CD	=	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect</i>
DSSS	=	<i>Direct sequence spread spectrum</i>
FCS	=	<i>Frame check sequence</i>
FFD	=	<i>Full-Function Device</i>
GTNetS	=	<i>Georgia Tech Network Simulator</i>
IEEE	=	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFS	=	<i>Interframe spacing</i>
kbps	=	Kilo bits por segundo
LIFS	=	<i>Long interframe spacing</i>
LR-WPAN	=	<i>Low-Rate Wireless Personal Area Networks</i>
m	=	Metros
MAC	=	<i>Media Access Control</i>
MHz	=	<i>Mega Hertz</i>
NB	=	<i>Number of backoffs</i>
O-QPSK	=	<i>Offset quadrature phase-shift keying</i>
PER	=	<i>Packet error rate</i>
PHY	=	<i>Physical</i>
PN	=	<i>Pseudo-random noise</i>
PPDU	=	<i>PHY protocol data units</i>
PSSS	=	<i>Parallel sequence spread spectrum</i>
RFD	=	<i>Reduced-Function Device</i>
SER	=	<i>Symbol error rate</i>
SIFS	=	<i>Short interframe spacing</i>
SMP	=	Serviço Móvel Pessoal

SNR	=	<i>Sinal-to-noise ratio</i>
UWB	=	<i>Ultra-Wide Band</i>
WLAN	=	<i>Wireless Local Area Networks</i>
WMAN	=	<i>Wireless Metropolitan Area Networks</i>
WPAN	=	<i>Wireless Personal Area Networks</i>
WSN	=	<i>Wireless Sensor Networks</i>
WWAN	=	<i>Wireless Wide Area Networks</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação.....	18
1.2	Definição do problema	19
1.3	Estrutura da dissertação.....	20
2	REDE DE SENSOR SEM FIO.....	21
2.1	Rede de sensor sem fio.....	21
2.2	Características dos elementos da rede de sensor sem fio.....	24
2.3	Estrutura da rede de sensores sem fio	25
2.4	Comparação com outras redes sem fio	26
3	REDE IEEE 802.15.4	30
3.1	Padrão IEEE 802.15.4.....	30
3.2	Camada Física	31
3.3	Subcamada MAC	35
3.4	Estrutura dos elementos.....	41
3.5	Topologia dos elementos	41
3.6	Tipos de comunicação	43
3.7	Estrutura dos dados	44
3.8	Desempenho das redes IEEE 802.15.4.....	44
4	EFEITOS DO AMBIENTE E MOBILIDADE	48
4.1	Perturbações do sinal.....	48
4.1.1	Modelo Log-Distance.....	49

4.1.2	Modelo de Shadowing	53
4.2	Instabilidade em função da mobilidade.....	55
4.3	Desempenho da rede IEEE 802.15.4 com mobilidade.....	56
4.4	Avaliação de desempenho	57
5	PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO	59
5.1	Desenvolvimento de uma plataforma de simulação.....	59
5.2	Condições iniciais da plataforma de simulação	61
5.3	Estrutura da plataforma de simulação	61
5.4	Mobilidade dos nós	70
5.5	Resultados esperados das simulações	70
6	RESULTADOS.....	72
6.1	Preparação do simulador	72
6.2	Valores utilizados nas transmissões.....	73
6.3	Características do ambiente.....	73
6.4	Cenários de testes	74
6.5	Métricas para avaliação de desempenho	76
6.6	Resultados	77
7	CONCLUSÕES.....	97
7.1	Principais Resultados e Contribuições	97
7.2	Trabalhos Futuros	99
8	REFERÊNCIAS.....	101
	APÊNDICE A – CÓDIGO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO	104

APÊNDICE B – CÓDIGO DAS SIMULAÇÕES DO CENÁRIO 1 E CENÁRIO 2.....	117
ANEXO C – PROBABILIDADE DE ERRO DE PACOTE.....	120

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é apresentado o objetivo desse trabalho, mostrando a motivação e definição do problema a ser estudado. Além disso, é mostrada a estrutura dessa dissertação, determinando a divisão por capítulo e um breve comentário sobre o conteúdo dos mesmos.

1.1 Motivação

As redes de sensores sem fio apresentam um novo ramo das redes sem fio que vem ganhando força ao longo do tempo. As características apresentadas por esse tipo de rede as tornam atrativas em diversas aplicações. Existem muitos estudos para determinar como as redes de sensores sem fio influenciarão o cotidiano das pessoas (CHONG; KUMAR, 2003) e quais são as características e áreas de atuação desse tipo de rede (TIMMONS; SCANLON, 2004). Apesar de todo esse esforço, muito pouco é discutido sobre como esse tipo de rede irá se comportar em ambientes com mobilidade. Esse tipo de estudo se mostra interessante, uma vez que os sensores estão se tornando cada vez mais presentes, e o ambiente com mobilidade é certamente um ambiente em que este tipo de rede pode ser utilizado.

Para analisar o comportamento das redes de sensores sem fio, especificamente do padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.15.4 (IEEE, 2006), em ambientes com mobilidade é necessário utilizar uma quantidade variada de elementos e cenários. Trabalhar com uma quantidade variada de elementos e encontrar cenários propícios para os testes não é uma tarefa trivial e algumas vezes inviabiliza os estudos. Nesse contexto entram os simuladores de redes, o qual pode ser utilizado para criar cenários com os mais diversos tipos de elementos e características do ambiente. Este é um recurso válido que demonstra grande aceitação por economia de tempo e resultados concretos.

O padrão IEEE 802.15.4 apresenta características que o tornam robusto em relação à capacidade de comunicação em ambientes com interferências (SIKORA; GROZA, 2005). Em uma análise superficial, ao considerar que o padrão IEEE 802.15.4 pode trabalhar com uma relação sinal ruído muito menor que outros tipos de rede sem fio, pode ser entendido que o padrão IEEE 802.15.4 tenha desempenho satisfatório em regiões de alta variabilidade do sinal causada por elemento com mobilidade. Nem sempre essa análise é verdadeira. É necessária uma análise mais aprofundada do impacto da mobilidade de elementos dentro de redes IEEE 802.15.4. O ambiente com mobilidade pode ser modelado através de diversas distribuições (CAVERS, 2002). Em (LINO, 2008) foi verificado que a distribuição de Weibull caracterizou melhor um ambiente *indoor* proposto para aquele trabalho. Por se tratar de uma caracterização utilizando um ambiente conhecido e por ser um trabalho extenso e preciso em suas medidas, esta distribuição foi utilizada neste trabalho, mantendo as características de velocidade e área de cobertura do ambiente utilizado para aquele trabalho.

1.2 Definição do problema

O objetivo desse trabalho foi investigar o impacto da mobilidade de elementos na rede IEEE 802.15.4 utilizando para isso uma plataforma de simulação desenvolvida para esse fim através do software científico para computação numérica Scilab (SCILAB, 2008). Uma vez definida os cenários que melhor caracterizassem a utilização de uma rede de sensores, foram definidas as métricas de avaliação de desempenho para diferentes condições. Através do simulador desenvolvido para esse fim, foram analisadas todas as condições de contorno estabelecidas para esse trabalho.

Como conclusão desse trabalho foi obtido o resultado da investigação do impacto da mobilidade, determinando para isso cenários de testes e avaliando o impacto da mobilidade de elementos nas redes IEEE 802.15.4 através de métricas definidas para este tipo de rede de sensores sem fio.

1.3 Estrutura da dissertação

Essa dissertação está dividida como se segue. No Capítulo 2 são apresentadas as características das redes de sensores sem fio, passando por um histórico da evolução desse tipo de rede. No Capítulo 3 é apresentado o padrão IEEE 802.15.4, mostrando suas características pertinentes a esse trabalho. No Capítulo 4 são analisados os efeitos do ambiente e mobilidade. No Capítulo 5 é mostrada a plataforma de simulação desenvolvida para análise de redes IEEE 802.15.4 em ambientes com mobilidade. No Capítulo 6 são apresentados os resultados da investigação do impacto da mobilidade de elementos nas redes IEEE 802.15.4 para diferentes cenários. No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REDE DE SENSOR SEM FIO

Nesse capítulo são apresentadas as redes de sensores sem fio, considerando seus componentes, sua estrutura e quais são as diferenças para os outros tipos de redes sem fio. Além disso, são apresentados cenários e aplicações que hoje utilizam as redes de sensores sem fio.

2.1 Rede de sensor sem fio

As redes de sensor sem fio estão se tornando cada vez mais comuns em vista da compactação e diminuição do valor dos seus componentes. Com isso, o que antes era controlado por processos não automatizados, hoje é viável controlar através desse tipo de rede, quebrando paradigmas e conseguindo aumentar a eficiência desses processos (SOHRABY; MINOLI; ZNATI, 2007).

A utilização de sensor sem fio atende a uma grande variedade de áreas e de aplicações. Existem sensores para controle de processos químicos, de caldeiras, de detecção de contaminação em área de riscos, etc. Essas necessidades vão até a monitoração do corpo humano. Os sensores muitas vezes estão ligados ao corpo humano para tentar salvar vidas, seja no monitoramento de pacientes em hospitais, seja em exames rotineiros (TIMMONS; SCANLON, 2004).

Como mostrado na Figura 1, as redes de sensores sem fio podem ser encontradas em diversas áreas, como: automação residencial, onde sensores sem fio controlam acesso e iluminação; cuidados pessoais, onde são utilizados para monitoramento de pacientes e exercícios; controle industrial, onde são utilizados para gerenciamento de consumo de energia e processos industriais; controle residencial e comercial, onde são utilizados para segurança ou para controlar irrigação de jardins; computadores e periféricos, onde são utilizados em *mouse* ou teclados; e em eletrônicos de consumo, onde são utilizados em aparelhos de TVs e controles remotos.



Figura 1. Áreas de atuação das redes de sensores sem fio.

Uma rede de sensor sem fio é composta por um conjunto de elementos sensores. Como mostrado na Figura 2, esses elementos sensores são formados por:

- um transdutor, que transforma alguma grandeza não elétrica em um sinal elétrico, podendo ser interpretado e assim gerar um dado sobre seu estado;
- uma unidade de processamento local, onde o dado referente ao estado do sensor pode ser analisado e transformado em informação para ser enviado de acordo com o protocolo utilizado;
- um transceptor, que tem a capacidade de enviar e receber informações através de um meio de comunicação, no caso, sem fio;

- uma fonte de alimentação.

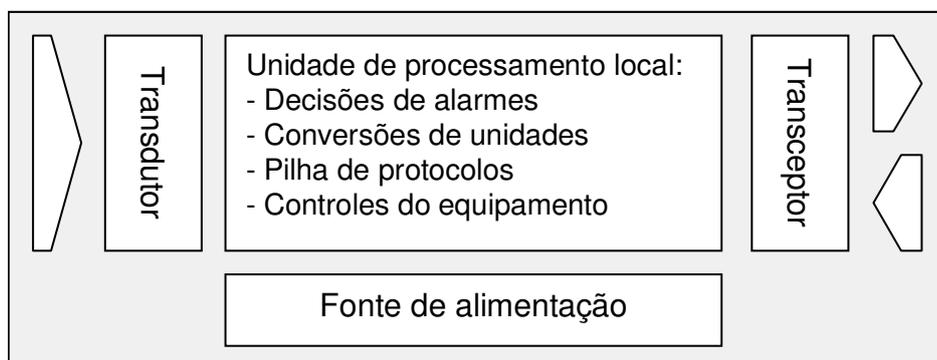


Figura 2. Estrutura de um elemento sensor.

O desenvolvimento de elementos sensores foi possível graças ao processo de miniaturização, que hoje tornou possível carregar computadores ultraportáteis em bolsas e transportá-los para todos os lugares. Com essa evolução, os sensores sem fio, como mostrado na Figura 3, tornaram-se cada vez menores. Nesse tipo de rede, a utilização de equipamentos pequenos torna-se uma vantagem pela praticidade. Hoje é possível encontrar pequenos equipamentos sensores que coletam informações e transmitem para centrais de monitoramento. Se não fosse pelo tamanho, isso seria inviável.



Figura 3. Exemplo da miniaturização como no sensor Mica2DOT2.

Fonte: Crossbow Technology, Inc.

Para que todos os elementos consigam utilizar o meio de comunicação para enviar e receber dados é necessário que se estabeleça o protocolo de comunicação. Isso os tornam mais complexos se comparados a simples sensores compostos somente por transdutores. Porém, a complexidade trazida pela utilização de um protocolo torna sua utilização muito mais interessante. A complexidade não inviabiliza o seu uso, mas cria-se a necessidade de padronização. No início da utilização das redes de sensores cada fabricante idealizou seu próprio protocolo de comunicação, mas isso inviabilizava a utilização de sensores de vários fabricantes e tornava a gerência desses elementos sensores muito mais complexa. Essas interfaces não seguiram a diante, sendo substituídas por padrões definidos pelo IEEE, criando um mercado de massa e barateando os sensores. De fato esta é a condição básica para viabilizar a rede de sensor.

2.2 Características dos elementos da rede de sensor sem fio

Os elementos que compõem a rede de sensor sem fio possuem algumas características gerais que são:

- Tempo de vida prolongado, sendo possível através da limitação de consumo de energia, determinando maior tempo de duração da fonte de energia para elementos alimentados por baterias;
- Tolerância à falha, sendo capaz de estabelecer vários caminhos possíveis para que a transmissão seja feita com sucesso;
- Protocolo de comunicação de baixa complexidade, pelo fato dos equipamentos normalmente terem baixa capacidade de processamento e baixa quantidade de memória;
- Tamanho reduzido;
- Baixo alcance de transmissão;

- Baixa taxa de transmissão;
- Facilidade de escalonamento, uma vez que os equipamentos que formam esse tipo de rede têm baixa complexidade e a rede pode ser formada por milhares de sensores;
- Alta densidade de elementos;
- Facilmente reprogramados, sendo que os elementos podem ser ajustados através de reprogramação para efetuar diferentes tarefas ao longo do seu tempo de vida;
- Facilidade de manutenção, sendo muitas vezes papel de um elemento central verificar se a rede está funcionando de acordo com o planejado e reorganizando formas de acesso e funcionalidade dos elementos;

2.3 Estrutura da rede de sensores sem fio

Uma rede de sensores sem fio é composta basicamente por quatro componentes, como mostrado no exemplo da Figura 4:

- o sensor;
- a interconexão de rede, no caso sem fio;
- um elemento central coordenando os sensores;
- um equipamento capaz de coletar os dados e processá-los.

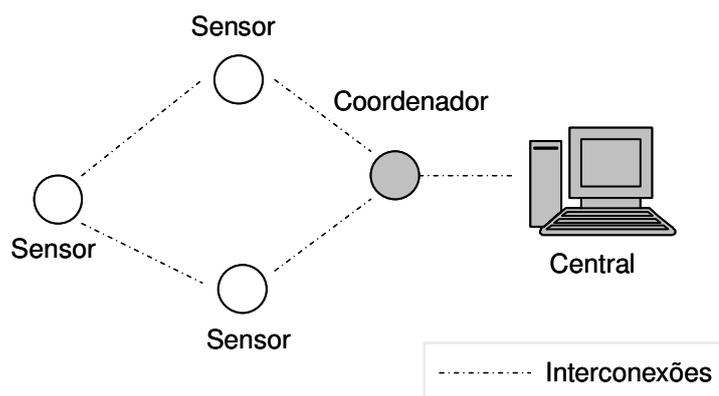


Figura 4. Exemplo da estrutura das redes de sensores sem fio.

Esse tipo de rede normalmente apresenta grandes quantidades de elementos sensores, o que torna o processo de comunicação e gerenciamento mais complexos.

As redes de sensores sem fio muitas vezes são classificadas como tipo de rede *ad hoc*, mas isso nem sempre é verdade. Uma rede *ad hoc* é definida como sendo uma rede de dados na qual os elementos se comunicam diretamente entre si utilizando seus transceptores, sem a necessidade de uma infra-estrutura fixa (SANTI, 2005). Neste tipo de rede, os elementos não possuem hierarquia entre eles.

Já em alguns dos padrões de rede de sensores sem fio, como é o caso da rede IEEE 802.15.4, é definido o papel de um elemento central responsável por estabelecer os endereços e sincronizar a rede. Desta maneira, não podemos generalizar a classificação *ad hoc* para todos os tipos de redes de sensores sem fio.

2.4 Comparação com outras redes sem fio

Como mostrado na Figura 5, as redes sem fio podem ser classificadas de acordo com a sua abrangência de cobertura, podendo ser utilizadas em: grandes áreas, como no caso das *Wireless Wide Area Networks (WWAN)*; áreas metropolitanas, como no caso das *Wireless Metropolitan Area Networks (WMAN)*; menores áreas,

como no caso das *Wireless Local Area Networks* (WLAN); ou até mesmo em pequenas áreas, como no caso das *Wireless Personal Area Networks* (WPAN). Se for observada a área de cobertura das redes de sensores sem fio, ela é classificada como uma rede do tipo PAN, mas por apresentar características específicas e muitas vezes não estar associada a pessoas e sim a processos, a rede de sensores sem fio recebe muitas vezes uma denominação própria como sendo *Wireless Sensor Networks* (WSN).

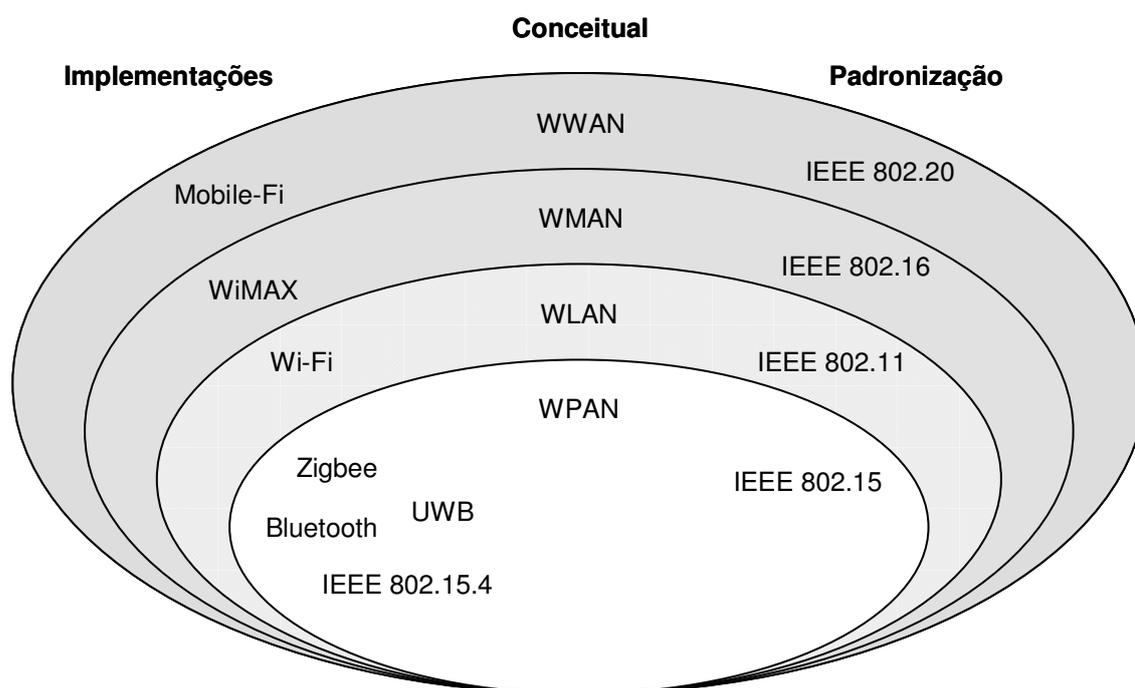


Figura 5. Categorias das redes sem fio.

Como já mencionado, a padronização para as redes de sensores sem fio foi necessária para garantir a interoperabilidade e/ou atingir mercado de massa. Essa padronização surgiu por meio do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), que já possuía vários grupos de trabalho. Esses grupos de trabalho, que compõem o chamado IEEE 802, se propõem a discutir e padronizar redes. Cada grupo criado procura um consenso para a padronização dentro das características de cada rede. Para as redes WWAN, o Grupo 20 discute sobre uma proposta de *Mobile-Fi*. No Grupo 16 discute-se sobre as redes WMAN. No Grupo 11 são

discutidas as redes WLAN. E no Grupo 15 são discutidas as redes WPAN, ou WSN, dependendo da aplicação.

No caso dos padrões IEEE 802.15, existem mais que uma implementação, já que dentro do Grupo 15 existem quatro grandes grupos de trabalho determinados pelo tipo de aplicação que eles se propõem a padronizar:

- IEEE 802.15.1, que visa estudar as redes pessoais sem fio. A implementação desse padrão é o *Bluetooth* já existente na telefonia para conexão de voz;
- IEEE 802.15.2, que visa estudar um guia de recomendações para facilitar a coexistência de redes WPAN com redes WLAN, desenvolvendo um modelo para quantificar a interferência entre estas redes;
- IEEE 802.15.3, que visa estudar as redes pessoais sem fio de alta performance. A implementação desse padrão utiliza o UWB (*ultra-wide band*).
- IEEE 802.15.4, que visa estudar as redes de sensores sem fio. A implementação desse padrão deu origem à pilha Zigbee. Esse padrão recebe a classificação de WSN, pois não está atrelada necessariamente a uma área pessoal de cobertura, estando mais relacionada com processos e não pessoas. Em 2004 foi criando um outro grupo de trabalho, o IEEE 802.15.4a para estudar a utilização do UWB como camada física para o padrão IEEE 802.15.4.

Além da classificação utilizando como base a área de cobertura, as redes sem fio podem ser classificadas de acordo com a taxa de transmissão alcançada na camada física, como mostrado na Figura 6.

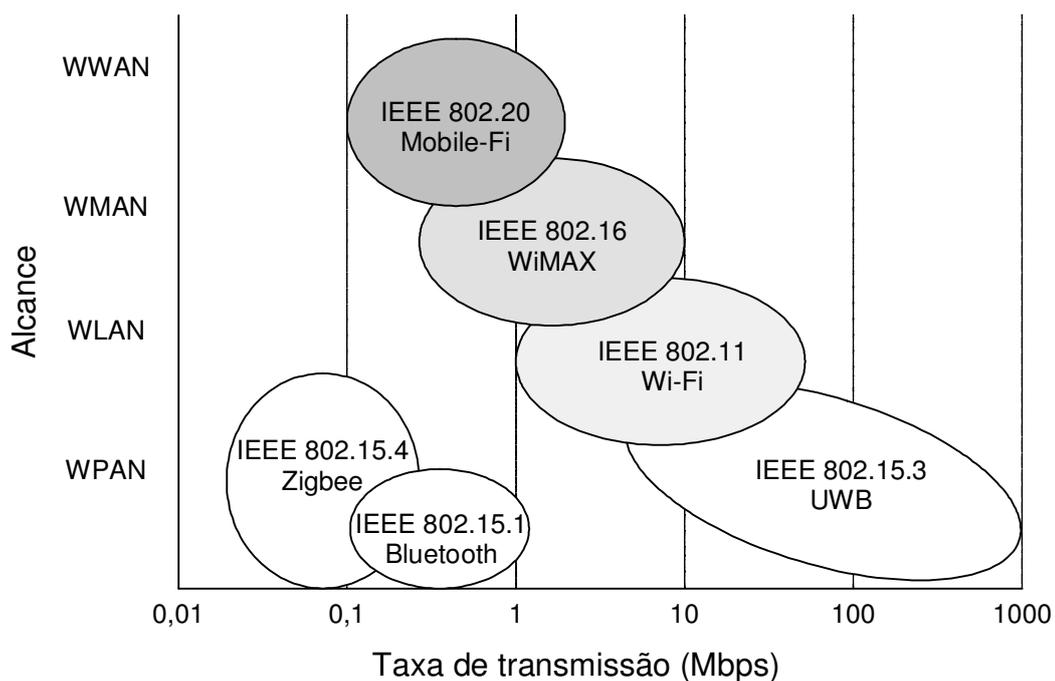


Figura 6. Classificação das redes sem fio de acordo com a taxa de transmissão.

Como pode ser observado na figura existem diferentes soluções para diferentes condições. Cada condição necessita de determinadas características de taxa de transmissão e alcance, o que faz com que um novo grupo de trabalho seja formado para discutir sobre a padronização destas várias redes.

3 REDE IEEE 802.15.4

Nesse capítulo é detalhado o padrão IEEE 802.15.4, foco do trabalho e base para a plataforma de simulação. São apresentadas suas características pertinentes ao trabalho. Além disso, é analisado o desempenho desse tipo de rede com elementos fixos, sem considerar a mobilidade, que será tratada no próximo capítulo.

3.1 Padrão IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 (IEEE 2006) surgiu em Dezembro de 2000, sendo chamado como IEEE 802.15.4 LR-WPAN (*Low-Rate Wireless Personal Area Networks*). Esse padrão tem como objetivo estabelecer uma rede com características de baixa complexidade, baixo custo e baixo consumo de energia (ADAMS, 2005). O escopo do padrão é definir a camada física (*Physical* - PHY) e a subcamada de controle de acesso ao meio (*Media Access Control* - MAC), como tradicionalmente faz os grupos de trabalho IEEE 802 nos padrões de solução de rede.

O padrão teve a sua primeira versão concluída em 2003. Em 2006 o padrão passou por uma revisão e teve a sua segunda versão, que foi utilizada em todos os estudos apresentados nesse trabalho. Vários fabricantes aderiram ao padrão, que o tornou referência para as redes de sensores sem fio. Atualmente é possível adquirir componentes que são capazes de estabelecer uma rede padrão IEEE 802.15.4, montando toda a pilha de protocolo necessária em um único *chip* (TEXAS, 2008).

Para facilitar a implementação e garantir uma maior interoperabilidade de fabricantes, foi formada uma aliança de empresas chamada Zigbee (ZIGBEE, 2004) que estabeleceu um padrão com o mesmo nome que defini o protocolo da camada de aplicação acima do padrão de rede IEEE 802.15.4. Pelo padrão IEEE 802.15.4 não estabelecer um protocolo de aplicações, coube a aliança Zigbee definir a implementação de aplicações para redes de sensores. Por se tratar somente do protocolo da camada de aplicação, o Zigbee não foi objeto de estudo para esse

trabalho, restringindo-se somente camada PHY e sub-camada MAC. Para os fabricantes, é comum que eles disponibilizem junto com os componentes uma implementação da pilha de protocolo que permita a implementação de serviços utilizando o padrão de rede IEEE 802.15.4 (FREESCALE, 2008).

Como mostrado na Figura 7, o padrão de rede IEEE 802.15.4 fornece a base necessária para que as aplicações possam ser desenvolvidas sobre ela, preocupando-se somente com o meio físico e com o controle de acesso ao meio.

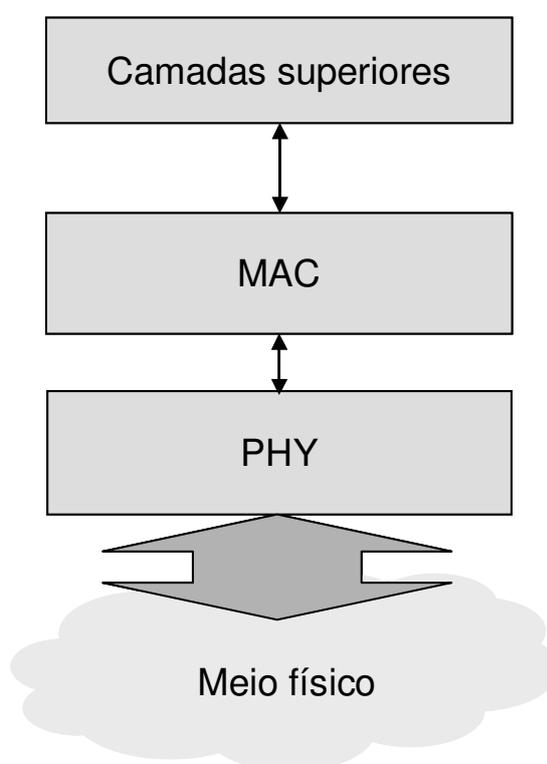


Figura 7. Pilha de protocolos definido no padrão IEEE 802.15.4.

3.2 Camada Física

São definidas três bandas de frequência não licenciadas para operação das redes IEEE 802.15.4:

- 868 – 868,6 MHz (Europa)

- 902 – 928 MHz (América do Norte e Brasil)
- 2400 – 2483,5 MHz (Mundialmente)

No Brasil são permitidas as faixas de 2400 MHz e a faixa de 900 MHz é dividida em dois intervalos, de 902 – 907 MHz e 915 – 928 MHz devido à utilização da faixa de 907 – 915 MHz para o Serviço Móvel Pessoal (SMP).

Nessas bandas de frequências o padrão definiu quatro tipos de camada física:

- Uma camada PHY utilizando as bandas de 868/915 MHz com *direct sequence spread spectrum* (DSSS) utilizando modulação *binary phase-shift keying* (BPSK);
- Uma camada PHY utilizando as bandas de 868/915 MHz DSSS utilizando modulação *offset quadrature phase-shift keying* (O-QPSK);
- Uma camada PHY utilizando as bandas de 868/915 MHz com *parallel sequence spread spectrum* (PSSS) utilizando modulação BPSK e *amplitude shift keying* (ASK);
- Uma camada PHY utilizando a banda de 2450 MHz DSSS utilizando modulação O-QPSK;

Esta última banda de frequência foi utilizada no trabalho por apresentar maior utilização, visto que esta faixa pode ser utilizada no mundo todo.

A camada PHY provê dois serviços: serviço de dados e serviço de gerenciamento. O serviço de dados da PHY possibilita o envio e recebimento de dados contidos em PHY *protocol data units* (PPDU) através do canal de comunicação. O serviço de gerenciamento da PHY possibilita o controle do funcionamento do transceptor, do nível de potência utilizado e recebido, seleção do canal a ser utilizado e verificação

de disponibilidade do canal, conhecido como *clear channel assessment* (CCA) que será analisado nos próximos capítulos.

Na banda de frequência utilizada no trabalho foi empregada a técnica de modulação de 16 níveis ortogonais na PHY. A cada período de símbolo, quatro bits de informação são utilizados para selecionar uma das 16 *orthogonal pseudo-random noise* (PN) para ser transmitida. As seqüências de PN para cada período de símbolo são concatenadas e moduladas usando a técnica de modulação O-QPSK. O processo de modulação e espalhamento espectral pode ser ilustrado como mostra a Figura 8.

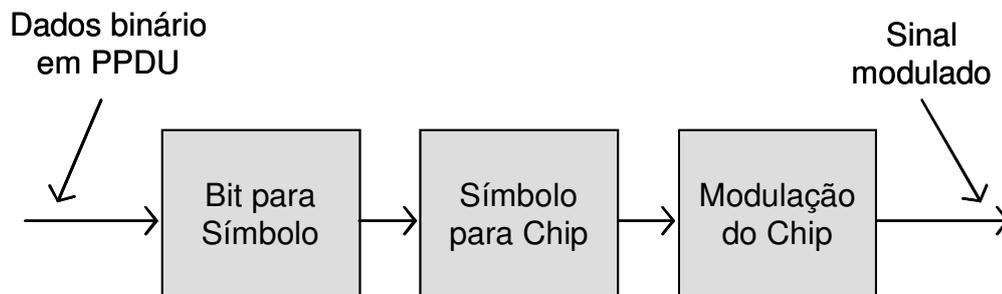


Figura 8. Modulação e espalhamento espectral.

Para essa banda de frequência são utilizadas as PNs mostradas no Quadro 1.

Quadro 1. Mapeamento de símbolo para chip.

Data symbol (decimal)	Data symbol (binary) ($b_0 b_1 b_2 b_3$)	Chip values ($c_0 c_1 \dots c_{30} c_{31}$)
0	0000	11011001110000110101001000101110
1	1000	11101101100111000011010100100010
2	0100	00101110110110011100001101010010
3	1100	00100010111011011001110000110101
4	0010	01010010001011101101100111000011
5	1010	00110101001000101110110110011100
6	0110	11000011010100100010111011011001
7	1110	10011100001101010010001011101101
8	0001	10001100100101100000011101111011
9	1001	10111000110010010110000001110111
10	0101	01111011100011001001011000000111
11	1101	01110111101110001100100101100000
12	0011	00000111011110111000110010010110
13	1011	01100000011101111011100011001001
14	0111	10010110000001110111101110001100
15	1111	11001001011000000111011110111000

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

No Quadro 2 são apresentadas as bandas de frequência e as taxas de transmissão.

Quadro 2. Bandas de frequência e taxa de transmissão.

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spreading parameters		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbol rate (ksymbol/s)	Symbols
868/915	868–868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902–928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868–868.6	400	ASK	250	12.5	20-bit PSSS
	902–928	1600	ASK	250	50	5-bit PSSS
868/915 (optional)	868–868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary Orthogonal
	902–928	1000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal
2450	2400–2483.5	2000	O-QPSK	250	62.5	16-ary Orthogonal

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

A potência de transmissão permitida dependerá da legislação em vigor onde os equipamentos serão utilizados. O padrão define que a camada PHY deve fornecer informações da potência recebida de cada pacote às camadas superiores. No Brasil a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) estabelece que para comunicações utilizando técnica de espalhamento espectral operando na frequência de 2400 MHz o máximo de potência permitida é de 1 Watt, após considerar o ganho da antena.

3.3 Subcamada MAC

A subcamada MAC é responsável por prover dois tipos de serviço para a rede:

- Serviço de transmissão de dados
- Serviço de gerenciamento de elementos

No serviço de transmissão de dados a MAC trata do envio e recebimento dos pacotes de dados, garantindo que caso o pacote não consiga ser enviado ele possa ser reenviado em um momento subsequente.

No serviço de gerenciamento de elementos a MAC controla o acesso ao meio, fornecendo um acesso controlado e temporizado para que as transmissões evitem colidir com outras transmissões.

A MAC é definida para poder trabalhar de duas maneiras em relação à sincronização dos elementos: modo *slotted* e modo *un-slotted*.

No modo *slotted*, define-se um tempo chamado *superframe* que serve de referência para o sincronismo da rede. Ao final de cada tempo de *superframe* é enviado um pacote de *beacon*. Esse *beacon* é um conjunto de informações de sincronismo que é enviado com o intuito de manter todos os elementos informados sobre os parâmetros de sincronismo. Dentro do período de um *superframe*, tem-se a divisão

em pequenos intervalos de tempo, definindo a unidade de tempo para que cada elemento possa se comunicar.

No modo *un-slotted*, os elementos não recebem a informação de sincronismo e não existe uma divisão por tempo para cada elemento. Todos os elementos podem acessar o meio de forma assíncrona. Na Figura 9 pode ser visto um exemplo das temporizações durante as transmissões, mostrando assim a diferença entre os modos *slotted* e *un-slotted*.

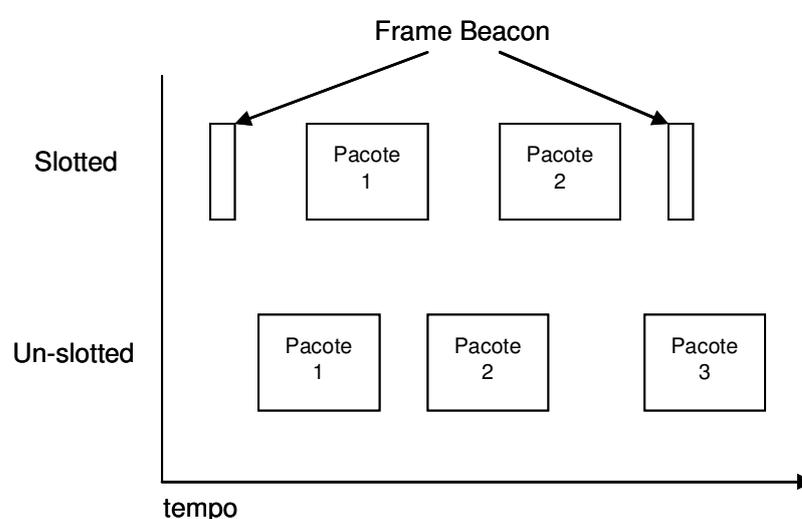


Figura 9. Exemplo das temporizações nas transmissões em modo *slotted* e *un-slotted*.

Nesse trabalho optou-se por estudar somente o modo *un-slotted*, visto que esse modo apresenta maiores taxas de transmissão e pode ser utilizado em uma variedade maior de aplicações. As características do modo *un-slotted* tornam a rede mais susceptível a colisões e maior disputa pela utilização do meio (LATRÉ; DE MIL; MOERMAN; DHOEDT; DEMEESTER; DIERDONCK, 2006).

Tanto no modo *slotted* quanto no modo *un-slotted* é função da MAC determinar como o elemento deverá acessar o meio de comunicação evitando colisões. Esse controle no envio dos dados é feito através da técnica de acesso randômica denominada *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA). Esta técnica foi inicialmente utilizada pelo padrão IEEE 802.11, mas possui um

fluxograma maior e mais complexo se comparado ao padrão IEEE 802.15.4. No padrão IEEE 802.15.4 a técnica CSMA/CA foi adaptada de uma maneira mais simples para que pudesse ser implementada em equipamentos menores e com capacidade de processamento reduzido. No modo *slotted* o CSMA/CA só é utilizado durante o período em que os elementos estão autorizados a disputar o meio sem reserva de *slot* para cada elemento. No modo *un-slotted* o CSMA/CA é utilizado em todas as transmissões.

No padrão Ethernet é utilizado uma outra variação chamada *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detect* (CSMA/CD), onde é possível detectar colisão, diferente do CSMA/CA onde a técnica cria mecanismos para tentar evitar a colisão.

A implementação do CSMA/CA foi feita utilizando um contador de tempo antes das transmissões, fazendo com que cada elemento tenha um tempo inicial de transmissão diferente. Ao terminar esse tempo aleatório o elemento verifica se o meio está livre utilizando a técnica de *clear channel assessment* (CCA) e, caso não haja nenhuma transmissão sendo feita por outro elemento, o elemento pode iniciar sua transmissão. O intervalo de tempo considerado para a realização do CCA é de oito símbolos. A Figura 10 mostra um exemplo da técnica CSMA/CA definida no padrão IEEE 802.15.4, onde o elemento A e B, após esperarem por um tempo aleatório, realizam o CCA e encontram o meio disponível. No caso do elemento C, após esperar o tempo aleatório, o CCA determina que o meio não está disponível e outro tempo aleatório é escolhido até uma próxima tentativa.

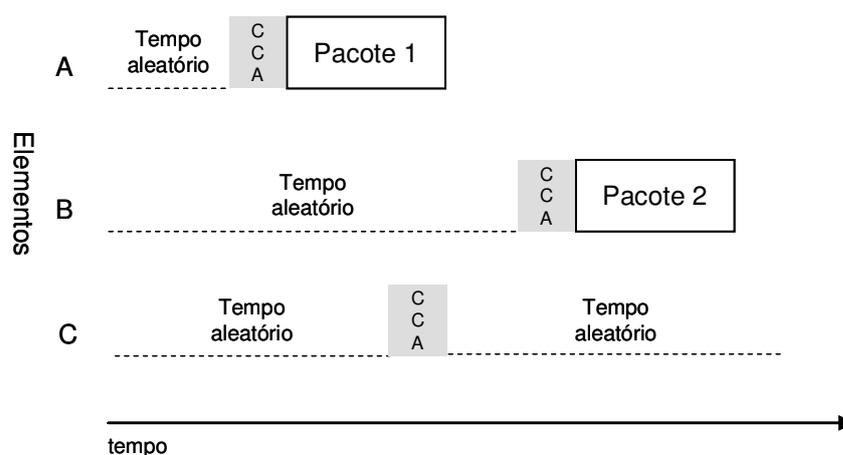


Figura 10. Exemplo do uso da técnica de CSMA/CA.

Caso o elemento encontre o meio indisponível o processo é reiniciado. A cada interação, o parâmetro *backoff exponential* (BE) é aumentado em uma unidade, assim como o contador de tentativa (*number of backoffs*-NB). Em todos os reinícios do processo de CSMA/CA é determinado um valor aleatório de zero até $(2^{BE} - 1)$. Esse valor é multiplicado pelo parâmetro *aUnitBackoffPeriod*, determinando a quantidade de símbolos que aquele elemento deverá aguardar até tentar novamente uma transmissão. O intervalo de tempo de um símbolo para a banda de frequência utilizada, assim como o valor de *aUnitBackoffPeriod* está definido no Quadro 3.

Quadro 3. Valores para as constantes utilizadas na MAC.

Constante	Descrição	Valor
símbolo	Tempo de transmissão referente a 4 bits no caso da modulação O-QPSK	16 ms
aUnitBackoffPeriod	Número de símbolos referente a unidade de <i>backoff</i>	20 símbolos
aMaxSIFSFrameSize	Número máximo de bytes de um pacote <i>short</i>	18 bytes
macMaxBE	Número máximo para o BE	5
macMaxCSMABackoffs	Número máximo de tentativas do CSMA/CA	4
macMinBE	Número mínimo para o BE	3

O valor de BE vai de $macMinBE$ até o valor de $macMaxBE$, sendo sugerido no padrão os valores de três e cinco, respectivamente. O processo é reiniciado até conseguir transmitir ou até que o NB seja igual ao valor estabelecido no parâmetro $macMaxCSMABackoffs$, que no padrão tem o valor sugerido de 5. Todo esse processo descrito está apresentado no fluxograma da Figura 11 e serviu de base para o desenvolvimento do simulador.

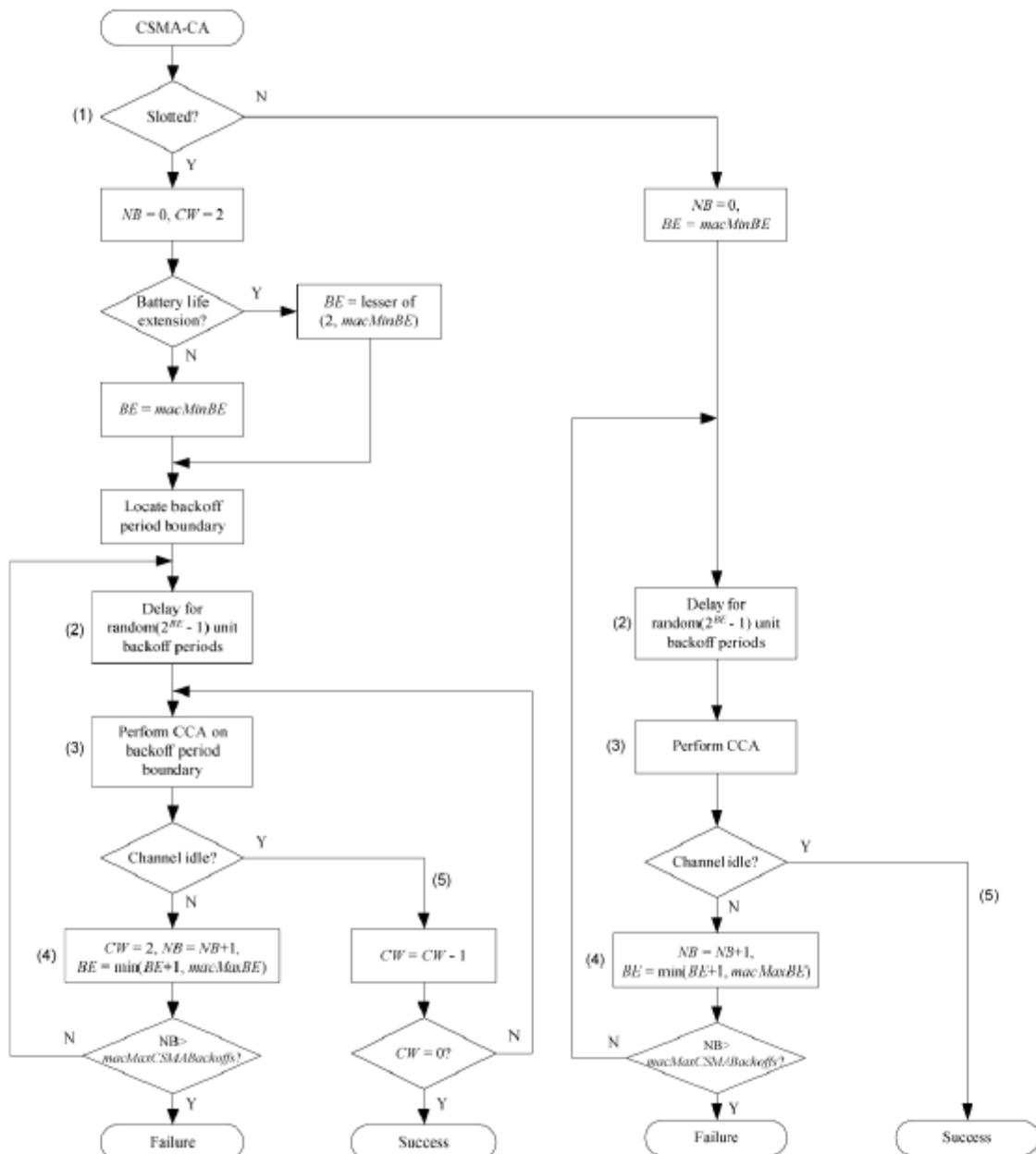


Figura 11. Fluxograma da técnica CSMA/CA.

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

Após o envio dos dados, o elemento deve aguardar por um intervalo de tempo chamado de *interframe spacing* (IFS). A MAC necessita de um intervalo de tempo para processar os dados recebidos da PHY. O intervalo IFS tem dois valores definidos no padrão:

- caso a quantidade de dados enviada seja menor que o valor do parâmetro *aMaxSIFSFrameSize* então o intervalo IFS será um *short interframe spacing* (SIFS) e terá seu valor igual ao parâmetro *macMinSIFSPeriod*.
- caso a quantidade de dados enviada seja maior que o valor do parâmetro *aMaxSIFSFrameSize* então o intervalo IFS será um *long interframe spacing* (LIFS) e terá seu valor igual ao parâmetro *macMinLIFSPeriod*.

Os valores sugeridos para os intervalos de SIFS e LIFS dependeram da banda de frequência utilizada e estão apresentados no Quadro 4 a seguir.

Quadro 4. Valores sugeridos para SIFS e LIFS.

PHY	<i>macMinLIFSPeriod</i>	<i>macMinSIFSPeriod</i>	Units
868–868.6 MHz BPSK	40	12	Symbols
902–928 MHz BPSK	40	12	Symbols
868–868.6 MHz ASK	40	12	Symbols
902–928 MHz ASK	40	12	Symbols
868–868.6 MHz O-QPSK	40	12	Symbols
902–928 MHz O-QPSK	40	12	Symbols
2400–2483.5 MHz O-QPSK	40	12	Symbols

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

O padrão utiliza outras técnicas na MAC para melhorar o desempenho da rede. Além do CSMA/CA, o padrão define a utilização de confirmação de recebimento (*acknowledgment* - ACK), possibilitando assim o reenvio dos dados quando o elemento que está enviando os dados não receber a confirmação de recebimento. Outra técnica é a utilização de verificação da integridade dos dados no recebimento dos mesmos. Utilizando um mecanismo de *frame check sequence* (FCS), os dados recebidos são verificados utilizando a informação de *cyclic redundancy check* (CRC)

contida em cada pacote enviado. A utilização de ACK e mecanismo de CRC não foram utilizados nesse trabalho, uma vez que a confirmação de recebimento e a integridade dos dados recebidos podem ser verificadas utilizando as informações geradas durante as simulações.

3.4 Estrutura dos elementos

Os elementos que compõem as redes IEEE 802.15.4 podem ser classificados como *Full-Function Device* (FFD) ou *Reduced-Function Device* (RFD). Nos elementos FFD todas as funções estão implementadas e não existe preocupação com consumo excessivo de energia, pois é previsto alimentação. Já nos elementos RFD, somente as funções básicas estão implementadas, já que há uma preocupação em manter o consumo de energia baixo, uma vez que é prevista a utilização de baterias para alimentação dos elementos.

Os elementos estão estruturados logicamente em dois tipos de elementos: os coordenadores e os elementos comuns. Os coordenadores são os elementos responsáveis por estabelecer a rede e determinar os endereços lógicos dos elementos. Por necessitar de uma implementação mais complexa, os coordenadores só podem ser FFD. Já os elementos comuns têm a capacidade de comunicar com o coordenador para informar sobre os valores pertinentes ao sensor que ele é responsável, podendo ser FFD ou RFD. Elementos FFD podem comunicar-se com outros elementos FFD ou RFD. Mas no caso dos elementos RFD, que podem ser, por exemplo, sensores de luz em um ambiente controlado, só podem se comunicar com um FFD.

Neste trabalho foram utilizados um coordenador e elementos comuns RFD, sendo analisada a transmissão de pacotes dos elementos RFD para o coordenador.

3.5 Topologia dos elementos

No padrão IEEE 802.15.4 são definidos dois tipos de topologias de rede. A primeira delas é a ponto multiponto, onde há um elemento central sendo o coordenador e

vários elementos comuns comunicando somente com o coordenador. Um exemplo de uma topologia ponto multiponto seria um ambiente de uma sala com alguns sensores de temperatura e um coordenador posicionado no meio dessa sala. Se a temperatura aumentar, os elementos comuns devem comunicar ao coordenador e esse deve decidir se vai ou não atuar junto ao ar condicionado para manter a temperatura determinada.

A segunda topologia é ponto a ponto (*peer-to-peer*), onde existe ainda um elemento central como sendo o coordenador, mas os vários elementos comuns que formam a rede podem, além de comunicar com o coordenador, comunicar com outros sensores comuns. Nessa topologia, os elementos comuns vão atuar também como roteadores. Esse papel de roteador é realizado pelos elementos comuns FFD, roteando pacotes de outros elementos RFD até o coordenador.

Existe ainda uma terceira topologia possível, mas que o padrão não estabelece. Essa topologia talvez seja a mais interessante, pois é uma junção da topologia ponto multiponto com a topologia ponto a ponto. Muitos autores chamam essa topologia de *mesh* ou *cluster tree*. Com esta topologia é possível acrescentar elementos comuns RFD que se comunicam com elementos comuns FFD até chegar ao coordenado, prolongando o alcance da rede. A Figura 12 mostra as duas topologias definidas pelo padrão, mais a terceira topologia resultante da junção das duas primeiras.

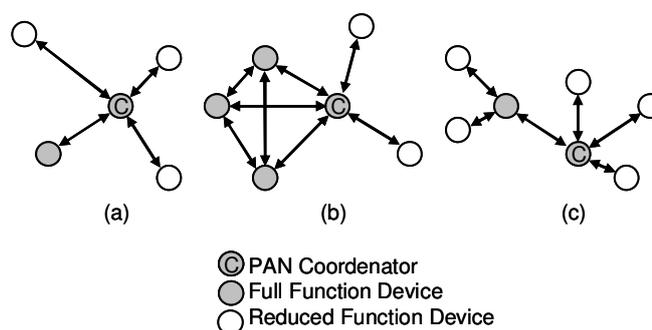


Figura 12. Topologias possíveis para redes IEEE 802.15.4. a) ponto multiponto b) ponto a ponto e c) *mesh* ou *cluster-tree*.

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

Nesse trabalho foi utilizada somente a topologia ponto multiponto, não sendo estudado o roteamento de pacotes que pode ser realizado por elementos FFD.

3.6 Tipos de comunicação

O padrão IEEE 802.15.4 define dois tipos de comunicação entre os elementos: direta e indireta. No tipo de comunicação direta, o elemento comum inicia o processo de comunicação com o coordenador logo após receber os bits a serem enviados, como mostrado na Figura 13 (a). Já no tipo de comunicação indireta, a comunicação entre o coordenador e o elemento comum só é iniciada quando o elemento comum requisita ao coordenador os pacotes que estejam aguardando por ele, como mostrado na Figura 13 (b). Dessa maneira, o coordenado só poderá efetivar o envio dos dados quando o elemento final enviar uma requisição de *data request*. Esse tipo de comunicação indireta é necessário, pois existe a preocupação em diminuir o consumo de energia nos equipamentos comuns, principalmente aqueles que são RFD. Para diminuir o consumo de energia, os elementos podem entrar em modo *sleep*. Enquanto o elemento estiver neste modo, o coordenador não conseguirá se comunicar com este elemento. Assim que ele sair do modo *sleep*, o elemento irá solicitar os dados que estão armazenados no coordenador para ele.

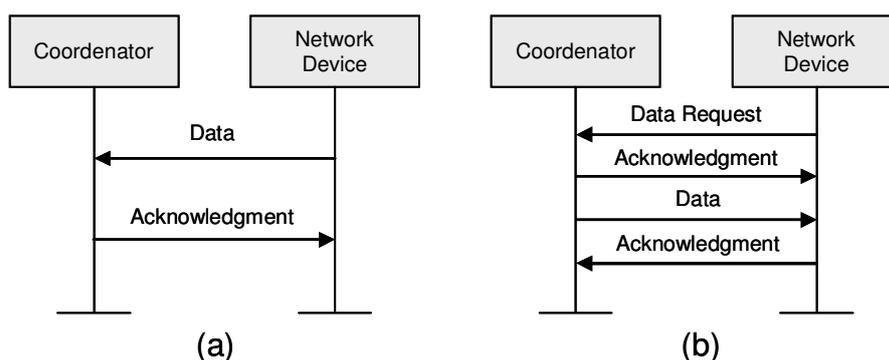


Figura 13. Tipos de comunicação entre os elementos da rede IEEE 802.15.4. a) comunicação direta
b) comunicação indireta.

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

3.7 Estrutura dos dados

A estrutura dos pacotes definido no padrão IEEE 802.15.4 é mostrada na Figura 14. Nesta figura é possível verificar que a estrutura é bem simples e com tamanho reduzido se comparado com outros padrões de redes sem fio (YOON; SHIN; KNOW, 2006). Isso se deve a rede IEEE 802.15.4 ser voltada para elementos sensores que geralmente não necessitam enviar grandes quantidades de dados em um mesmo pacote. Caso os campos de endereços de origem e destino sejam utilizados, eles podem variar de 4 até 20 bytes, uma vez que a rede pode utilizar endereços curtos de 2 bytes até endereços longos de 8 bytes.

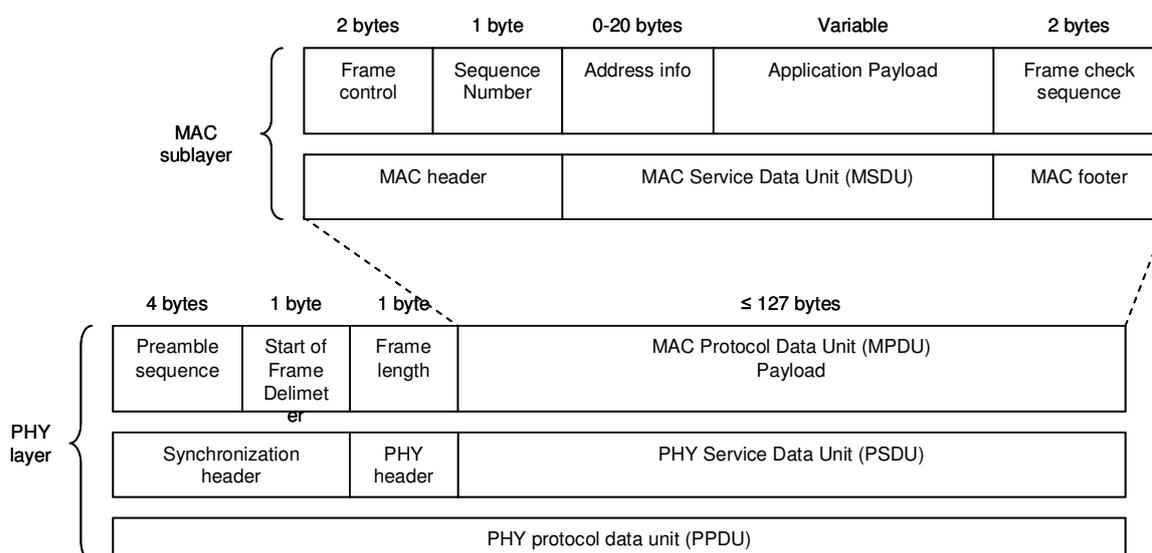


Figura 14. Estrutura dos pacotes para o padrão IEEE 802.15.4.

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

3.8 Desempenho das redes IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 apresenta taxa de transmissão menor que outras redes sem fio, principalmente redes de computadores. Porém, por se tratar de uma rede de sensores, a taxa de transmissão é suficiente para atender às necessidades específicas da rede de sensor. Em relação a desempenho, o padrão IEEE 802.15.4

apresenta uma taxa de erro de bit (*bit error rate* - BER) melhor se comparado a outros padrões de redes sem fio (MYOUNG; SHIN; PARK; KWON, 2007). Esta diferença entre o desempenho das redes pode ser analisado melhor analisado na Figura 15 (IEEE, 2006), onde é possível notar que o padrão IEEE 802.15.4 apresenta melhor desempenho.

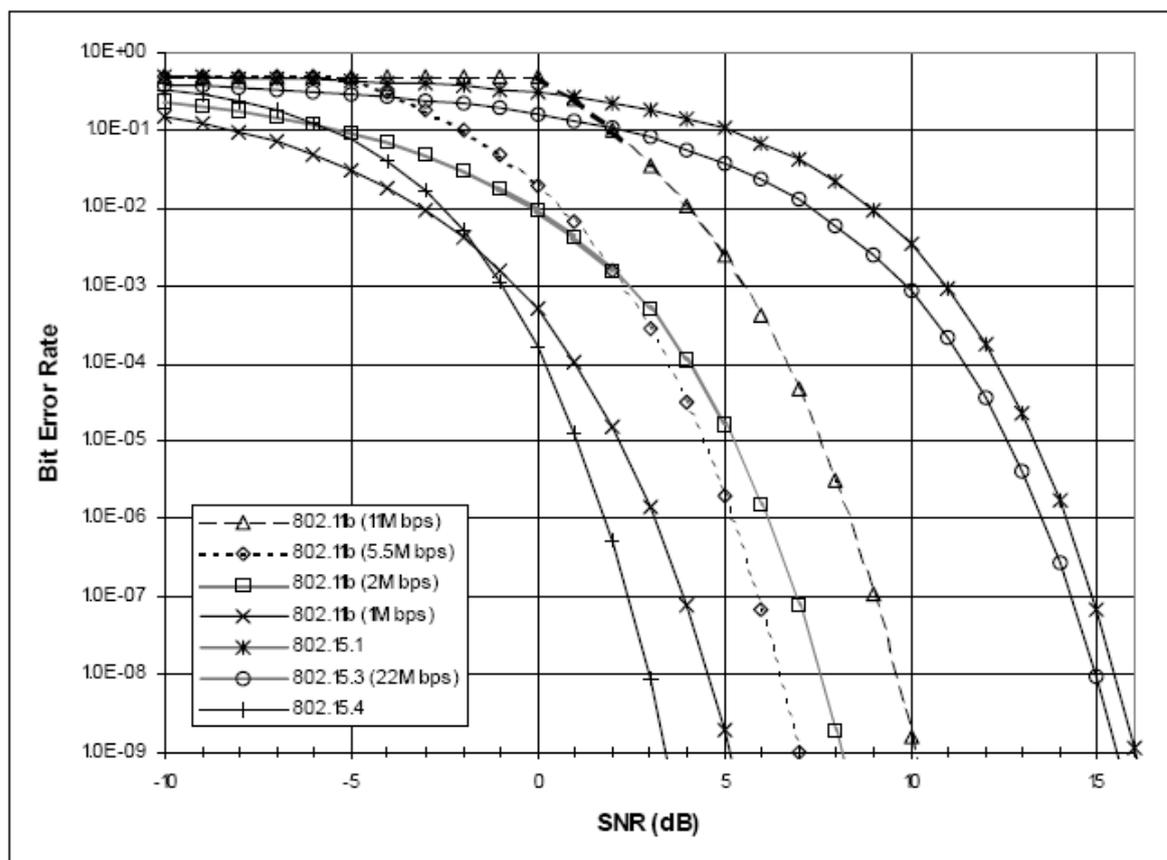


Figura 15. Resultados de BER para os padrões IEEE 802.15.4, IEEE 802.11b, IEEE 802.15.1 e IEEE 802.15.3.

Fonte: ANSI/IEEE Std 802.15.4, (2006)

Para estabelecer um comparativo entre os padrões, pode-se considerar, por exemplo, uma relação sinal ruído (*signal-to-noise ratio* – SNR) de 3 dB. Para um elemento utilizando o padrão IEEE 802.15.4 em 2400 MHz com a modulação O-QPSK tem-se uma BER de 10^{-8} , isto é, um *bit* errado a cada 10^8 *bits* enviado, taxa considerada excelente para uma transmissão sem fio. Analisada uma transmissão

utilizando o padrão IEEE 802.11b em 11 Mbps com a mesma SNR de 3 dB, observa-se que a BER é próxima de 10^{-1} , isto é, um bit errado a cada 10 bits enviados, taxa considerada muito ruim para uma transmissão sem fio.

Para a análise e comparação do BER entre os padrões de redes sem fio foi utilizado a dedução encontrada em (IEEE, 2006). Para esta análise é considerada a banda de frequência de 2400 MHz e modulação O-QPSK, considerando um fator de filtragem padrão α de 0,625. Considerando a taxa de chip (R_c) como sendo 2000 kchip/s e a taxa de *bit* (R_b) como sendo 250 kb/s, tem-se a conversão de E_b/N_0 por SNR mostrada na expressão (1).

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B_w}{R_b} SNR = \frac{\alpha R_c}{R_b} SNR = \frac{0,625 R_c}{R_b} SNR = \frac{0,625 \times 2000000}{250000} SNR = 5 SNR \quad (1)$$

Convertendo a densidade de ruído de *bit* E_b/N_0 para a densidade de ruído de símbolo E_s/N_0 chega-se na expressão (2).

$$\frac{E_s}{N_0} = \log_2(M) \frac{E_b}{N_0} = 4 \frac{E_b}{N_0} \quad (2)$$

A relação de erro de símbolo (*Symbol error rate* – SER) P_s é calculada utilizando a expressão de Sklar para modulações MFSK *noncoherent* como mostrado na expressão (3).

$$P_s = \frac{1}{M} \sum_{j=2}^M (-1)^j \binom{M}{j} \exp\left(\frac{E_s}{N_0} \left(\frac{1}{j} - 1\right)\right) \quad (3)$$

Para converter de SER P_s para BER P_b utiliza-se a expressão (4) a seguir.

$$P_b = P_s \left(\frac{M/2}{M-1}\right) = P_s \left(\frac{8}{15}\right) \quad (4)$$

Por último passo, utilizando-se das expressões (3) e (4) resulta na expressão (5) dada por:

$$P_b = \left(\frac{8}{15}\right) \left(\frac{1}{16}\right) \sum_{j=2}^{16} (-1)^j \binom{16}{j} \exp\left(20 \times SNR \left(\frac{1}{j} - 1\right)\right) \quad (5)$$

Essa análise de desempenho utilizando o BER como fator determinante foi feito utilizando um canal *additive white Gaussian noise* (AWGN). O modelo de canal AWGN foi utilizado como referência em comunicações sem fio, mas não contempla os efeitos causados pela mobilidade dos elementos. Essa análise só é válida para ambientes sem mobilidade, onde as questões de multipercurso, desvanecimento e outros efeitos não foram considerados.

4 EFEITOS DO AMBIENTE E MOBILIDADE

Nesse capítulo são analisados os efeitos causados pela mobilidade de elementos dentro de redes de comunicação sem fio, sejam pelas questões de perturbação do sinal devido ao desvanecimento ou pela mobilidade dos elementos. Tudo isso influencia na performance da rede, uma vez que altera a relação sinal-ruído ao longo das transmissões além de outros fenômenos. Esse estudo embasa a implementação da plataforma de simulação, dando suporte teórico na codificação das rotinas de transmissões dentro da plataforma. Neste capítulo são tratados somente os fenômenos relacionados com a variação da intensidade do sinal. Isto porque a velocidade é baixa e não é considerado o desvanecimento seletivo.

4.1 Perturbações do sinal

Ao contrário de redes cabeadas, onde as condições de conectividade são praticamente determinísticas, ou seja, estando conectado é garantido um certo desempenho, em redes sem fio não existe a mesma garantia, sendo uma rede tratada de forma estatística quanto ao seu desempenho, em função de considerar os efeitos de atenuação do sinal e multipercurso. Para explorar esta questão neste trabalho foi considerado o modelo de sombreamento para determinação do comportamento do sinal em função da distância. Neste item é feita uma revisão do comportamento da atenuação do sinal utilizando as formas clássicas de análise da atenuação do sinal. Outra questão tratada foi a incerteza do sinal uma vez que o tipo de ambiente leva a um certo grau de incerteza, que comumente é tratado na literatura como log-normal. Finalmente, existe a instabilidade do meio causada pela movimentação aleatória de pessoas e objetos, e do próprio elemento.

4.1.1 Modelo Log-Distance

O modelo de Log-Distance é largamente utilizado para caracterizar ambiente de propagação, principalmente indoor. Este modelo parte do princípio que a potência recebida a uma distância (d) pode ser calculada considerando um fator de atenuação e uma potência de referência recebida a uma distância d_0 , entre o transmissor e o receptor (RAPPAPORT, 1996). A distância d_0 deve ser pelo menos 10 vezes menor que a distância d (RAPPAPORT, 1996). Esta é uma consideração prática confirmada na realização de medidas. Assim, a potência a uma distância d pode ser determinada considerando a potência recebida a uma distância d_0 pela relação:

$$\frac{P_r(d_0)}{P_r(d)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^\gamma, \quad (6)$$

onde γ é o fator de atenuação que define o ambiente.

É mais comum calcular a relação (6) em dB,

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_0)} \right]_{dB} = -10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (7)$$

A potência $P_r(d_0)$ é a potência recebida na distância de referência d_0 , adotada como sendo de um metro para ambiente *indoor* (RAPPAPORT, 1996). Para ambiente *indoor* este valor varia de 1 a 100 metros, dependendo do raio da célula. Atualmente, como as células são menores que no passado, a tendência é a utilização de uma distância de referência de 1 m, o que está de acordo com uma rede WSN em ambientes *indoor*. A atenuação até este ponto é considerada como sendo do espaço livre, calculado pela expressão:

$$L_{d_0}(dB) = 10 * \log\left(\frac{4\pi * d_0}{\lambda} \right)^2 \quad (8)$$

Assim, a potência recebida a uma distância d será:

$$P_{RX}(d)_{dBm} = P_{RX}(d_0)_{dBm} - 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (9)$$

A potência $P_{RX}(d_0)$ em dBm é calculada por:

$$P_{RX}(d_0)_{dBm} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dB}} + G_{RX_{dB}} - L_{d_0}, \quad (10)$$

onde G_{TX} e G_{RX} são os ganhos em dB das antenas de transmissão e recepção respectivamente e $T_{TX_{dBm}}$ é a potência do transmissor.

Assim, a potência recebida na distância d em dBm será:

$$P_{RX}(d)_{dBm} = P_{TX_{dBm}} + G_{TX_{dB}} + G_{RX_{dB}} - 10 \log\left(\frac{4\pi * d_0}{\lambda}\right)^2 - 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (11)$$

A atenuação total sofrida pelo sinal será:

$$L = 10 \log\left(\frac{4\pi * d_0}{\lambda}\right)^2 + 10\gamma \log\left(\frac{d}{d_0}\right). \quad (12)$$

Utilizando d_0 como sendo igual a 1, a atenuação sofrida pelo sinal será:

$$L = 10 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right)^2 + 10\gamma \log(d). \quad (13)$$

Se for utilizado γ igual a 2, então,

$$L = 10 \log\left(\frac{4\pi * d}{\lambda}\right)^2. \quad (14)$$

Ou seja, para γ igual a 2 a atenuação sofrida pelo sinal será igual à atenuação de espaço livre.

Com as expressões apresentadas é possível determinar a distância máxima que um elemento pode estar, considerando a potência recebida ao longo das distâncias nos ambientes determinados.

O limite da distância de operação dos elementos de uma rede de sensores sem fio é estabelecido pela sensibilidade do receptor. Também é comum ser especificada uma potência de recepção limite para uma taxa de erro de bit (BER) mínima aceitável. Portanto, o valor máximo de d está diretamente relacionado com a mínima potência de recepção, que por sua vez está relacionado com o BER. O valor de d_i , distância do elemento para determinadas características da transmissão, é calculado considerando a expressão para o cálculo da potência recebida, sendo que neste caso é conhecida a sensibilidade limite e a única incógnita é a distância d_i . Manipulando a expressão (11) da potência recebida chegamos na expressão de d_i em função do γ :

$$d_i = d_o * 10^{\left(\frac{P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - P_{RX}(d_i) - 20 \log\left(\frac{4\pi d_o}{\lambda}\right)}{10\gamma} \right)}. \quad (15)$$

Considerando as grandezas na forma linear e não em dB, resulta

$$d_i = \left[\frac{P_{TX} G_{TX} G_{RX}}{P_{RX}(d_i)} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \cdot d_o^{(\gamma-2)} \right]^{\left(\frac{1}{\gamma}\right)}. \quad (16)$$

Com o cálculo de d_i pôde-se chegar à distância de operação da rede de sensores sem fio considerando a sensibilidade do elemento sensor utilizado. Este valor foi utilizado na expressão (16) para determinar em qual distância o elemento chegará na potência limite da sensibilidade do elemento sensor em função de um determinado ambiente representado por um valor de γ .

A análise é feita utilizando uma taxa BER mínima para operação da rede, que geralmente é considerada como sendo de 10^{-5} para redes sem fio. Portanto, a sensibilidade está diretamente relacionada com a relação sinal ruído, sendo encontrada através da razão entre a potência recebida e a potência de ruído. A potência de ruído é considerado como a soma do ruído térmico mais a figura de ruído do receptor. O ruído térmico N é calculado pela equação de Boltzmann, dada por:

$$N = kTB, \quad (17)$$

onde k é a constante de Boltzmann, T a temperatura em Kelvin e B a banda do receptor.

O Quadro 5 abaixo (NS, 2008) mostra exemplos de valores do fator de atenuação γ em função do tipo de ambiente.

Quadro 5. Fator de atenuação em função do ambiente.

Environment		γ
Outdoor	Free space	2
	Shadowed urban area	2.7 to 5
In building	Line-of-sight	1.6 to 1.8
	Obstructed	4 to 6

Fonte: NS Notes and Documentation.

Pelo exposto acima, o fator de atenuação define uma reta em escala logarítmica cuja inclinação depende do coeficiente γ , que afeta diretamente a taxa de transmissão da estação. A Figura 16 abaixo mostra um exemplo das inclinações para diferentes fatores de atenuação, sendo considerado a distância de referência como sendo igual a 1.

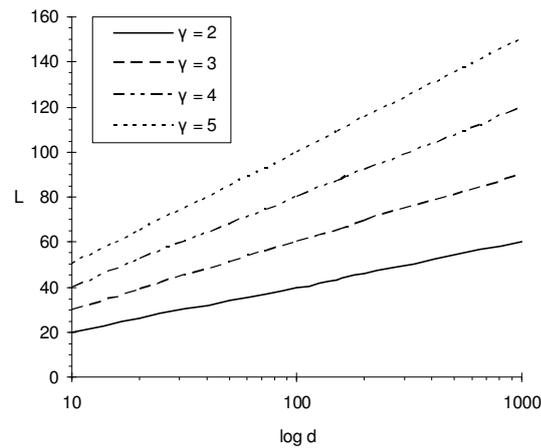


Figura 16. Atenuação (L) em função do coeficiente γ .

O coeficiente de atenuação γ em geral é estimado através de uma análise do ambiente onde a rede de sensores sem fio opera.

4.1.2 Modelo de Shadowing

No item anterior, os cálculos da atenuação do sinal em função do ambiente utilizaram informações determinísticas como potência, ganho de antena, fator de atenuação. Estes são parâmetros determinísticos e dependem essencialmente do tipo de ambiente. Entretanto, como mostrado em (RAPPAPORT, 1996) existe um grau de incerteza em relação ao ambiente. Para completar a caracterização do ambiente é necessário considerar a variação em função de cada ponto devido às condições do ambiente. Com isto chega-se na expressão do modelo de Shadowing, dada por:

$$\left[\frac{P_r(d)}{P_r(d_o)} \right]_{dB} = -10\gamma \log\left(\frac{d}{d_o}\right) + X_{dB}, \quad (18)$$

onde X_{dB} é uma variável aleatória normal (YACOUB, 1993) cujo desvio padrão depende do tipo de ambiente.

O valor da variável aleatória normal traz uma incerteza na rede uma vez que torna também incerta uma possível colisão entre as transmissões, uma vez que outras transmissões podem ser iniciadas a uma distância maior e não conseguir detectar essa transmissão. O Quadro 6 (NS, 2008) apresenta um exemplo de valores do desvio em função do ambiente.

Quadro 6. Desvio padrão da log-normal em função do ambiente

Environment	σ_{dB} (dB)
Outdoor	4 to 12
Office, hard partition	7
Office, soft partition	9.6
Factory, line-of-sight	3 to 6
Factory, obstructed	6.8

Fonte: NS Notes and Documentation.

A Figura 17 apresenta a log-normal com diferentes valores de desvio padrão σ . A medida do desvio padrão também é possível uma vez que a estação faça uma estatística e consiga inferir qual o grau de incerteza.

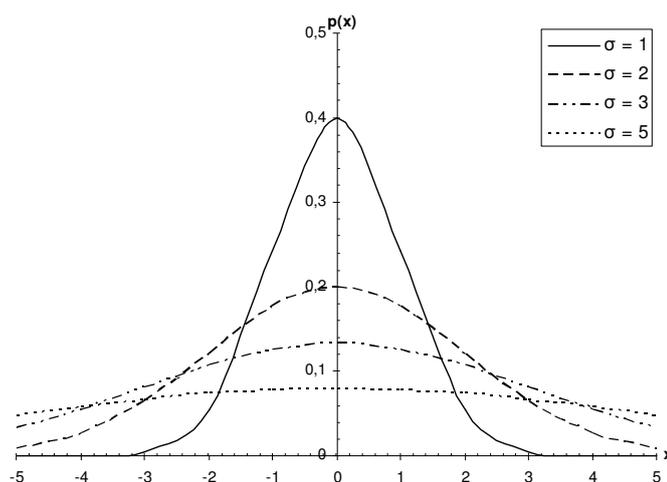


Figura 17. Diferentes valores de σ .

Fonte: Lathi

Em função do desvio padrão é possível calcular a probabilidade de a atenuação exceder este valor. Este é um parâmetro que poderá ser utilizado no futuro.

4.2 Instabilidade em função da mobilidade

A instabilidade da rede, verificada pela variação da potência do sinal ao longo do tempo, é provocada por alterações no ambiente. Em (LINO, 2008) foi caracterizado um ambiente indoor. Foi demonstrando que a variação da potência do sinal em ambiente *indoor* pode ser caracterizada através de uma distribuição de Weibull dada pela expressão (LAW; KELTON, 1991):

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, \quad (19)$$

onde x representa a potência de transmissão, α é o fator de forma e β o fator de escala.

Outros modelos são analisados para descrever a instabilidade da rede em ambientes indoor em (LINO, 2008), como o caso da distribuição de Rayleigh (YACOUB, 1993), mas esta distribuição é muito severa como será mostrado. Por esse motivo, a distribuição de Weibull foi utilizada nesse trabalho, descrevendo o efeito da mobilidade dos elementos.

Como o sinal recebido pode percorrer diferentes caminhos até ser detectado no receptor, o sinal resultante será a soma de todas as réplicas do sinal original recebido no receptor. Cada réplica percorre um caminho diferente, sofrendo assim diferentes atenuações.

A Figura 18 (LINO, 2008) mostra um exemplo de variação do sinal no receptor, resultado da soma das várias componentes que sofreram diferentes atenuações e atrasos em fases.

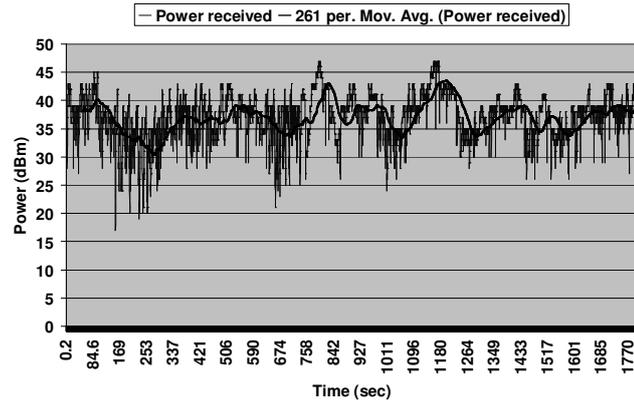


Figura 18. Variação da intensidade de sinal.

Fonte: LINO, 2008

Estas medidas foram obtidas por um robô em baixa velocidade em um ambiente *indoor*.

4.3 Desempenho da rede IEEE 802.15.4 com mobilidade

Para analisar desempenho de redes IEEE 802.15.4 com mobilidade, é necessário analisar o comportamento da BER diante das características da mobilidade. O sinal resultante de uma transmissão com mobilidade será de acordo com a Figura 19, onde existe a soma ao sinal da atenuação sofrida pela propagação em uma determinada distância, descrita pela fórmula de Shadowing. Em seguida, o sinal resultante é multiplicado por um fator definido pela distribuição de Weibull. E por fim, o sinal soma as componentes da AWGN para chegar no sinal que será recebido.

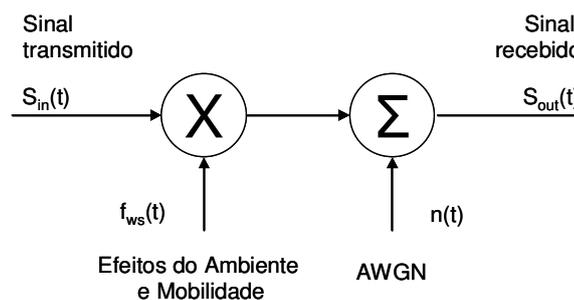


Figura 19. Modelo do canal.

O sinal recebido $S_{out}(t)$ é descrito pela seguinte expressão:

$$S_{out}(t) = S_{in}(t) \times f_{ws}(t) + n(t), \quad (20)$$

onde $f_{ws}(t)$ é descrito por:

$$f_{ws}(t) = f_w(t) + f_s(t), \quad (21)$$

onde $f_w(t)$ é descrito através de uma distribuição de Weibull e $f_s(t)$ é determinado através do modelo de Shadowing.

4.4 Avaliação de desempenho

Analisando a variação da intensidade do sinal descrito pela expressão (19) de Weibull e considerando os valores definidos em (LINO, 2008) para ambientes *indoor* como sendo α igual a 5,33 e β igual a 1,09, o gráfico da Figura 20 representa a simulação do envio de vários pacotes em diferentes condições de potência considerando o modelo de canal. Como resultado da simulação, pode ser analisado o gráfico da BER para os casos em que os elementos se encontram sob as características de transmissões feitas por elemento com mobilidade. Também foi simulado a distribuição de Weibull considerando α igual a 2 e β igual a 1, situação em que a distribuição de Weibull se iguala a distribuição de Rayleigh (LINO, 2008).

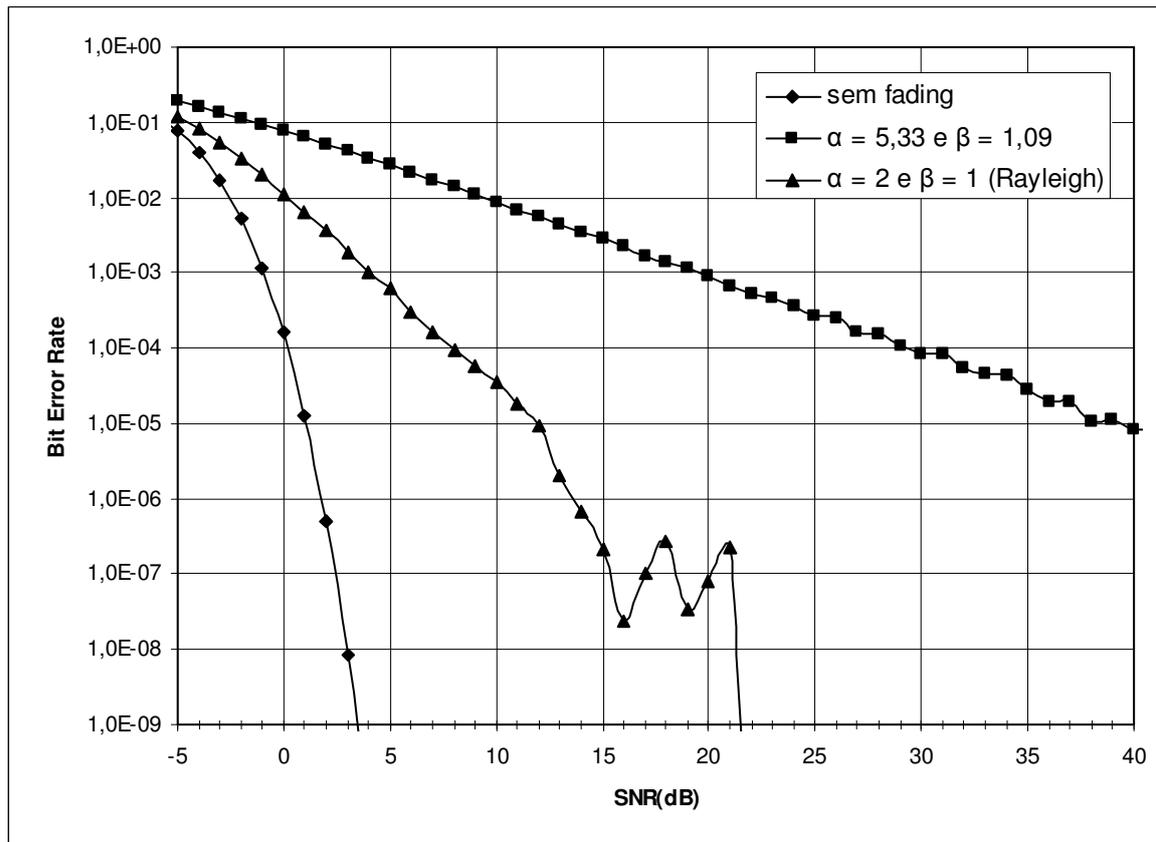


Figura 20. Gráfico de BER considerando mobilidade.

O resultado encontrado na análise do gráfico de BER considerando mobilidade mostra que a base para a simulação do modelo de canal proposto condiz com a literatura encontrada para esse tipo de análise (CAVERS, 2002). Tendo a base teórica para a simulação do modelo de canal, a plataforma de simulação foi desenvolvida e será detalhada no próximo capítulo.

5 PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Nesse capítulo é apresentada a estrutura da plataforma de simulação desenvolvida com o intuito de avaliar o desempenho das redes IEEE 802.15.4 com mobilidade. O desenvolvimento da plataforma de simulação foi necessário visto que todos os simuladores já existentes não contemplavam todas as necessidades para a simulação de ambientes com mobilidades, sendo necessárias adaptações difíceis e nem sempre bem sucedidas.

5.1 Desenvolvimento de uma plataforma de simulação

Plataformas de simulação são excelentes ferramentas e tornam possível a análise de tecnologias em função de ambientes que são difíceis de serem reproduzidos. Através de simuladores é possível testar ambientes variados e obter o controle dos fenômenos, o que dificilmente é possível em ambientes reais. Quando lidamos com tecnologias e características de ambientes muito específicos os simuladores propiciam o estudo dessas tecnologias mesclando ambientes e um número variado de elementos.

Para as redes IEEE 802.15.4 existem poucas implementações de simuladores e que não contemplam todas as necessidades desse trabalho. Um simulador interessante é o NS (NS, 2008) para redes IEEE 802.15.4 (ALNUAIMI; SHUAIB; JAWHAR, 2006), mas para a implementação dos efeitos da mobilidade dos elementos o código necessário é de extrema complexidade. Outra limitação desse simulador é que não existe a implementação do modo *un-slotted*. Somente o modo *slotted*, que não é objeto de estudo desse trabalho, possui implementação dentro do NS.

Outros simuladores, como o caso do *Georgia Tech Network Simulator* (GTNetS) (CHENG; ZANG; BOURGEOIS, 2006), possuem implementação, mas não disponibilizam o código para que possam ser feitas as mudanças necessárias para a simulação de ambientes com mobilidade.

Em vista dessas dificuldades foi necessário desenvolver uma plataforma de simulação para redes IEEE 802.15.4. Assim, foi implementada a estrutura necessária do protocolo para envio de pacotes, implementando a camada PHY e a subcamada MAC, juntamente com o controle das transmissões necessárias para simular ambientes com mobilidade. Foram adicionadas rotinas para as questões de propagação já mostradas no Capítulo 4.

A Figura 21 mostra o procedimento completo necessário para estabelecer a simulação, começando com a definição do cenário em que se deseja realizar a simulação. O próximo passo é a simulação de acordo com as características definidas para os elementos envolvidos na simulação. Como último passo é necessária a análise dos resultados obtidos.

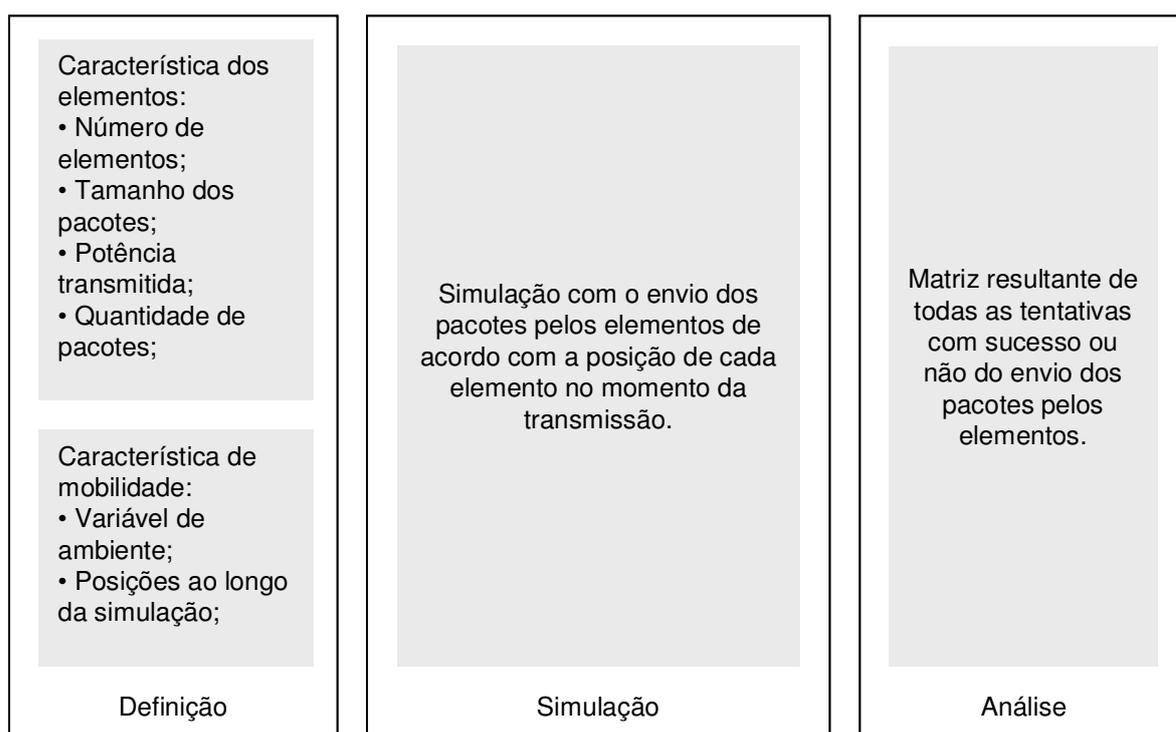


Figura 21. Procedimento completo da simulação.

5.2 Condições iniciais da plataforma de simulação

Para avaliar as redes IEEE 802.15.4 a plataforma de simulação foi desenvolvida com base na implementação do fluxograma da CSMA/CA da MAC do padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2006). Nesse fluxograma foi descrito qual o comportamento do elemento que deseja transmitir algum tipo de dado. Foi considerado que todos os elementos estão trabalhando em modo saturado, isto é, todo elemento sempre tem um pacote a ser transmitido.

Todas as simulações realizadas na plataforma desenvolvida utilizam a frequência de 2400 MHz. Também foi considerada somente transmissão direta de pacotes dos elementos sensores para o coordenador, utilizando a topologia ponto multiponto.

Considerou-se também que a rede simulada não utiliza *beacons* para sincronização, isto é, trabalha sempre no modo *un-slotted*.

Para considerar os efeitos de propagação e de mobilidade foi acrescentado ao simulador decisores. A estes decisores coube a função de determinar se uma transmissão seria ou não realizada com sucesso. Esta decisão se baseia na curva de BER definida no padrão IEEE 802.15.4 de acordo com a SNR. Assim a plataforma de simulação foi preparada para decidir se a transmissão ocorreu com ou sem sucesso. Essa decisão foi tomada considerando uma sensibilidade de -95 dBm os receptores, valor médio da sensibilidade de equipamento de vários fabricantes. A degradação pela distância também foi considerada no simulador, sendo que o coeficiente γ e o desvio padrão σ foram considerado como um parâmetro da simulação a ser definido no processo inicial de definições.

5.3 Estrutura da plataforma de simulação

A plataforma de simulação foi desenvolvida utilizando como base a ferramenta SciLab (SCILAB, 2008). Essa ferramenta é muito utilizada para análise matemática em diferentes problemas e se mostrou adequada para suportar o desenvolvimento de uma plataforma de simulação para redes IEEE 802.15.4. Através dessa

ferramenta foi possível realizar operações matemáticas com matrizes e processar rapidamente as informações obtidas nas simulações.

A plataforma de simulação desenvolvida se baseia em um simulador de eventos discretos, onde a preocupação é tratar o acontecimento de eventos, no caso, dados a serem enviados no formato de um pacote, que ocorreram durante o tempo de simulação. O fluxograma da estrutura básica do simulador está descrito na Figura 22.

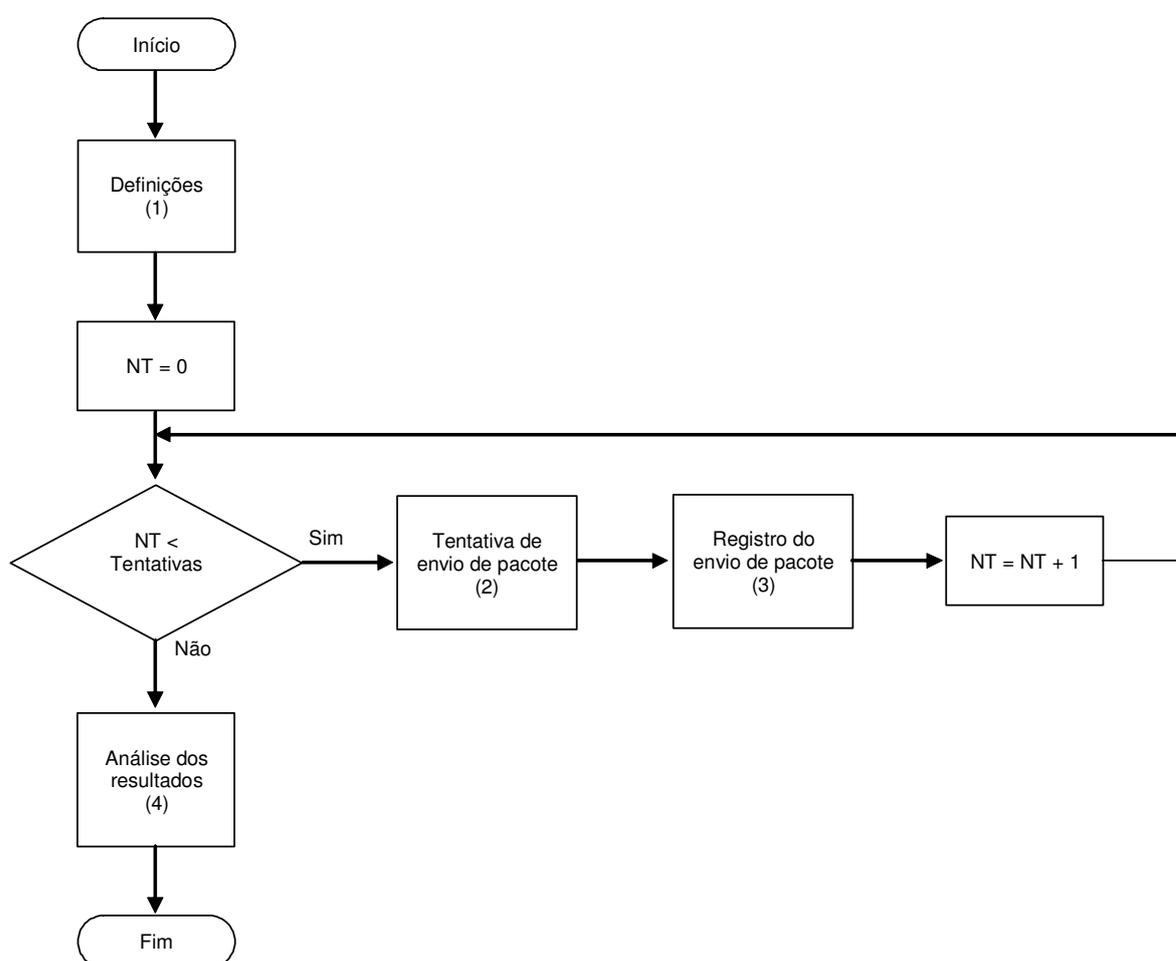


Figura 22. Fluxograma básico da plataforma de simulação. As etapas de Definições (1), Tentativa de envio de pacote (2), Registro do envio de pacote (3) e Análise dos resultados (4) serão detalhados.

A variável NT é o número de tentativas, sendo o número total de tentativas de envio de pacote definida na simulação.

No início da simulação é atribuído a cada elemento um valor aleatório entre 0 e $(2^{BE} - 1)$. Esse valor é multiplicado pela unidade de *backoff* definida para encontrar o tempo inicial de transmissão de cada elemento. A cada tentativa de envio de um pacote é selecionado o elemento cujo valor de tempo seja o menor de todos os elementos.

O processo de Definição (1) pode ser visto em detalhes na Figura 23.

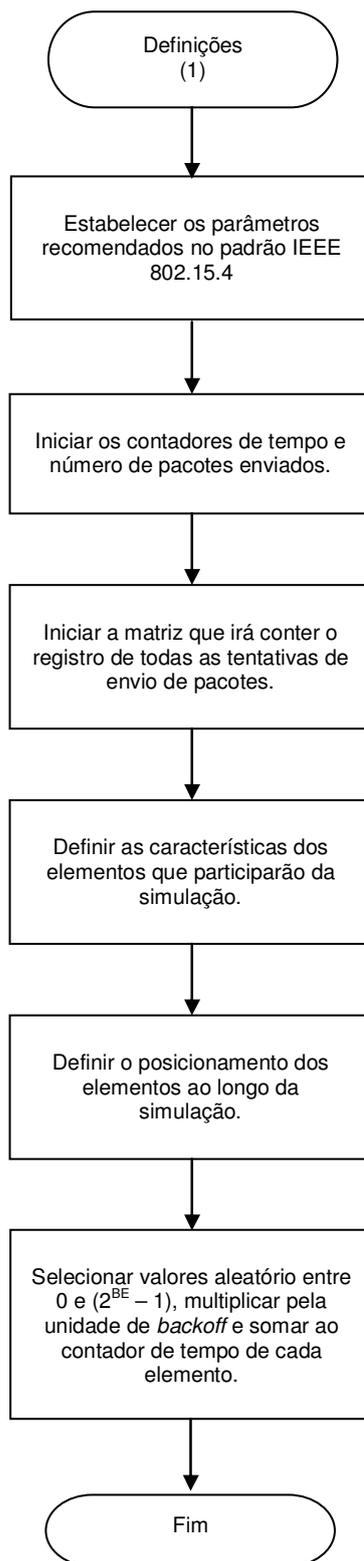


Figura 23. Fluxograma do processo de Definições (1).

Após determinar qual é o elemento cujo o tempo inicial de transmissão é o menor, é feita a verificação se aquele elemento poderá transmitir, isto é, é feito o CCA para verificar se existe alguma transmissão sendo realizada no mesmo instante de tempo e assim verificar se o meio de comunicação está livre para uma nova transmissão. Nesse processo de CCA a plataforma foi desenvolvida para levar em consideração todas as condições definidas no modelo de canal. Isso quer dizer que a distância do elemento sensor até o coordenador e as variáveis de ambientes determinam se a transmissão a ser feita é ou não concluída com sucesso. Caso a potência de recepção no coordenador seja abaixo do limiar de sensibilidade estabelecido na simulação, essa transmissão será desconsiderada.

Caso o processo de CCA determine que o meio de comunicação esteja livre, a plataforma deverá somar no contador de tempo do elemento o valor de IFS para o pacote que será enviado. Lembrando que de acordo com o tamanho do pacote esse tempo poderia ser igual a um intervalo SIFS ou um LIFS como já mencionado no Capítulo 3. Depois de somado o tempo de IFS, a plataforma deve selecionar novamente um novo tempo de *backoff* e somá-lo ao contador de tempo do elemento.

Caso o meio de comunicação não esteja disponível por estar sendo utilizado por outro elemento, a plataforma deverá somar 1 ao valor de NB como consta no fluxograma do CSMA/CA para aquele elemento até o máximo de *macMaxCSMABackoffs* definidos na simulação. Esse parâmetro determinará o número de tentativas que deverão ser feitas até que a plataforma desista de enviar o pacote selecionado. A seguir, a plataforma deverá somar 1 no valor de BE para aquele elemento até o máximo de *macMaxBE*, definido na simulação.

Na Figura 24 o processo de Tentativa de envio de pacote (2) é apresentado.

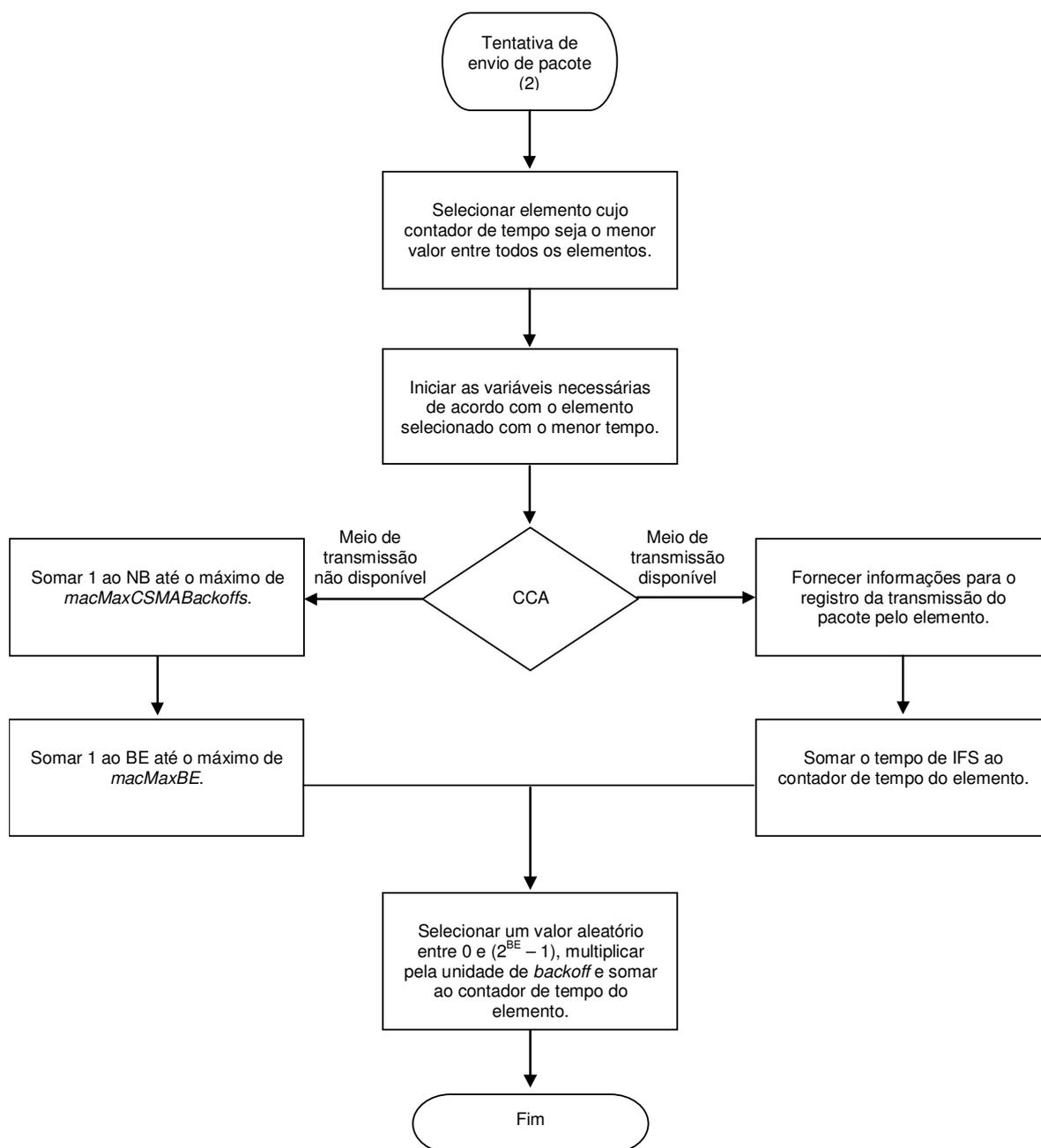


Figura 24. Fluxograma do processo de Tentativa de envio de pacote (2).

Realizado o processo de tentativa de envio, é feita a verificação se, caso ocorra a transmissão, o pacote enviado não colide com outra transmissão que possa estar sendo feita no mesmo meio de comunicação. Todas as informações referentes ao pacote são então registradas em uma matriz que contém todas as tentativas de envio de pacotes feitas por todos os elementos. Esta matriz é fundamental para a verificação do CCA e posterior análise dos dados.

Para o processo de Registro do envio de pacotes (3) tem-se a estrutura apresentada na Figura 25.

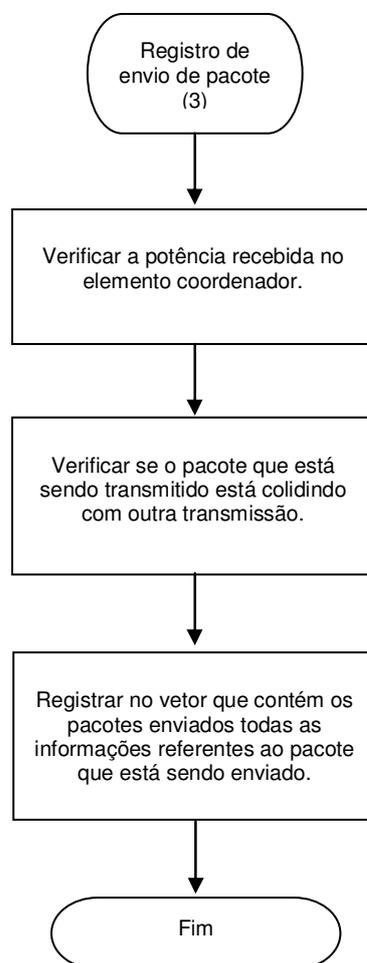


Figura 25. Fluxograma do processo de Registro de envio de pacote (3).

Depois da realização de todos os cálculos das transmissões ou tentativas de transmissões dos pacotes dos elementos, a plataforma faz uma análise dos resultados contidos na matriz de tentativas. A análise dos resultados feita pela plataforma visa extrair as informações sobre o processo simulado. A plataforma permite também armazenar estes valores para posterior análise.

A Figura 26 mostra a estrutura detalhada do processo de Análise dos resultados (4).

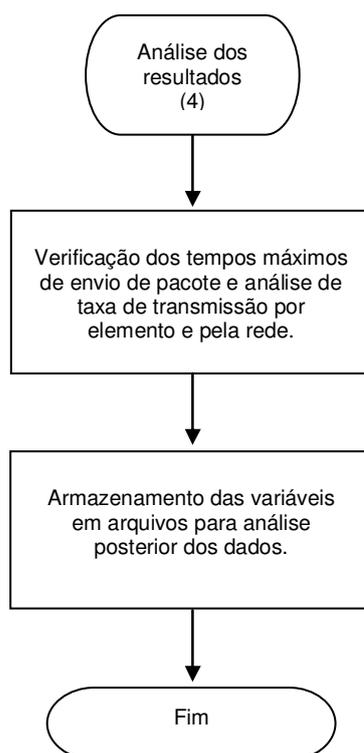


Figura 26. Fluxograma do processo de Análise dos resultados (4).

Os dados obtidos com a simulação do envio dos pacotes são salvo para que seja possível uma análise posterior mais detalhada. Como resultado da simulação a plataforma gera uma matriz contendo informações sobre cada tentativa de envio de pacote. Esta matriz contém em cada linha os seguintes campos referente as tentativas de envio de pacote:

- Tempo inicial em segundos do envio do pacote;
- Tempo final em segundos do envio do pacote;
- Tamanho em bytes do *payload* contido no pacote;
- Índice referente ao elemento que estava enviando o pacote. Esse índice é utilizado para buscar as configurações do elemento no vetor passado como argumento para o simulador;

- Posição horizontal em metros do elemento em relação ao coordenador;
- Posição vertical em metros do elemento em relação ao coordenador;
- Potência de transmissão em dBm utilizada para a transmissão do pacote;
- Fator de atenuação de Shadowing utilizado para a transmissão do pacote;
- Fator de forma de Weibull utilizado para a transmissão do pacote;
- Fator de escala de Weibull utilizado para a transmissão do pacote;
- Indicador de sucesso do envio do pacote. Caso o valor seja igual a um, o elemento conseguiu enviar com sucesso o pacote. Caso o valor seja igual a dois, o envio do pacote sofreu colisão com outra transmissão. Caso o valor seja igual a três, o receptor no coordenado desconsiderou o envio do pacote pelo efeito de cálculo de BER;
- Potência de recepção em dBm calculada no coordenador;
- Valor de BE utilizado para a transmissão do pacote;
- Contador de tentativa de envio do pacote. A cada tentativa de envio de um pacote por elemento esse contador foi incrementado de uma unidade;

O resultado contido nesse vetor pôde ser analisado de diferentes maneiras. A forma selecionada nesse trabalho para verificar o impacto da mobilidade nas redes IEEE 802.15.4 foi de verificar a taxa de transmissão geral de todos elementos e analisar a taxa de transmissão de cada elemento. Dessa maneira, foi possível verificar o rendimento e conseqüente performance da rede de acordo com o cenário escolhido para a simulação.

5.4 Mobilidade dos nós

Para avaliar e criar cenários de avaliação foi necessário a utilização de modelos de mobilidades para descrever a posição dos elementos ao longo da simulação. Esses modelos representam as características de locomoção dos elementos dentro de uma área, recebendo como argumento a velocidade e determinando a posição dos elementos ao longo do tempo. Outros modelos representam padrões de mobilidade de pessoas, outros de equipamentos e até mesmo de veículos em vias de trânsito.

A plataforma foi desenvolvida para poder receber qualquer tipo de modelo de mobilidade. Para isso foi necessário determinar um vetor das posições de cada elemento ao longo do tempo.

Foram feitos testes com posições de elementos gerados a partir de (GMSF, 2008), onde é possível estabelecer características para vários modelos de mobilidade e o sistema gera um arquivo contendo as posições dos elementos ao longo do tempo. Através destas posições determinada nos testes, foi possível comprovar o funcionamento da plataforma de simulação utilizando alguns modelos de mobilidade disponíveis, validando a plataforma de simulação para utilização com modelos de mobilidades mais complexos.

Para a avaliação de impacto da mobilidade proposta neste trabalho, não foi utilizado nenhum modelo de mobilidade. A complexidade na movimentação dos elementos provoca um aumento na complexidade da análise e avaliação do impacto da mobilidade. Optou-se por utilizar cenários com posições menos complexas e que facilitasse a comparação e a avaliação do impacto da mobilidade.

5.5 Resultados esperados das simulações

Como resultados esperados para as simulações realizadas através da plataforma de simulação desenvolvida nesse trabalho está a análise e comparação de desempenho de cenários de redes de sensores sem fio IEEE 802.15.4 com e sem mobilidade. As simulações realizadas na plataforma devem ser capazes de

demonstrar o funcionamento mais próximo possível das redes IEEE 802.15.4, demonstrando também qual é o comportamento do sinal quando elementos com mobilidade estão envolvidos.

A análise de desempenho pode ser feita utilizando os indicadores:

- Taxa de transmissão total da rede;
- Taxa de transmissão média por elemento;
- Taxa de erro de bit apresentada na rede;
- Taxa de colisão das transmissões dos elementos;
- Quantidade máxima de elementos de acordo com limiares de taxa de transmissão média por elemento;
- Alcance máximo dos elementos em relação ao coordenador de acordo com limiares de taxa de transmissão média por elemento.

Além desses indicadores, a plataforma de simulação permite que seja feita uma análise posterior à simulação utilizando as variáveis resultantes, que podem ser salvas em arquivos. Essas variáveis contêm todas as definições utilizadas para a simulação, bem como todos os pacotes enviados durante a transmissão. Isso traz flexibilidade para a simulação, pois os dados podem ser utilizados de várias maneiras para extrair vários tipos de resultados interessantes, não somente os resultados encontrados ao final das simulações.

Como a análise da plataforma de simulação resulta em um comparativo entre o comportamento de uma rede IEEE 802.15.4 com elemento sem mobilidade e com elementos com mobilidade, é definido no próximo capítulo os cenários para avaliação e comprovação dos resultados alcançados através da plataforma.

6 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados alcançados nos cenários com e sem mobilidade estabelecidos para avaliação de impacto da mobilidade. É apresentada a forma com que a plataforma de simulação foi preparada para a realização dos testes e como os resultados coletados foram analisados. Após a simulação dos cenários é feita uma análise dos resultados obtidos, buscando comparação entre o ambiente sem mobilidade e o ambiente com mobilidade.

6.1 Preparação do simulador

Para a execução dos testes é necessária a preparação da plataforma de simulação de acordo com os cenários definidos. Para a definição dos cenários é necessário determinar algumas variáveis, sendo a primeira, a quantidade de elementos que iriam compor a simulação. Definida a quantidade de elementos, são atribuídos valores para as características dos elementos. É necessário definir as seguintes características para cada elemento:

- Quantidade de bytes utilizada no *payload* dos pacotes enviados pelo elemento;
- Potência de transmissão. O valor utilizado para esse atributo deve ser em dBm;
- Intervalo fixo em segundos entre os pacotes enviados pelo elemento. Caso o elemento opere em modo saturado, esse valor deve ser igual a zero;
- Utilização de confirmação de recebimento pelo elemento. Caso utilize confirmação, esse atributo deve ser igual a um, caso contrário deve ser igual a zero;
- Coeficiente de perda de percurso (γ);

- Fator de forma de Weibull (α);
- Fator de escala de Weibull (β);

Outra variável que faz parte da definição do cenário é o comportamento em relação à movimentação dos elementos ao longo dos testes. Para isso é necessário estabelecer um vetor contendo as posições de cada elemento ao longo da simulação.

Para que a simulação possa indicar a perturbação da rede em função da mobilidade, é importante que os testes sejam executados com os elementos sem mobilidade e logo após com características de mobilidade.

6.2 Valores utilizados nas transmissões

A potência de transmissão utilizada é de 0 dBm para todos os elementos envolvidos nas simulações. Para os ganhos das antenas de transmissão e recepção são considerados como sendo de 0 dB em todos os casos.

6.3 Características do ambiente

Os parâmetros que definem a distribuição de Weibull são considerados como parâmetros de entrada para a plataforma. Os dados aqui utilizados foram os estabelecidos em outro trabalho (LINO, 2008). Sendo assim, o fator de forma α é igual a 5,33 e o fator escala β é igual a 1,09. Este ambiente representa um ambiente *indoor* com movimentação de pessoas.

Para o coeficiente de perda de percurso γ é considerado o valor 3, sendo este um valor característico encontrado na literatura (RAPPAPORT, 1996) para ambiente *indoor*. Para desvio padrão σ de Shadowing é considerado o valor de 2, sendo este um valor que não causa grande degradação do sinal ao longo da distância

propagada, visando não prejudicar a análise principal da mobilidade através da distribuição de Weibull.

6.4 Cenários de testes

Para avaliação de desempenho são determinados dois cenários de simulação que caracterizam ambientes sem e com mobilidade. As disposições dos elementos ao longo dos testes são consideradas como sendo de elementos dispostos em circunferências ao redor do coordenador. Desta maneira os elementos mantêm a distância fixa em relação ao coordenador ao longo das simulações, mantendo as posições relativas inalteradas durante toda a simulação. Entre os elementos a distância também é calculada para que fosse igualmente distribuída ao longo da circunferência. Na Figura 27 vê-se exemplos da disposição dos elementos ao longo das simulações.

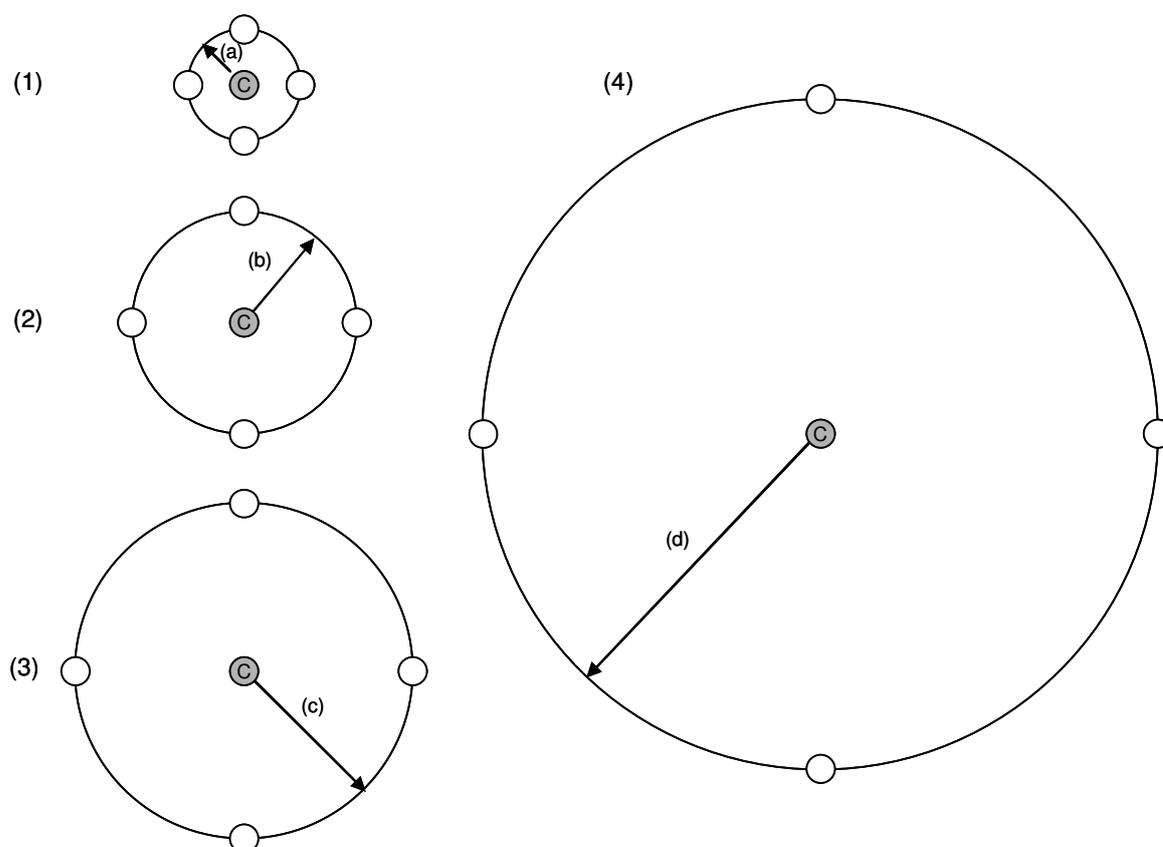


Figura 27. Exemplo da disposição dos elementos ao longo das simulações. Nas condições (1)(2)(3) e (4) os elementos mantêm a distância constante de (a)(b)(c) e (d), respectivamente, em relação ao coordenador.

Esta disposição utilizada mantém a simetria e torna possível uma análise mais apurada do impacto das transmissões ao longo das distâncias, uma vez que através desta disposição é possível encontrar condições onde os elementos estão distantes uns dos outros a ponto de não se comunicarem, mas conseguem se comunicar com o coordenador, situação em que existe grande quantidade de colisões. Um exemplo dessa situação está na distância de 30 metros, onde dois elementos podem se encontrar 60 metros de distância um do outro. Nesta condição, os elementos conseguem se comunicar com o coordenador, mas existem muita colisão por um elemento não conseguir detectar a comunicação do outro. Nesta disposição também é possível encontrar condições em que o elemento está longe o suficiente do coordenador e suas transmissões não são recebidos corretamente no coordenador. Outra condição encontrada nesta disposição é a de elementos muito próximos uns dos outros, disputando o meio e dividindo o tráfego equanimente.

Os cenários estabelecidos são de ambientes *indoor* onde a rede possuía de 1 até 100 elementos. Os elementos estavam dispostos em uma circunferência, onde em cada bateria de teste seu raio variou de 10 até 100 metros. Em cada bateria de teste foram simuladas 10.000 tentativas de envio de pacotes. Esse número de tentativas foi considerado por resultar em um período de transmissão simulada de 60 segundos, levando 10 minutos para ser processado pela plataforma de simulação. Foram testados valores maiores para o número de tentativas, mas o resultado alcançado foi próximo do estabelecido em 10.000 tentativas, mas o tempo de processamento da plataforma foi muito maior.

Foi definido o Cenário 1 como sendo o cenário em que os elementos não apresentavam mobilidade. Já o Cenário 2 foi definido como sendo o cenário em que os elementos apresentavam mobilidade.

Para o Cenário 2 é considerado que todos os elementos estão se movendo na circunferência de raio fixo definido em cada bateria de testes. Por utilizar os valores referentes a α e β de Weibull de (LINO, 2008), foram considerados que os elementos aqui simulados apresentavam a mesma velocidade de 1,62 metros/minuto do robô utilizado para caracterização de caracterização feito em (LINO, 2008).

6.5 Métricas para avaliação de desempenho

Para avaliar o desempenho da rede nos dois cenários foi necessário estabelecer as métricas para avaliação de desempenho. O primeiro indicador que foi utilizado foi a taxa de transmissão da rede. A partir dela foi possível estabelecer qual o rendimento da rede se comparado à taxa de transmissão máxima definida para o padrão IEEE 802.15.4 nas condições utilizadas, que no caso é de 250 kbps.

De acordo com (LATRÉ; DE MIL; MOERMAN; DOEDT; DEMEESTER; DIERDONCK, 2006) a taxa de transmissão TP em bits por segundo é dada por:

$$TP = \frac{8 \cdot x}{delay(x)}, \quad (22)$$

onde x representa o número de *bytes* enviado e recebido com sucesso no destinatário e a função *delay* é dada por:

$$delay(x) = T_{BO} + T_{frame}(x) + T_{TA} + T_{ACK} + T_{IFS}(x), \quad (23)$$

onde T_{BO} é o tempo de *backoff* em segundos, $T_{frame}(x)$ é o tempo de transmissão do pacote de *payload* x, T_{TA} é o *turn around time* antes do envio de um pacote ACK, T_{ACK} é o tempo de transmissão do ACK, $T_{IFS}(x)$ é o tempo de IFS para um pacote de *payload* x.

O tempo de transmissão de um pacote com *payload* de x é dada por:

$$T_{frame}(x) = 8 * \frac{L_{header} + L_{payload}}{R}, \quad (24)$$

onde L_{header} é o tamanho em bits do cabeçalho utilizado, $L_{payload}$ é o tamanho em bits do *payload* utilizado e R é a taxa de transmissão utilizada. Para as simulações apresentadas o L_{header} foi considerado de 6 bytes e R igual a 250 kbps (IEEE, 2006). Foi avaliado o impacto do tamanho do *payload* utilizando o *payload* da camada PHY como sendo 1 até 127 bytes.

Outro indicador utilizado foi a taxa de transmissão média por elemento. Este indicador é dado por:

$$TP_{\text{m\u00e9dio}} = \frac{TP}{n}, \quad (25)$$

onde TP \u00e9 a taxa de transmiss\u00e3o da rede e n \u00e9 o n\u00famero de elementos.

O indicador de porcentagem de colis\u00e3o em rela\u00e7\u00e3o ao n\u00famero total de pacotes enviados na rede tamb\u00e9m foi utilizado para determinar o desempenho da rede.

Por \u00faltimo foi analisado o indicador de pacotes errados (PER) em rela\u00e7\u00e3o ao n\u00famero total de pacotes enviados. No ANEXO C \u00e9 mostrado o material utilizado para defini\u00e7\u00e3o do PER.

Todos estes indicadores apresentados podem indicar a degrada\u00e7\u00e3o no desempenho da rede IEEE 802.15.4 em fun\u00e7\u00e3o da mobilidade. A degrada\u00e7\u00e3o pode ser determinada como sendo de impacto positivo se, por causa das caracter\u00edsticas dos elementos com mobilidade j\u00e1 apresentadas nesse trabalho, a rede apresentar desempenho melhor do que o desempenho sem mobilidade nas mesmas condi\u00e7\u00f5es definidas para os testes. Por outro lado, a degrada\u00e7\u00e3o pode ser determinada como sendo de impacto negativo se a rede com mobilidade apresentar desempenho pior do que sem mobilidade.

A degrada\u00e7\u00e3o da rede com mobilidade ser\u00e1 analisada logo ap\u00f3s a apresenta\u00e7\u00e3o dos resultados no item a seguir.

6.6 Resultados

Como primeiro resultado, p\u00f4de-se analisar nos dois cen\u00e1rios a taxa de transmiss\u00e3o m\u00e9dia da rede, considerando a transmiss\u00e3o de todos os elementos, de acordo com a varia\u00e7\u00e3o de *payload* para um n\u00famero variado de elementos. O resultado \u00e9 apresentado na Figura 28.

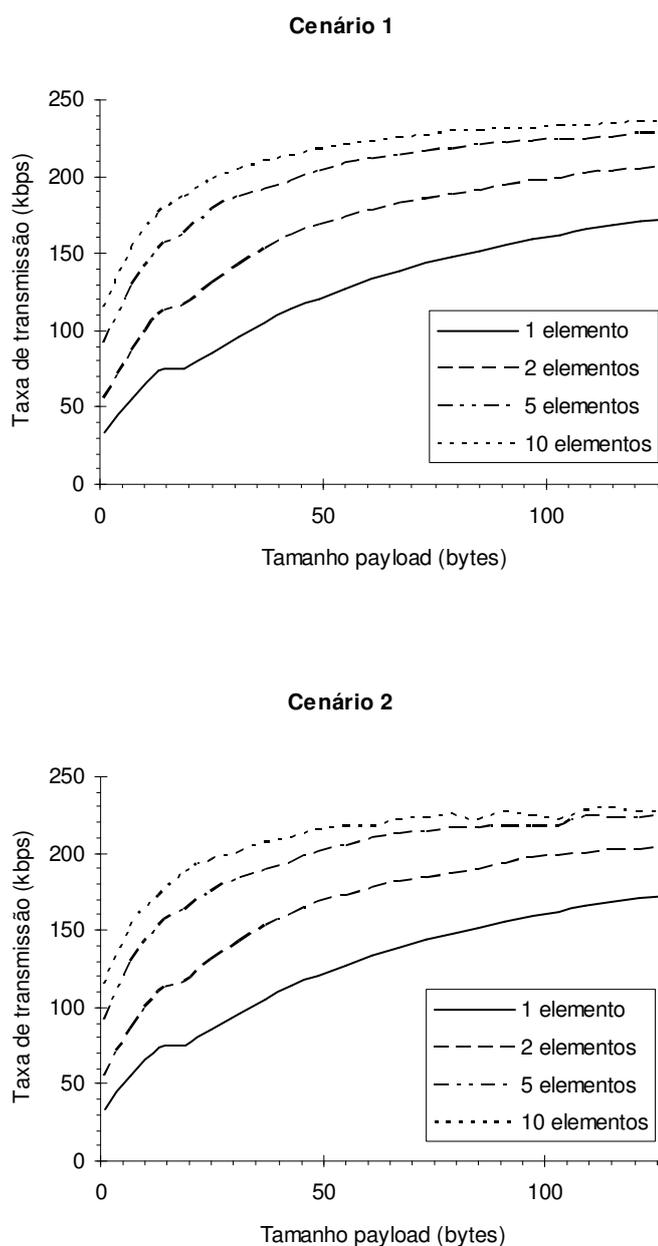


Figura 28. Gráficos da taxa de transmissão média da rede por tamanho de *payload* para o Cenário 1 e Cenário 2. O número de elementos também foi alterado para verificar o impacto na taxa de transmissão, mantendo a distância de 10 metros.

Verificando o comparativo visto nos gráficos da Figura 28 da taxa de transmissão no Cenário 1 e no Cenário 2, nota-se que a rede IEEE 802.15.4 apresentou taxas muito próximas nos dois cenários. Pode-se verificar que para 1 elemento com *payload* de 10 bytes os dois cenários apresentaram taxa de transmissão próxima de 60 kbps. Para 1 elemento e *payload* de 100 bytes os dois cenários apresentaram taxa de transmissão próxima de 160 kbps.

O resultado encontrado se assemelha a outros resultados encontrados em (SUN; CHEN; HAN; YANG; GERLA, 2006) (LEE, 2006), onde a taxa de transmissão máxima encontrada para 1 elemento e *payload* de 127 bytes é de 187 kbps (LATRÉ; DE MIL; MOERMAN; DOEDT; DEMEESTER; DIERDONCK, 2006).

Analisando ainda os gráficos da Figura 28, nota-se que a mobilidade causou uma pequena perturbação nas transmissões cujo *payload* foi maior que 60 bytes e a quantidade de elementos maior que 2 elementos, considerando a distância de transmissão de 10 metros. Esta perturbação causou uma oscilação na taxa de transmissão e pode ser analisada melhor na Figura 29.

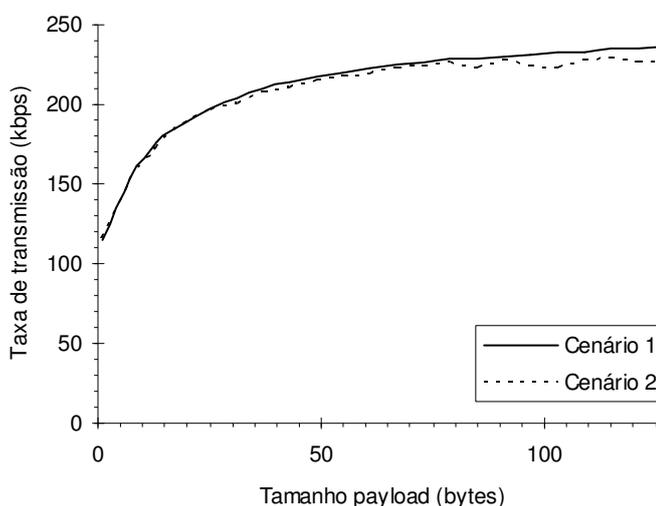


Figura 29. Gráfico da taxa de transmissão de acordo com o tamanho do *payload* para o Cenário 1 e o Cenário 2. A análise foi feita para 10 elementos e distância de 10 metros.

É possível verificar na taxa de transmissão mostrada na Figura 28 a mudança de SIFS para LIFS na temporização do intervalo entre os pacotes. Esta mudança pode ser melhor verificada na Figura 30 e ocorre quando o tamanho do pacote passa de 18 bytes, no caso 12 bytes de *payload* na camada PHY.

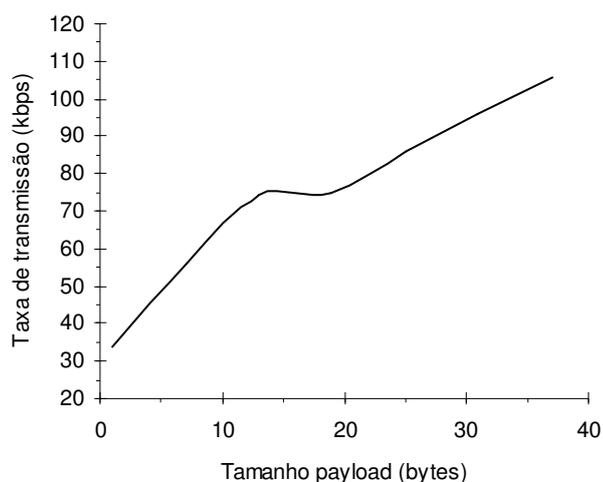


Figura 30. Gráfico da taxa de transmissão de 1 elemento no Cenário 1 para payload de 1 até 40 bytes durante a transição de SIFS para LIFS.

Com o aumento do número de elementos tem-se um aumento da disputa pelo acesso ao meio de transmissão. Isso faz com que a taxa de transmissão aumente, diminuindo o intervalo de tempo entre os pacotes enviados. Analisando a taxa de transmissão média por elemento, o aumento do número de elementos provoca diminuição da taxa de transmissão média por elemento como pode ser analisado na Figura 31.

Esta taxa de transmissão média por elemento apresentou o resultado mostrado na Figura 31, considerando o tamanho de *payload* e número de elementos variados para os dois cenários.

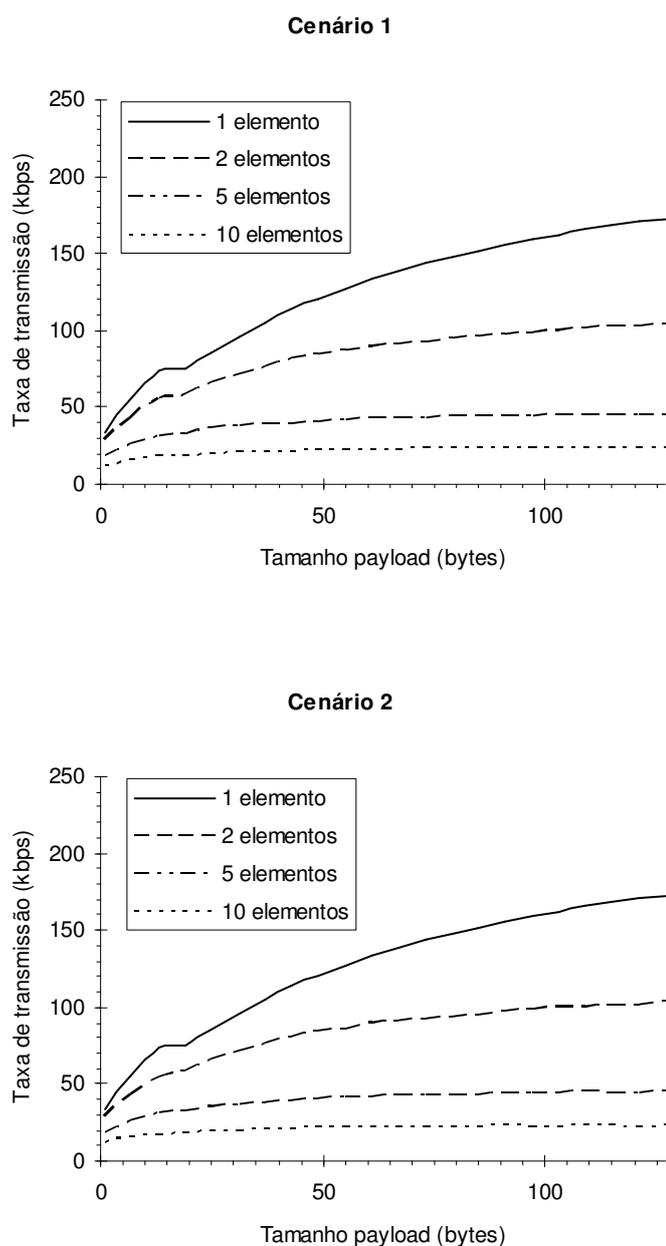


Figura 31. Gráficos da taxa de transmissão média por elemento de acordo com o tamanho do *payload* no Cenário 1 e no Cenário 2. A análise foi feita para 1 elemento, 2 elementos, 5 elementos e 10 elementos, mantendo a distância de 10 metros..

Analisando a taxa de transmissão média por elemento, os dois cenários apresentaram valores muito próximos na distância de 10 metros. Isso mostra que a variação na taxa de transmissão média da rede é causada por uma variação muito sutil na taxa de transmissão média de cada elemento.

Verificando a influência da distância na transmissão, outra análise pôde ser feita considerando a taxa de transmissão máxima em função da distância dos elementos até o coordenador. A Figura 32 mostra os gráficos da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado para os dois cenários.

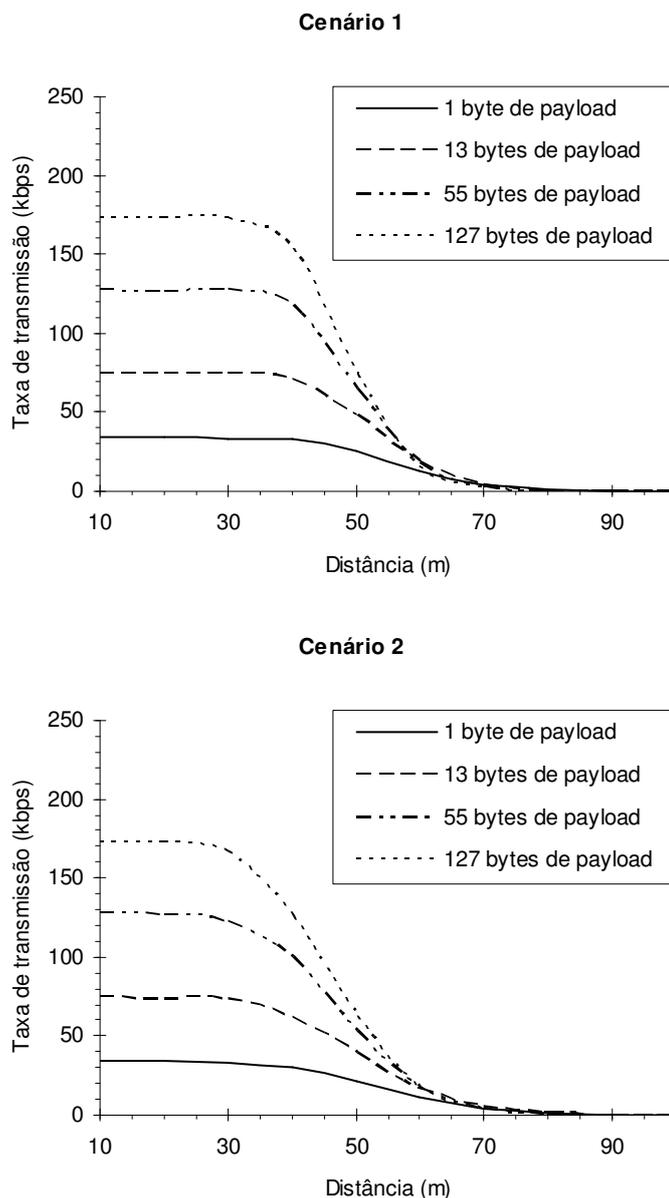


Figura 32. Gráficos da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado para o Cenário 1 e o Cenário 2. A análise foi feita utilizando *payload* de 1 byte, 13 bytes, 55 bytes e 127 bytes.

Analisando a taxa de transmissão máxima em função da distância dos elementos até o coordenador, foi possível verificar que a degradação por causa do aumento da

distância é maior no cenário com mobilidade do que no cenário sem mobilidade. Como mostrado na Figura 33, foi possível notar a degradação menor no Cenário 1 comparada com o Cenário 2. Se analisado a uma distância de 40 metros, a rede apresentou taxa de transmissão de 120 kbps para o Cenário 1 e 100 kbps para o Cenário 2.

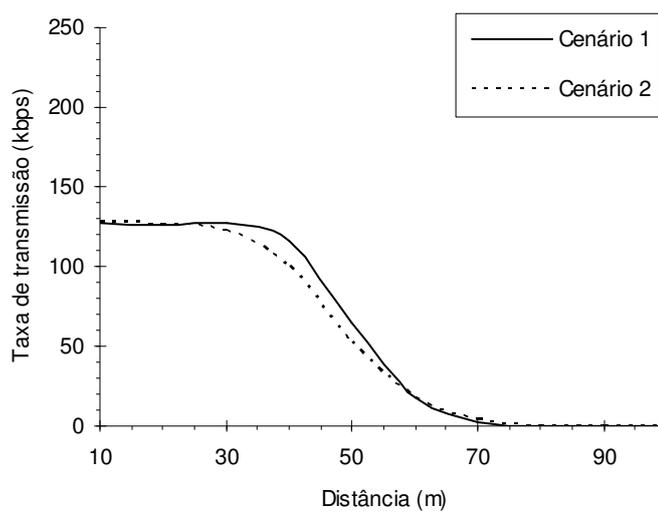


Figura 33. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando o Cenário 1 e o Cenário 2 para payload de 55 bytes com 1 elemento.

Se analisado para 2 elementos, como mostrado na Figura 34, foi possível verificar que a mobilidade nessas condições provocou uma melhora na taxa de transmissão na região próxima de 35 metros. No Cenário 1 a taxa de transmissão para 35 metros foi de 30 kbps. Já no Cenário 2, a taxa de transmissão para 35 metros foi de 50 kbps. Foi possível verificar também uma pequena melhora em distâncias maiores que 60 metros, mas essa região não apresentou significativo aumento da taxa de transmissão, variando 5 kbps entre os cenários, devido a alta taxa de erro de pacote como pôde se visto na Figura 45 mais a frete.

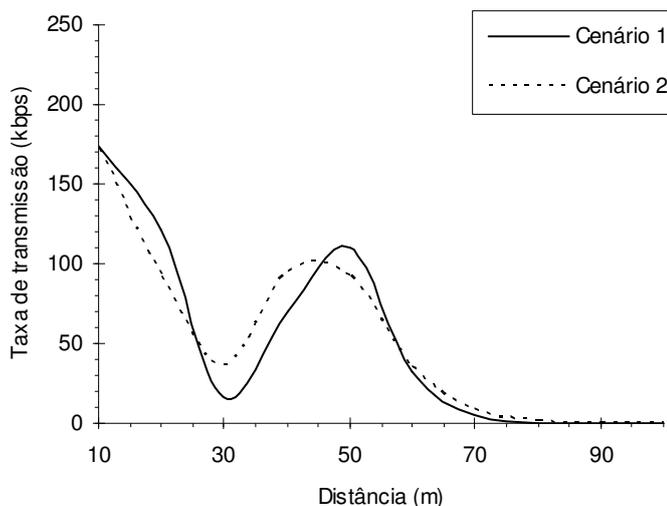


Figura 34. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando os cenários 1 e 2 para payload de 55 bytes com 2 elementos.

Se for analisado com 5 elementos e com 10 elementos, como mostrado nas Figura 35 e Figura 36 respectivamente, foi possível verificar que a mobilidade teve um impacto sobre a taxa de transmissão. Verificando a uma distância de 20 metros, por exemplo, com 5 elementos a taxa de transmissão para o Cenário 1 era de aproximadamente 130 kbps e no Cenário 2 era de aproximadamente 50 kbps. Já com 10 elementos a taxa de transmissão para o Cenário 1 era de aproximadamente 80 kbps e no Cenário 2 era de aproximadamente 10 kbps. A taxa de transmissão só foi melhor com mobilidade em regiões onde a rede possuía taxa de transmissão abaixo de aproximadamente 50 kbps, como, por exemplo, na distância de 30 até 45 metros.

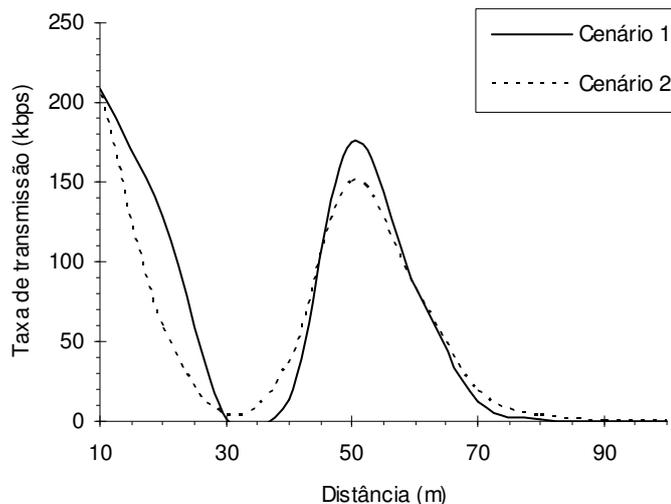


Figura 35. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando os cenários 1 e 2 para payload de 55 bytes com 5 elementos.

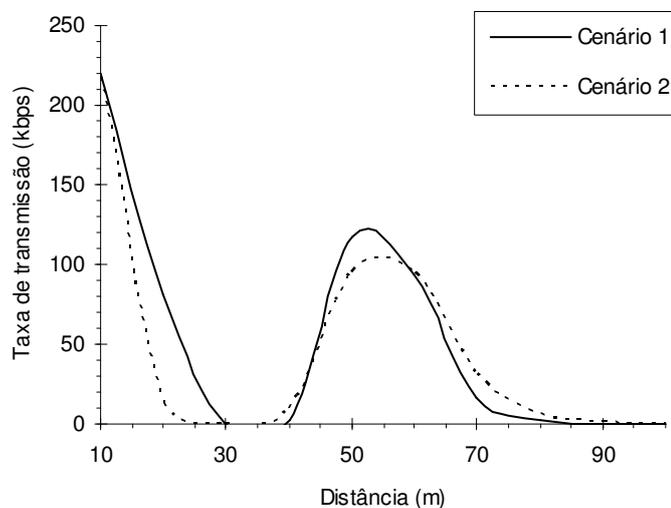


Figura 36. Gráfico da taxa de transmissão pela distância entre os elementos e o coordenado, comparando os cenários 1 e 2 para payload de 55 bytes com 10 elementos.

As análises feitas utilizaram o valor 3 para *macMinBE* sugerido no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2006). Em (LATRÉ; DE MIL; MOERMAN; DOEDT; DEMEESTER; DIERDONCK, 2006) é sugerido que a alteração desse parâmetro *macMinBE* pode

aumentar a taxa de transmissão e proporciona uma melhor distribuição da taxa de transmissão entre os elementos. Na Figura 37 mostram-se os gráficos da variação da taxa de transmissão de acordo com os valores de *macMinBE* e do número de elementos para os dois cenários. É possível verificar que no cenário com mobilidade, valores de *macMinBE* menor que 3 pode causar uma degradação no desempenho.

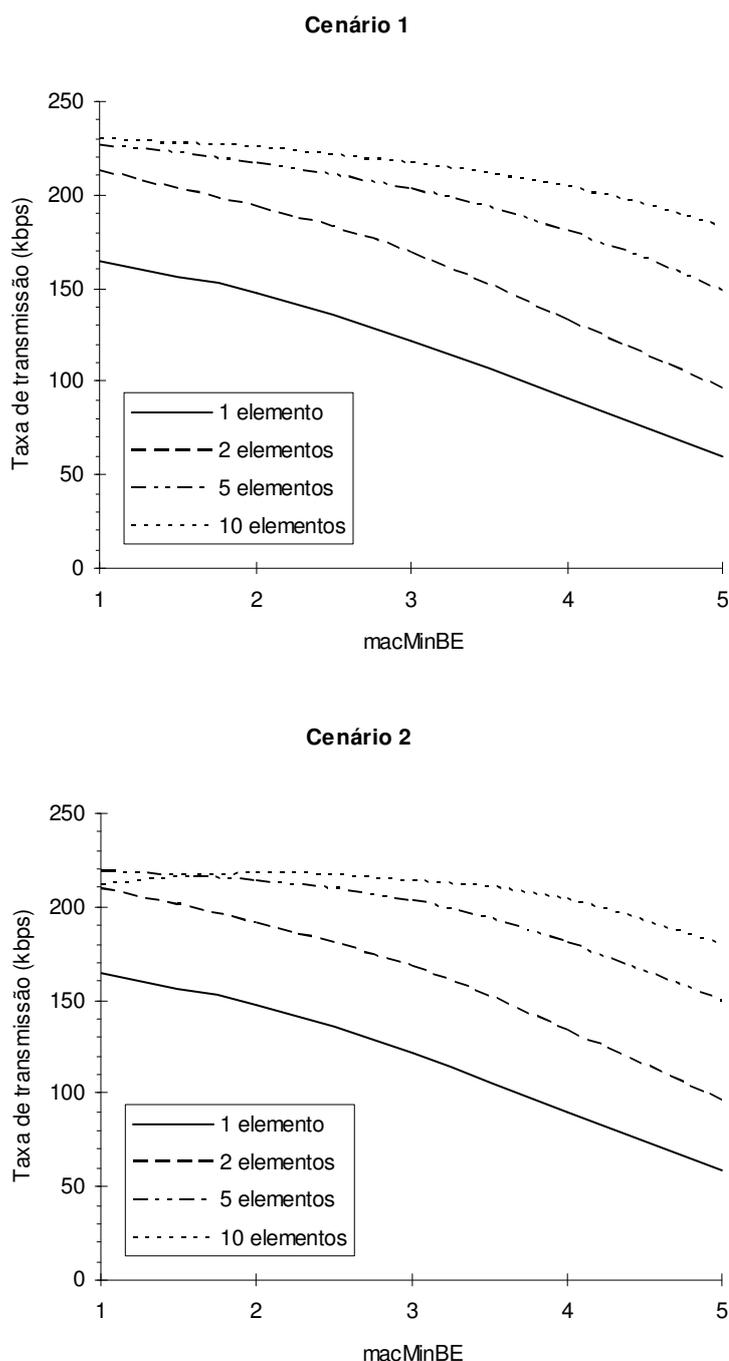


Figura 37. Gráficos da taxa de transmissão para diferentes valores de *macMinBE* e para diferentes quantidades de elementos para o Cenário 1 e o Cenário 2. A análise foi feita utilizando 55 bytes de *payload* e distância de 10 metros.

Em relação à distância, o impacto da alteração do parâmetro *macMinBE* pôde ser verificado na Figura 38.

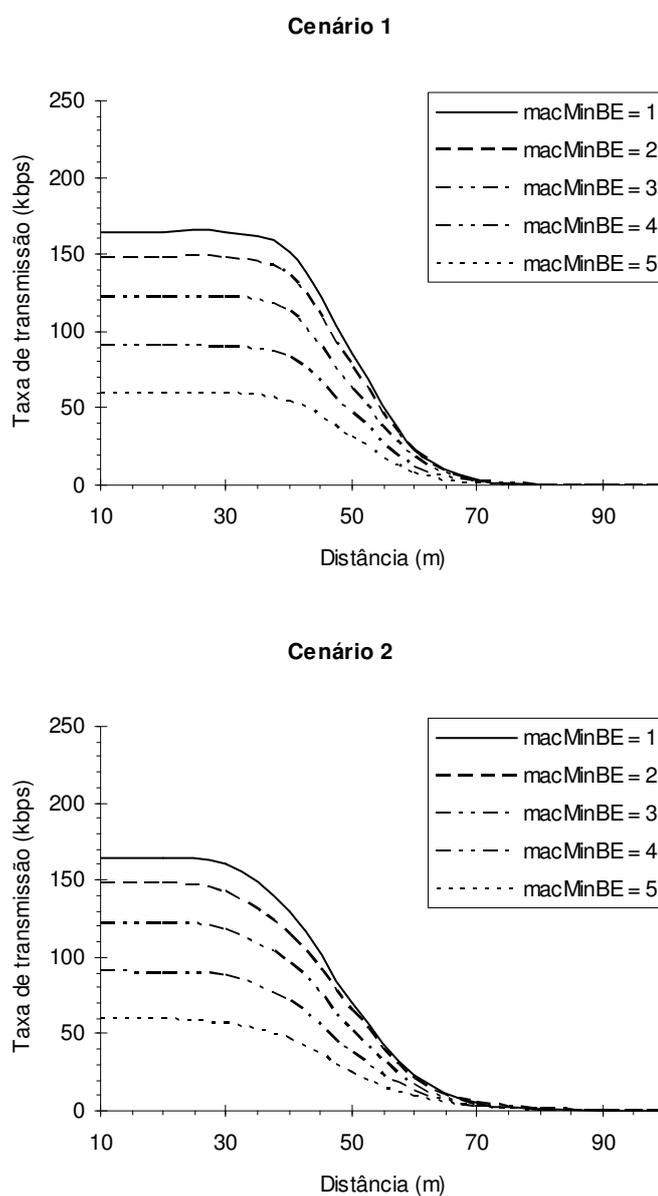


Figura 38. Gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenador com o valor do *macMinBE* variando de 1 a 5 para o Cenário 1 e o Cenário 2.

Quando analisado o impacto da alteração do parâmetro da MAC *macMinBE*, foi possível notar na Figura 37 um aumento significativo na taxa de transmissão para

valores menores que o valor 3 sugerido no padrão. Ao utilizar o valor 3, nos dois cenários a taxa de transmissão ficou próxima de 130 kbps, quando analisado a uma distância de 10 metros para 1 elemento. Já para o valor 2 a taxa de transmissão ficou próxima de 150 kbps.

Se for analisado para um número de elementos maior que 5 elementos, a alteração do parâmetro *macMinBE* no Cenário 2 provocou uma diminuição na taxa de transmissão para valores menores que 3. Quando utilizado o valor 1 na distância de 10 metros e para 10 elementos a taxa de transmissão passou de próxima de 230 kbps no Cenário 1 para próxima de 210 kbps no Cenário 2. Esta degradação na taxa de transmissão se deve ao fato do intervalo entre as transmissões diminuírem e, pelo Cenário 2 ser um cenário com mobilidade, a instabilidade maior do sinal provocou um aumento do número de colisões.

Em relação a análise do impacto da alteração do parâmetro *macMinBE*, houve uma diminuição na taxa de transmissão no Cenário 2 em relação ao Cenário 1. Na Figura 39 foi possível notar a degradação maior ao longo da distância para o Cenário 2 com 1 elemento e *macMinBE* igual a 1. Na distância de 40 metros a taxa de transmissão para o Cenário 1 foi de aproximadamente 150 kbps e no Cenário 2 foi de aproximadamente 130 kbps.

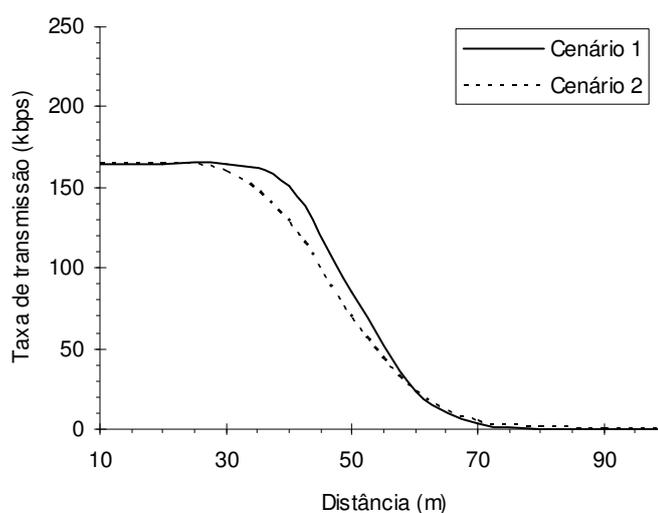


Figura 39. Gráficos da taxa de transmissão pela distância do elemento em relação ao coordenador com o valor 1 do *macMinBE* e 1 elemento com 55 bytes de *payload* para o Cenário 1 e o Cenário 2.

A Figura 40 mostra os gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenador para o Cenário 1, variando a quantidade de elementos.

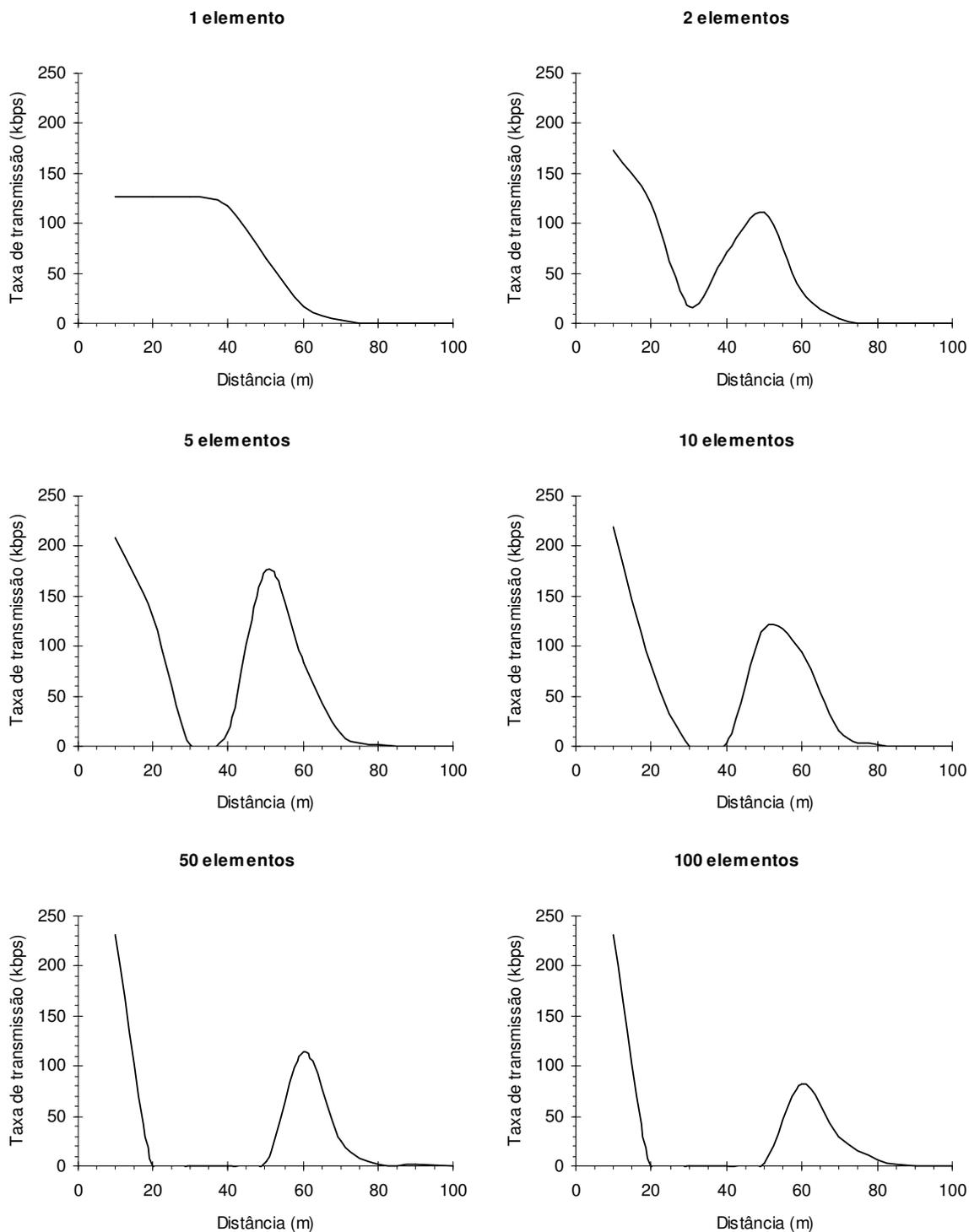


Figura 40. Gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenador para o Cenário 1 variando a quantidade de elementos.

A Figura 41 mostra os gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenador para o Cenário 2, variando a quantidade de elementos.

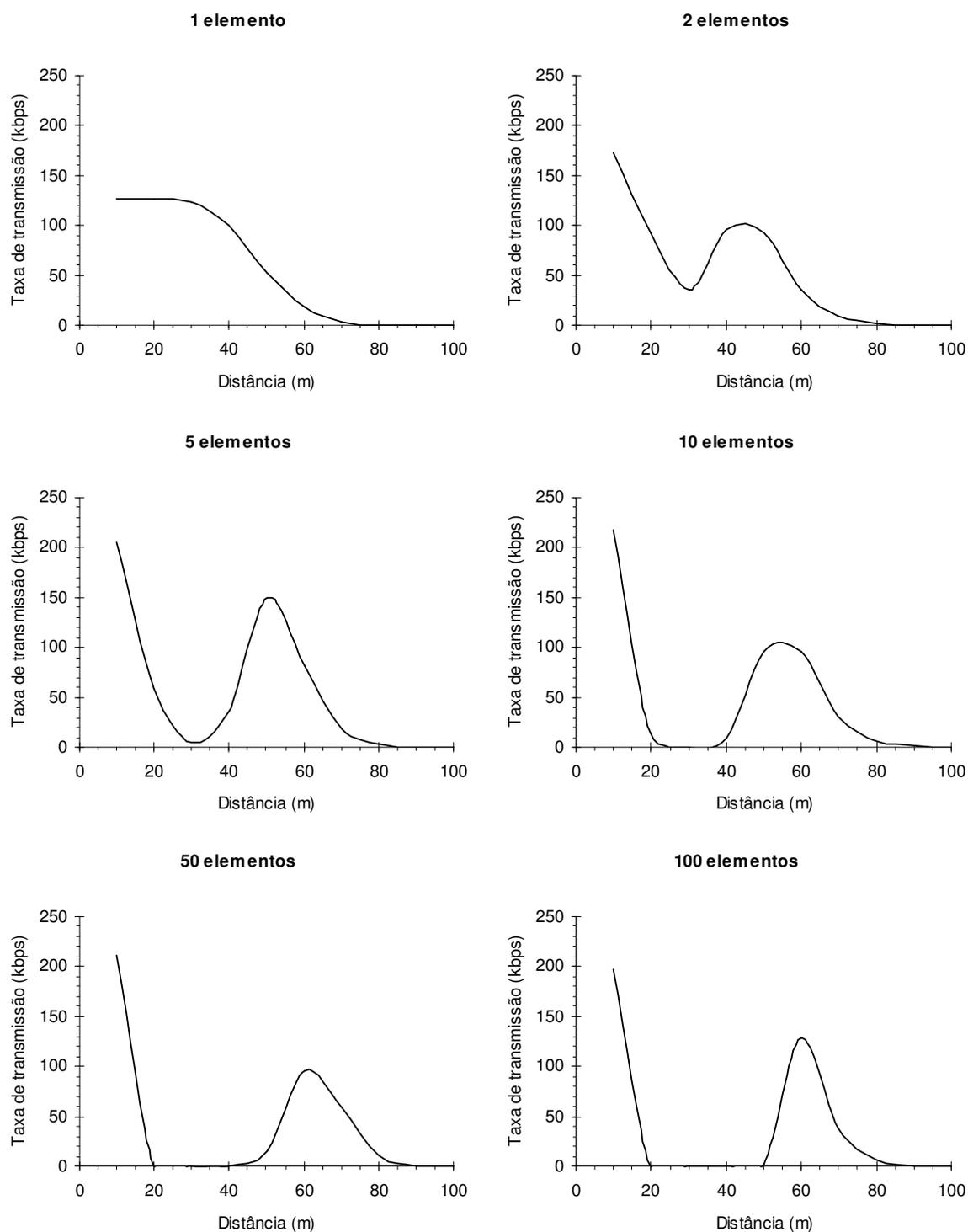


Figura 41. Gráficos da taxa de transmissão pela distância dos elementos em relação ao coordenador para o Cenário 2 variando a quantidade de elementos.

A porcentagem de colisão para o Cenário 1 de acordo com a distância dos elementos em relação ao coordenador pode ser melhor analisada na Figura 42.

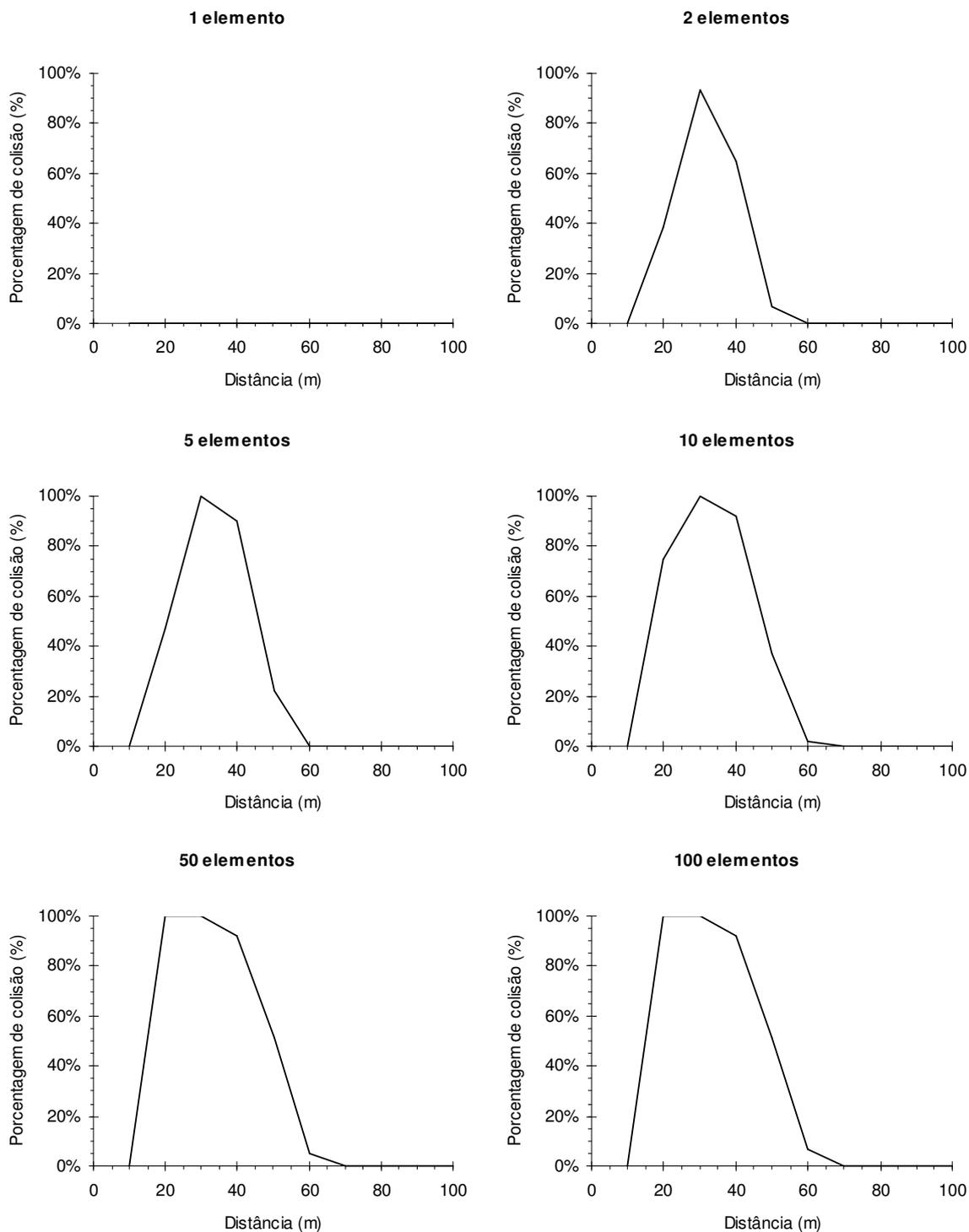


Figura 42. Gráficos da porcentagem de colisão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 1, variando a quantidade de elementos.

Em relação à porcentagem de colisões, a avaliação de impacto foi a mesma do indicador de taxa de transmissão já analisada. O impacto analisado na taxa de transmissão estava diretamente ligada à variação da porcentagem de colisões entre os dois cenários. Na Figura 43 pode-se analisar o comportamento da porcentagem de colisão ao longo das distâncias para 5 e 10 elementos. Foi possível notar que, por exemplo, em 20 metros com 5 elementos, a porcentagem de colisão era de 40% para o Cenário 1 e 80% para o Cenário 2, valores que provocaram uma diminuição significativa na taxa de transmissão para o Cenário 2 como já apresentado.

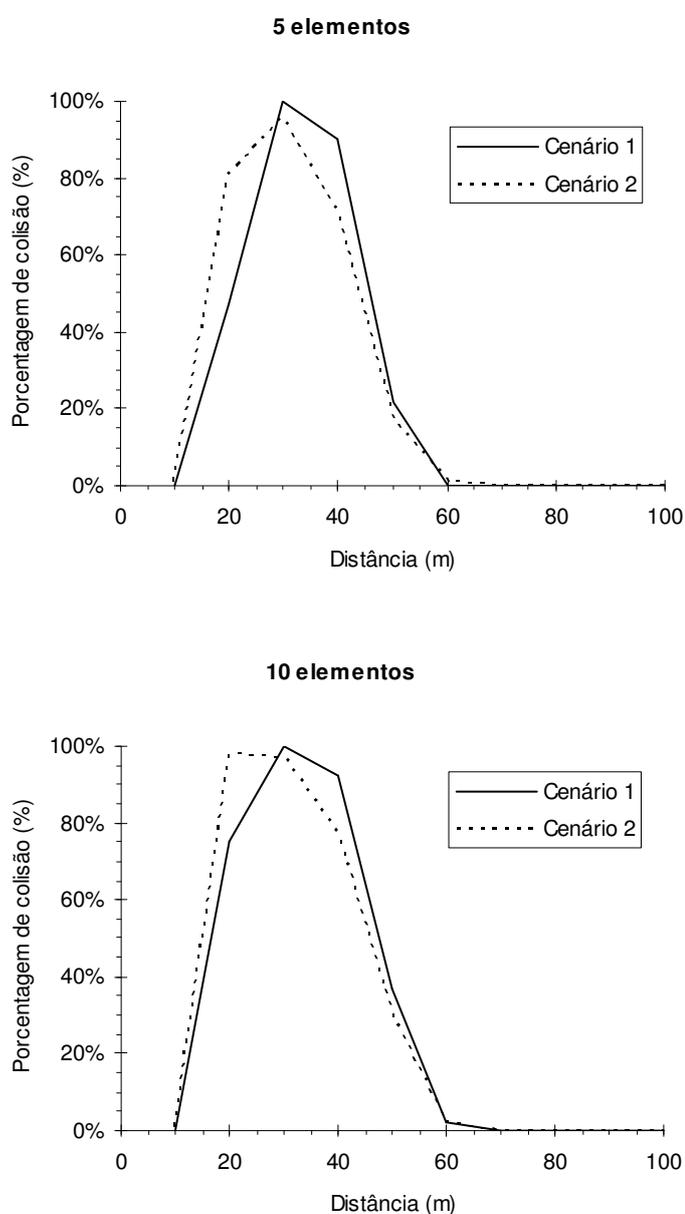


Figura 43. Gráficos da porcentagem de colisão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 1 e Cenário 2 para 5 e 10 elementos com *payload* de 55 bytes.

Para o Cenário 2, a porcentagem de pacotes errados pela distância pode ser analisada na Figura 44.

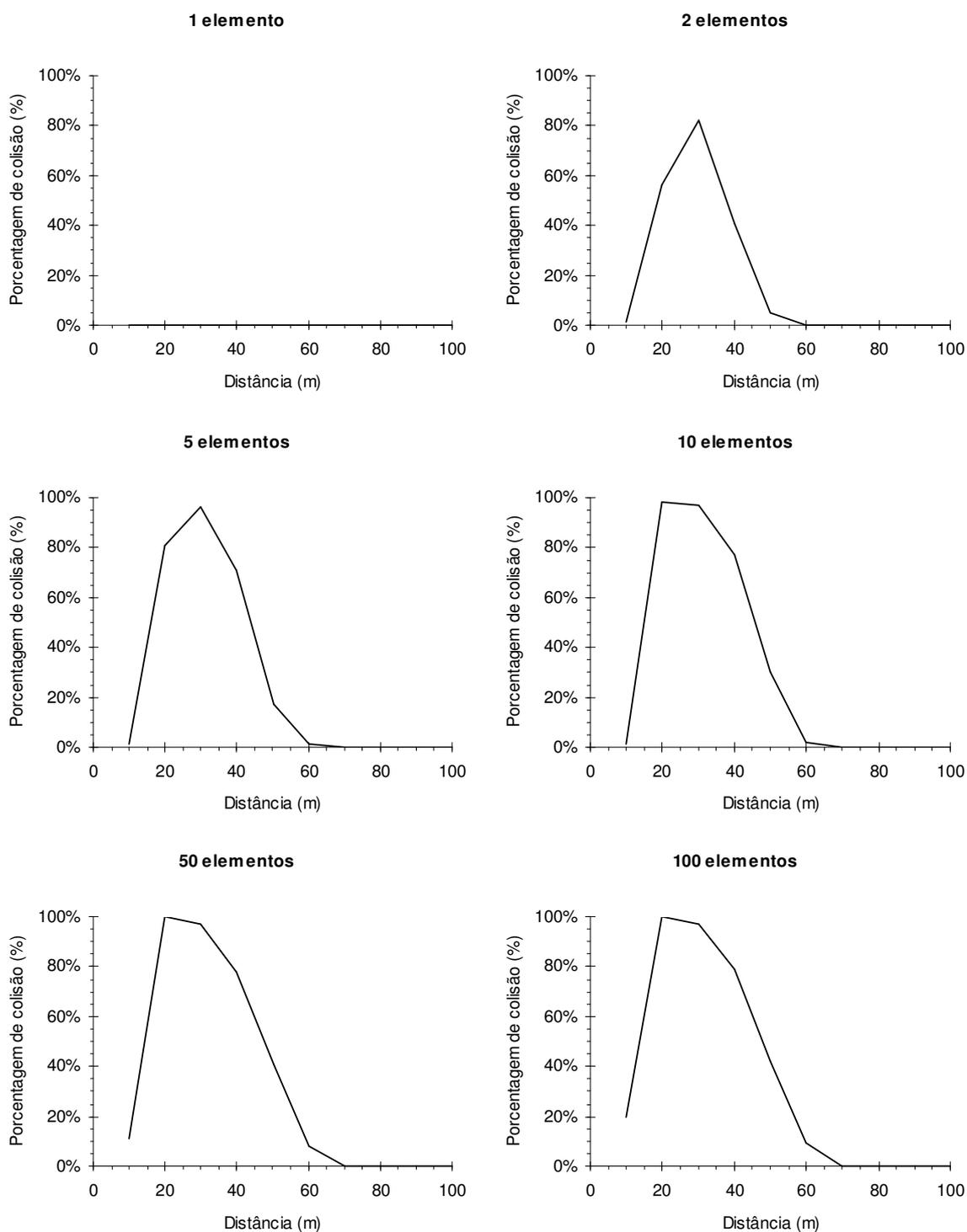


Figura 44. Gráficos da porcentagem de colisão pela distância dos elementos em relação ao coordenado para o Cenário 2, variando a quantidade de elementos.

Na Figura 45 pode ser analisada a porcentagem de pacotes recebidos errados de acordo com o número de elementos e a distância desses elementos em relação ao coordenador para os dois cenários.

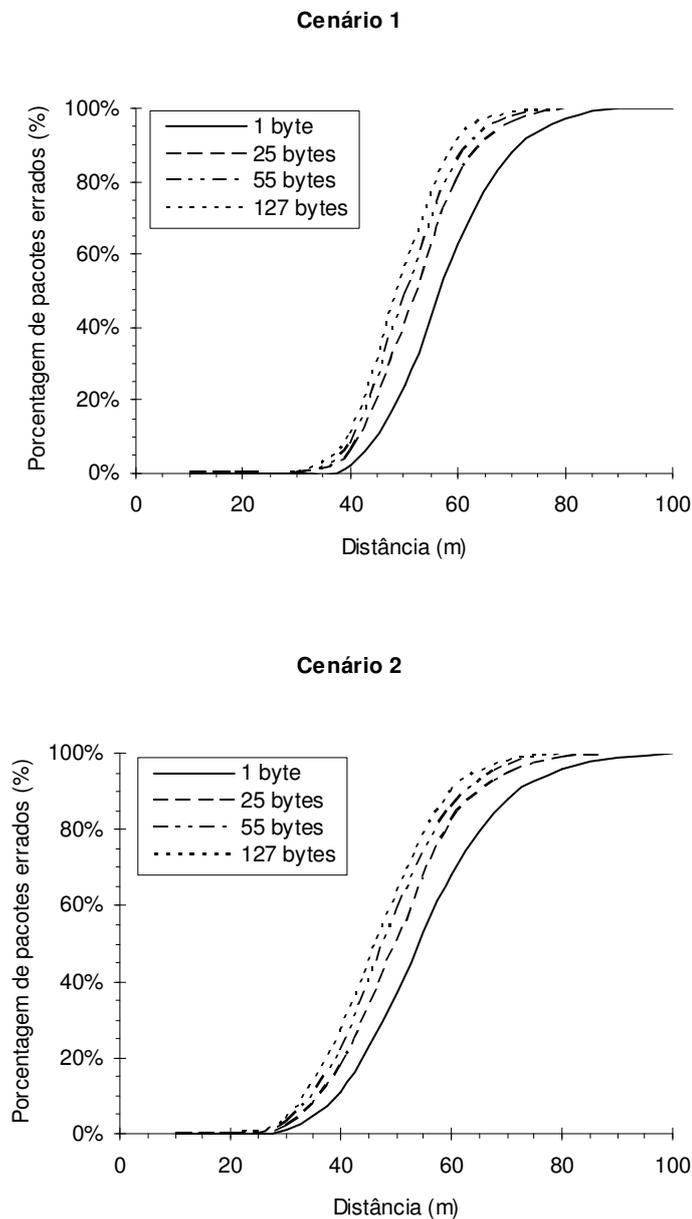


Figura 45. Gráficos da porcentagem de pacotes errados pela distância dos elementos em relação ao coordenador para o Cenário 1 e o Cenário 2, variando o tamanho do *payload*.

Este indicador de porcentagem de pacotes errados estava relacionado com a maior variação do sinal para o Cenário 2, onde os elementos tinham mobilidade, provocando uma degradação maior se comparado ao Cenário 1. Na Figura 46 vê-se

a porcentagem de erros de pacote nos dois cenários para *payload* de 55 bytes e distância variada. Foi possível notar que, por exemplo, na distância de 40 metros a porcentagem de pacotes errados no Cenário 1 foi de aproximadamente 5%. Já no Cenário 2 essa porcentagem foi de aproximadamente 20%, degradação considerável se comparada com o Cenário 1.

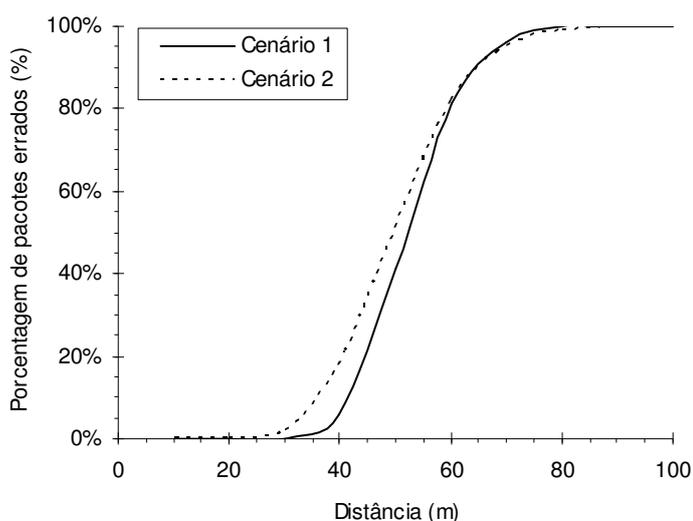


Figura 46. Gráfico da porcentagem de pacotes errados pela distância do elemento em relação ao coordenador para o Cenário 1 e o Cenário 2 com *payload* de 55 bytes para 1 elemento.

Após a análise de todos os indicadores propostos como métricas para avaliação do impacto da mobilidade de elementos em redes IEEE 802.15.4 foi possível avaliar que a mobilidade causa impacto nas comunicações de elementos da rede IEEE 802.15.4. Mas esse impacto pôde ser considerado positivo em muitas situações, como foi o caso de regiões intermediárias entre 30 e 40 metro de distância, onde no cenário com mobilidade as taxas de transmissões foram maiores. Já em regiões muito próximas do coordenador, como analisado nas regiões de 10 metros, a mobilidade não provocou impacto significativo. Isso se deve ao fato das características de modulação e tamanho de pacotes pequenos se mostrarem robustas em situações de oscilação da relação sinal-ruído acima da sensibilidade dos equipamentos.

Quando consideradas distâncias maiores, como no caso 60 metros, a rede apresentou nos cenários propostos um aumento de somente 5 kbps na taxa de transmissão para cenário com mobilidade em relação ao cenário sem mobilidade.

7 CONCLUSÕES

Nesse capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas nesse trabalho. São apresentadas também algumas sugestões de trabalhos futuros para a continuidade desse trabalho.

7.1 Principais Resultados e Contribuições

O objetivo principal desse trabalho foi à investigação do impacto da mobilidade de elementos nas redes IEEE 802.15.4 através do desenvolvimento de uma plataforma de simulação.

No Capítulo 2 foi detalhada a rede de sensor sem fio, mostrando aonde esse tipo de rede vem sendo utilizado e quais as características dos elementos que formam a rede de sensores sem fio. Foi detalhada também a estrutura da rede de sensores sem fio, comparando com outras redes sem fio.

No Capítulo 3 foi detalhado o padrão de rede IEEE 802.15.4 definido pelo IEEE como referência para a implementação de redes de sensores sem fio. Foi detalhada toda a estrutura de protocolo definida no padrão, mostrando o papel da camada PHY e da subcamada MAC. Foi detalhada também a estrutura, topologia, tipo de comunicação e estrutura dos dados definida no padrão e que embasaram a construção da plataforma de simulação desenvolvida para esse trabalho.

Foi visto ainda o desempenho das redes IEEE 802.15.4 em comparação com outros padrões de rede sem fio, mostrando as características que diferenciam as redes IEEE 802.15.4 dos outros padrões de rede.

No Capítulo 4 foi apresentados os modelos de propagação e analisado o efeito da mobilidade de elementos dentro de redes de comunicação sem fio. Foi analisado o desvanecimento do sinal ao longo das distância utilizando formas clássicas de

análise da atenuação do sinal. Também foi analisada a instabilidade do sinal causada pela movimentação aleatória de pessoas, objetos e do próprio elemento. Por último nesse capítulo, foi analisada a degradação de desempenho causada pela mobilidade nas redes sem fio, mostrando como é o comportamento da taxa de erro de acordo com as características de mobilidade.

No Capítulo 5 foi apresentada a plataforma de simulação desenvolvida para analisar o impacto da mobilidade. Apesar de existir alguns simuladores de redes IEEE 802.15.4, foi visto que a adaptação desses simuladores para análise do impacto da mobilidade era complexa e dispendiosa. Toda a plataforma foi apresentada e detalhada para mostrar como ela funciona e como definir um ambiente de teste para simulação.

Por fim, no Capítulo 6 foram apresentados os resultados analisados em dois cenários de teste, um cenário sem mobilidade e outro com mobilidade. Foram apresentados os gráficos encontrados para ambos os cenários.

Observou-se que o impacto da mobilidade nem sempre é negativo. Em alguns casos o impacto é positivo, provocando aumento da taxa de transmissão em decorrência da variação do sinal ao longo da transmissão.

É interessante notar que para ambientes em que os elementos estão próximos uns dos outros, em um raio menor que 20 metros como notado nas simulações, a mobilidade não causa impacto na performance da rede. Em regiões de meia distância, como por volta de 30 metros notado nas simulações, a mobilidade provoca um aumento da taxa de transmissão da rede. Em longas distâncias, como no caso das simulações acima de 60 metros, o impacto é pequeno, uma vez que nessas regiões a taxa de transmissão já está bastante comprometida por causa da degradação da distância.

A partir desse trabalho, foi gerada a plataforma de simulação que pode ser utilizada para futuras análises e avaliação de cenários mais complexos. A plataforma de simulação foi uma das maiores contribuições desse trabalho, uma vez que foi

desenvolvida de uma maneira que pôde avaliar cenários e características das mais diversas possíveis.

Pelo trabalho causado pelo desenvolvimento da plataforma de simulação, esse trabalho não pôde contar com análises melhores trabalhadas do impacto da mobilidade em cenários complexos. A avaliação foi feita com base em cenários que fossem simples as comparações de uma rede sem mobilidade e uma rede com mobilidade.

Assim, a contribuição desse trabalho foi fundamental na análise de um ambiente complexo causado pela mobilidade e que até então não havia grandes contribuições na literatura de redes de sensores sem fio.

7.2 Trabalhos Futuros

As seguintes questões foram identificadas como possibilidade para a continuidade desse trabalho:

- Análise do impacto da mobilidade em cenários de mobilidade mais complexas, como cenários de mobilidade de pessoas ou de vias públicas;
- Análise do impacto das alterações dos valores padrão para atributos da MAC, como *aMaxSIFSFrameSize*, *macMinSIFSPeriod* e *macMinLIFSPeriod*, todos relacionados como os tempos IFS definido no padrão;
- Alteração da plataforma para a banda de frequência de 900 MHz e modulação O-QPSK;
- Verificação de outras distribuições para descrever o comportamento do sinal causado pela mobilidade;

- Análise do atraso nas transmissões causado pelas possíveis retransmissões causadas pela mobilidade;
- Averiguação da utilização de ACK para análise de performance e impacto da mobilidade;

8 REFERÊNCIAS

ADAMS, J.T. An Introduction to IEEE STD 802.15.4. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2006, Big Sky – MT, 2006, 8p.

ALNUAIMI, M.; SHUAIB, K.; JAWHAR, I. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 Physical Layer Using MatLab/Simulink. In: INNOVATIONS IN INFORMATION TECHNOLOGY, 2006, p.1-5.

CAVERS, J.K. *Mobile Channel Characteristics*. USA: Kluwer Academic Publishers, 2002. 226p.

CHENG, L.; ZANG, X.; BOURGEOIS, A.G. IEEE 802.15.4 Simulation Module in Network Simulator GTNetS. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006. v.3.p.1308-1312.

CHONG, C.; KUMAR, S.P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE, 2003. v.91.n.8.p.1247-1256.

FREESCALE. Freescale's 802.15.4 Compliant MAC. Disponível em: <<http://www.freescale.com/zigbee>>. Acesso em: 09 nov. 2008.

GMSF. Generic Mobility Simulation Framework. Disponível em <<http://polar9.ethz.ch/gmsf>>. Acesso em: 09 nov. 2008.

IEEE Std.802.15.4. *IEEE Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE. 2006.

LATRÉ, B.; DE MIL, P.; MOERMAN, I.; DHOEDT, B.; DEMEESTER, P.; DIERDONCK, N.V. Throughput and Delay Analysis of Unslotted IEEE 802.15.4. In: JOURNAL OF NETWORKS, 2006. v.1.n.1.p.20-28.

LAW, A. M.; KELTON, D. M. *Simulation modeling and analysis*. McGraw Hill, 1991.

LEE, J. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks. IEEE TRANSACTIONS ON CONSUMER ELECTRONICS, 2006. v.52.n.3.p.742-749.

LINO, F. Caracterização da distribuição de Weibull em ambientes indoor. 2008. 79f. Dissertação (Mestrado profissional em Gestão de redes Telecomunicações) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2008.

MYOUNG, K.; SHIN, S.Y.; PARK, H.; KWON, W.H. IEEE 802.11b Performance Analysis in the Presence of IEEE 802.15.4 Interference. In: IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS AND SERIES B, 2007. v.90.n.1.p.176-179.

NS. Network Simulator. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>>. Acesso em: 09 nov. 2008.

PANG, A.C.; TSENG, H. Dynamic Backoff for Wireless Personal Networks. In: GLOBAL TELECOMMUNICATIONS CONFERENCE, 2004. v.3.p.1580-1584.

RAPPAPORT, T. S. *Wireless communications: principles and practice*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 641p.

SANTI, P. *Topology Control in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks*. Itália: Wiley, 2005. 280p.

SCILAB. Scilab. Disponível em: <<http://www.scilab.org/>>. Acesso em: 09 nov. 2008.

SIKORA, A.; GROZA, V.F. Coexistence of IEEE802.15.4 with other Systems in the 2.4 GHz-ISM-Band. In: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2005. v.3.p.1786-1791.

SOHRABY, K.; MINOLI, D.; ZNATI, T. *WIRELESS SENSOR NETWORKS Technology, Protocols, and Applications*. New Jersey: Wiley, 2007. 328p.

SUN, T.; CHEN, L.; HAN, C.; YANG, G.; GERLA, M. Measuring Effective Capacity of IEEE 802.15.4 Beaconless Mode. In: WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKING CONFERENCE, 2006. v.1.p.493-498.

TEXAS Instruments. CC2430 System-on-Chip Solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4. Disponível em: <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2430.html>>. Acesso em: 09 nov. 2008.

TIMMONS, N.F.; SCANLON, W.G. Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking. In: SENSOR AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 2004. p.16-24.

YACOUB, M. D. *Foundations of mobile radio engineering*. São Paulo: CRC Press, 1993. 496p.

YOON, D.G.; SHIN, S.Y.; KNOW, W.H. Packet Error Rate Analysis of IEEE 802.11b under IEEE 802.15.4 Interference. In: VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2006.

ZIGBEE. ZigBee Alliance. *ZigBee Specification Version 1.0*, 2004.

APÊNDICE A – CÓDIGO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO

Aqui é apresentado o código da plataforma de simulação desenvolvida nesse trabalho para avaliação do impacto da mobilidade de elementos nas redes IEEE 802.15.4. O código é baseado em scripts para serem executados no software *Scilab* 4.1.2.

```
//-----
//
// Plataforma de simulação da rede IEEE 802.15.4
//
// Autor: Luís Fabiano da Silva
// Email: luis.fabiano@gmail.com
// Nome do arquivo: PlataformaSimulacaoIEEE802154.sci
//
//-----

//-----
// Inicio das definicoes de funcoes.
//-----

// -----
//                               Funcao Tempo Transmissão
// -----
// Funcao responsável por determinar quanto tempo será
// gasto para transmitir um pacote de tamanho definido.
// Retorna um valor representando o tempo em segundos.
// -----
function y=TempoTransmissao(phyDataUnit)

    y = ((phyDataUnit/4)*symbolPeriod); // segundos

endfunction;

// -----
//                               Funcao Potencia Recebida Shadowing
// -----
// Funcao responsável por determinar qual o nível de
// potencia recebida de acordo com a fórmula de Shadowing.
// Retorna um valor representando a potencia (dBm).
// -----
function y = PotenciaRxShadowing(ptx, distancia, betaShadowing)

    potenciaTx = ptx; // dBm
    ganhoTx = 0; // dB
    ganhoRx = 0; // dB
    frequencia = 2400000000;
    b = betaShadowing; // beta

    // Somar o desvio padrão
    // Media 0 e desvio padrao 2
    x = grand(1,1, 'nor', 0, 2);
```

```

    resultado = potenciaTx + ganhoTx + ganhoRx - 20*log10(4*pi) +
    20*log10((3*10^8)/frequencia);

    if (distancia > 0) then
        y = resultado - 10*b*log10(distancia) + x; // dBm
    else
        y = resultado + x; // dBm
    end;

endfunction;

// -----
//                               Funcao Potencia Recebida
// -----
// Funcao responsável por determinar qual o nível de
// potencia recebida de acordo com a fórmula de Shadowing e
// com a distribuição de Weibull.
// Retorna um valor representando a potencia (dBm).
// -----
function y = PotenciaRecebida(ptx, distancia, betaShadowing, alphaWeibull,
betaWeibull)

    // Calcular primeiro a potencia de acordo com Shadowing
    prx = PotenciaRxShadowing(ptx,distancia,betaShadowing);

    // Se os parametros de Weibull forem zero ignorar Weibull
    // significa que o elemento não está se movendo
    if (alphaWeibull > 0 & betaWeibull > 0) then
        // Considerar weibull
        // Potencia em watts
        ptxW = 10^(prx/10)*1e-3; // em miliWatts

        // Considerando impedancia
        imp = 1; // impedancia de 1 ohm

        // Tensao
        tensao = sqrt(ptxW*imp);

        // Fator Weibull
        weibull=DistribuicaoWeibull(1,1,alphaWeibull,betaWeibull);

        // Somar a tensao com o fator de weibull
        mmV = tensao * weibull;
        // Encontrar a potencia (potencia = tensao^2)
        pV = mmV^2;
        // Passar para dBm
        pdBm = 10*log10(pV/1e-3); // em dBm

        y = pdBm;
    else
        y = prx;
    end;

endfunction;

// -----
//                               Funcao Distribuicao Weibull
// -----
// Funcao responsável por determinar um valor de acordo
// com a distribuição de Weibull.
// Retorna um valor representando adimensional.

```

```

// -----
function [y]=DistribuicaoWeibull(m,n,a,b)

    y=rand(m,n,'uniform');
    y= (b*( - log(1-y)))^(1/a);

endfunction

// -----
//                               Funcao Fatorial
// -----
// Funcao responsável por determinar o fatorial de um valor.
// Retorna um valor representando o fatorial de n.
// -----
function y = Fatorial(n)
    p = 1;
    for i=n:-1:2
        p = p*i;
    end;
    y=p;
endfunction;

// -----
//                               Funcao BER
// -----
// Funcao responsável por determinar a taxa de erro de bit
// da IEEE 802.15.4 considerando a relação sinal ruído
// passada como parametro.
// Retorna um valor representando o BER.
// -----
function y = FuncaoBER(snr)

    sinr=10^(snr/10);

    somatoria=0;

    for k=2:16
        a=20*sinr*((1/k)-1)
        b=exp(a)
        c=(Fatorial(16)/(Fatorial(k)*Fatorial(16-k)))*b
        somatoria=somatoria + ((-1)^k)*c
    end

    y=(8/15)*(1/16)*somatoria;

endfunction

// -----
//                               Funcao PER
// -----
// Funcao responsável por determinar a taxa de erro de
// pacote da IEEE 802.15.4 considerando a relação sinal
// ruído passada como parametro.
// Retorna um valor representando o BER.
// -----
function y = FuncaoPER(snr, bytes)

    y=1-(1-FuncaoBER(snr))^(bytes*8);

endfunction

```

```

// -----
//                               Funcao Escolher BE
// -----
// Funcao responsável por selecionar um valor para a
// janela de backoff.
// Retorna um valor representando o tempo em segundos.
// -----
function y=EscolherBE(valorBE)

    y          =          grand(1,1,'uin',0,(2^valorBE
1)).*(aUnitBackoffPeriod*symbolPeriod);

endfunction;

// -----
//                               Funcao Fazer CCA
// -----
// Funcao responsável por verificar se outra transmissao
// esta sendo feito no mesmo tempo que a transmissao que se
// pretende fazer.
// Retorna 0 ou 1, 0 se já existe outra transmissao e 1 se
// nao existe nenhuma transmissao.
// -----
function    y=FazerCCA(tempo,        posicaoX,        posicaoY,        potenciaTx,
fatorBetaShadowing, fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull)

    global pacotesTransmitidos;

    // Considerar a sensibilidade do equipamento
    sensibilidadeEquipamento = -90; //dBm

    // Condição inicial nao tem colisao
    verificarCCA = 1;
    colisao = 0;

    // calcular o tempo final do CCA
    tempoFinal = tempo + (slotCCA*symbolPeriod);

    // Encontrar os pacotes que colidem com essa transmissao
    // Pacotes que comecam durante o CCA, terminam durante ou que estao sendo
    transmitidos durante o CCA.
    indicePacotes = find(((pacotesTransmitidos(:,1) > 0) &
pacotesTransmitidos(:,1)>=tempo)&(pacotesTransmitidos(:,1)<=tempoFinal)) |
((pacotesTransmitidos(:,2)>=tempo)&(pacotesTransmitidos(:,2)<=tempoFinal))
|
((pacotesTransmitidos(:,1)<=tempo)&(pacotesTransmitidos(:,2)>=tempoFinal)))

    // Percorrer todos os pacotes já transmitidos
    // para verificar se existe colisao
    for(j=1:size(indicePacotes,2))

        i = indicePacotes(j);

        // Pegar o tempo de inicio e fim da transmissao
        transmissaoInicio = pacotesTransmitidos(i,1);
        transmissaoFim = pacotesTransmitidos(i,2);

        // Caso o tempo seja zero significa que a posicao esta vazia no vetor
        if ((transmissaoInicio == 0) & (transmissaoFim == 0)) then

```

```

    break;
end;

// Verificar se o elemento que esta transmitindo consegue 'escutar'
essa transmissao
// verificando a potencia recebida no ponto pretendido

// Posicao de transmissao
xTransmissao = pacotesTransmitidos(i,5);
yTransmissao = pacotesTransmitidos(i,6);

// Potencia transmitida
ptxTransmissao = pacotesTransmitidos(i,7);

diffX = max(xTransmissao, posicaoX) - min(xTransmissao, posicaoX);
diffY = max(yTransmissao, posicaoY) - min(yTransmissao, posicaoY);

// Calcular a distância entre os elementos
distancia = 0;
if (diffX == 0) then
    distancia = diffY;
elseif (diffY == 0) then
    distancia = diffX;
else
    distancia = sqrt(diffX^2 + diffY^2);
end;

// Calcular a potencia recebida para essa distancia com essas
caracteristicas
prx = PotenciaRecebida(ptxTransmissao, distancia, fatorBetaShadowing,
fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull);

// Verificar se o equipamento pode entender essa potencia como um sinal
valido
if (prx >= sensibilidadeEquipamento) then
    // Transmissao nao pode ser realizada
    verificarCCA = 0;
else
    // Verificar se a transmissao do elemento que
    // pretende transmitir pode atrapalhar esse pacote.

    // Calcular a distancia em relacao ao coordenador

    diffX = max(0, posicaoX) - min(0, posicaoX);
    diffY = max(0, posicaoY) - min(0, posicaoY);

    // Calcular a distância entre os elementos
    distanciaCoordenador = 0;
    if (diffX == 0) then
        distanciaCoordenador = diffY;
    elseif (diffY == 0) then
        distanciaCoordenador = diffX;
    else
        distanciaCoordenador = sqrt(diffX^2 + diffY^2);
    end;

    // Calcular a potencia recebida para essa distancia com essas
    caracteristicas
    prxCoordenador = PotenciaRecebida(ptxTransmissao,
    distanciaCoordenador, fatorBetaShadowing, fatorAlphaWeibull,
    fatorBetaWeibull);

```

```

// Verificar se essa potencia está acima da sensibilidade
if (prxCoordenador >= sensibilidadeEquipamento) then
    // Se estiver acima significa que essa transmissao pode atrapalhar
a outra
    // justificando a colisao.

    // Mas tenho que verificar se a potencia dessa transmissao no
    // coordenador é entendida também
    if (pacotesTransmitidos(i,12) >= sensibilidadeEquipamento) then
        // Colisao!!!
        // A transmissao nao poderia ocorrer mas vai acontecer devido
        // as caracteristicas de propagação.
        verificarCCA = 2;
        colisao = 1;
        // Modificar a matriz para indicar colisao
        pacotesTransmitidos(i,11) = 2; // Nao sucesso, colisao
        end;

    else
        // Nao pode ser considerado colisao porque a potencia no
coordenador é muito baixa
        end;

    end;

end;

if (colisao == 1) then
    verificarCCA = 2;
end;

y = verificarCCA;

endfunction;

// -----
//          Funcao Registrar Transmissao
// -----
// Funcao responsável por registrar a transmissao efetuada.
// -----
function y=RegistrarTransmissao(tempoInicial, tempoFinal, phyPayload,
indiceElemento, posicaoX, posicaoY, potenciaTx, fatorBetaShadowing,
fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull, colisao, valorBE, contadorTentativa)

    global pacotesTransmitidos;

    global numeroPacotesTx;

    numeroPacotesTx = numeroPacotesTx + 1;

    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,1) = tempoInicial;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,2) = tempoFinal;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,3) = phyPayload;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,4) = indiceElemento;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,5) = posicaoX;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,6) = posicaoY;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,7) = potenciaTx;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,8) = fatorBetaShadowing;
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,9) = fatorAlphaWeibull;

```

```

pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,10) = fatorBetaWeibull;
pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,11) = 1; // sucesso

if (colisao == 1) then
  pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,11) = 2;
end;

// Considerar a posicao do receptor (coordenador) e considerar
// o BER para verificar se essa transmissao foi ou nao recebida.

diffX = max(posicaoX, 0) - min(posicaoX, 0);
diffY = max(posicaoY, 0) - min(posicaoY, 0);

// Calcular a distância entre o elemento e o coordenador (0,0)
distancia = 0;
if (diffX == 0) then
  distancia = diffY;
elseif (diffY == 0) then
  distancia = diffX;
else
  distancia = sqrt(diffX^2 + diffY^2);
end;

// Calcular a potencia recebida para essa distancia com essas
caracteristicas
prx = PotenciaRecebida(potenciaTx, distancia, fatorBetaShadowing,
fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull);

pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,12) = prx; // Potencia recebida no
coordenador

// Considerar o ruído fixo
ruído = -90 // dBm

// Calculando o per de acordo com o tamanho da transmissao
per = FuncaoPER((prx - ruído), (phyPayload + phyHeader));

if (per > 0) then

  // Escolher um número aleatorio como forma de escolher um pacote errado
  aleatorio = rand(1,1,'uniform') .* (1/per);

  // Verificar se esse numero eh (1/per)/2, isto eh, a metade do
  intervalo
  if (ceil(aleatorio(1)) == ceil((1/per)/2)) then
    // Ocorreu um erro na recepção no coordenador considerando o BER
    pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,11) = 3; // Erro considerando BER
  end;

end;

pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,13) = valorBE;
pacotesTransmitidos(numeroPacotesTx,14) = contadorTentativa;

y = 1;

endfunction;
//-----
// Termina das definicoes de funcoes.
//-----

```

```

// -----
// Variaveis IEEE 802.15.4
// -----

// Valores minimo e maximo para BE
macMinBE = 3;
macMaxBE = 5;

// Numero maximo de tentativas de CSMA
macMaxCSMABackoffs = 4; // tentativas

// Unidade de backoff
aUnitBackoffPeriod = 20; // simbolos

// Tempo de espera depois do ACK
aTurnaroundTime = 12; // simbolos

// Tamanho máximo para um Short Frame
aMaxSIFSFrameSize = 18; // bytes do MPDU = payload da camada phy

// Tempo de SIFS
macMinSIFSPeriod = 12; // simbolos

// Tempo de LIFS
macMinLIFSPeriod = 40; // simbolos

// Tempo de um simbolo
symbolPeriod = 16e-6; // segundos

// Cabeçalho da camada fisica
phyHeader = 6; // bytes

// Payload do ACK
phyPayloadAck = 5; //bytes

// Tamanho de um ACK
phyDataUnitAck = (phyHeader + phyPayloadAck) * 8; // bits

// Tempo de duracao de um CCA
slotCCA = 8; // simbolos

// -----
//// Criar matriz global para a lista de pacotes a ser transmitidos
//// junto com cada pacote devera haver informacoes de equipamento,
//// tamanho, tempo em relacao ao anterior, potencia transmissao,
//// posicao X, posicao Y, fator Beta (Shadowing),
//// fator Alpha(Weibull), fator Beta(Weibull)
//
//// Considerar uma matriz de tamanho m,n onde m é igual ao número
//// de pacotes e n é 9 (número de propriedades de cada pacote).
////global pacotesTransmitir;

// Considerar uma matriz de tamanho m,n onde m é igual ao número
// de pacotes e n é 14 (propriedade de cada pacote =
// 1-tempo inicial
// 2-tempo final
// 3-tamanho
// 4-elemento
// 5-posicao x
// 6-posicao y
// 7-potencia transmitida

```

```

// 8-fatorBetaShadowing
// 9-fatorAlphaWeibull
// 10-fatorBetaWeibull
// 11-sucesso
// 12-potencia recebida no coordenador
// 13-valor do BE utilizado
// 14-contador de tentativa de cada elemento).
global pacotesTransmitidos;

// Numero de pacotes já transmitidos
global numeroPacotesTx
//numeroPacotesTx = 0;

//// Variavel com a quantidade de elementos
//global numeroElementos;
//numeroElementos = 0;

// -----
//                               Funcao Posicao
// -----
// Funcao responsável por calcular a posicao de um elemento
// em um determinado tempo.
// Input:
//   tempo = tempo para a posição.
//   elemento = número do elemento.
//   listaPosicao = lista de matriz contendo as posições.
// Retorna uma matriz contendo a posição X e Y.
// -----
function [y]=Posicao(tempo, elemento, listaPosicao)

// Pega a matriz referente ao elemento
matrizPosicao = listaPosicao(elemento);

// Inicia as posições
posX = 0;
posY = 0;

// Verifica o tempo na matriz de posicao
for(i=1:size(matrizPosicao,1))
    if ((matrizPosicao(i,1) <= tempo) & (matrizPosicao(i,2) >= tempo)) then
        // Matriz contendo uma lista de:
        // 1 - Tempo inicial
        // 2 - Tempo final
        // 3 - Posicao X inicial
        // 4 - Posicao Y inicial
        // 5 - Posicao X final
        // 6 - Posicao Y final
        tempoInicial = matrizPosicao(i,1);
        tempoFinal = matrizPosicao(i,2);

        posX1 = matrizPosicao(i,3);
        posY1 = matrizPosicao(i,4);

        posX2 = matrizPosicao(i,5);
        posY2 = matrizPosicao(i,6);

        difX = posX2 - posX1;
        difY = posY2 - posY1;

        // Calcula a posicao levando em consideracao o tempo

```

```

        posX = posX1 + (((tempo - tempoInicial)/(tempoFinal - tempoInicial))
* difX);
        posY = posY1 + (((tempo - tempoInicial)/(tempoFinal - tempoInicial))
* difY);;
        break;
        end;
    end;

// Retorna X e Y para o determinado tempo
y = [posX posY];
endfunction;
// -----
//                               Funcao Transmitir
// -----
// Funcao responsável por calcular o tempo de transmissao
// e o resultado das transmissoes dos pacotes.
// Input:
//   numeroPacotes = numero de pacotes que todos os elementos
//   vao transmitir.
//   propriedadesElementos = matriz m,n onde m é o número de
//   elementos e n é o numero de propriedades (tamanho,
//   potencia transmissao, com ou sem ack (1 ou 0)
//   intervalo entre pacotes, fator Beta (Shadowing),
//   fator Alpha(Weibull), fator Beta(Weibull).
//   posicoes = matriz e,m,n onde e é o número de elementos,
//   m é o número de pacotes e n é o número de
//   coordenadas (2,2).
// Retorna uma matriz contendo se o pacote foi enviado
// com sucesso e a potencia recebida no elemento central.
// Nesse script está sendo considerado transmissões dos elementos
// para o coordenador que está na posição 0,0.
// -----
function    [y]=TransmitirPacotes(numeroPacotes,    propriedadesElementos,
posicoes)

    global pacotesTransmitidos;

    global numeroPacotesTx;
    numeroPacotesTx = 0;

    // Numero de elementos
    numeroElementos = size(propriedadesElementos,1);

    // Vetor com o tempo de cada elemento
    tempoElemento = zeros(numeroElementos,1);

    // Criar a matriz com os pacotes a ser transmitidos
    pacotesTransmitidos = zeros(numeroPacotes,14);

    // Vetor com o BE de cada elemento
    // inicia com o macMinBE
    valoresBE = ones(numeroElementos, 1) .* macMinBE;

    // Vetor com a quantidade de tentativas
    // de transmissão de um elemento.
    valoresNB = zeros(numeroElementos, 1);

    // Vetor com o valor sequencial (contador) de pacote
    // para cada elemento.
    contadorTentativas = zeros(numeroElementos, 1);

```

```

// Escolher as primeiras transmissões
for(i=1:numeroElementos)

    // Escolher um tempo aleatorio de acordo com o BE de cada elemento
    BE = valoresBE(i);
    janelaBackoff = EscolherBE(BE); // segundos

    // Soma ao tempo que o elemento esta ligado
    tempoElemento(i) = tempoElemento(i) + janelaBackoff;

end;

// Vetor contendo o indice da posicao de cada elemento
indicePosicao = ones(numeroElementos,1);

// Escolhido o tempo do primeiro backoff de cada elemento
// executar o numero de pacotes para transmitir.
for(j=1:numeroPacotes)

    // Ordenar o vetor de tempo
    [vetorOrdenado,indices] = gsort(tempoElemento,'r','i');

    // Com o vetor ordenado, pegar o menor tempo
    // para processar a transmissao.

    indice = indices(1);
    tempo = tempoElemento(indice);

    // Propriedades do elemento que vai transmitir
    tamanhoPacote = propriedadesElementos(indice,1);
    potenciaTransmissao = propriedadesElementos(indice,2);
    intervaloPacotes = propriedadesElementos(indice,3);
    ack = propriedadesElementos(indice,4);
    fatorBetaShadowing = propriedadesElementos(indice,5);
    fatorAlphaWeibull = propriedadesElementos(indice,6);
    fatorBetaWeibull = propriedadesElementos(indice,7);

    // Incrementar contador de tentativas
    contadorTentativas(indice) = contadorTentativas(indice) + 1;

    if (typeof(posicoes) == "list") then
        // Transmissão com a posicao em uma lista

        posXY = Posicao(tempo, indice, posicoes);
        posicaoX = posXY(1);
        posicaoY = posXY(2);
    else
        // Transmissão com a posicao em uma matriz

        // Posicao que o elemento vai transmitir
        posicaoX = posicoes(indice,indicePosicao(indice),1);
        posicaoY = posicoes(indice,indicePosicao(indice),2);
    end;

    // Incrementa para pegar a proxima posicao na proxima iteracao
    indicePosicao(indice) = indicePosicao(indice) + 1;

    // Depois de esperar o tempo de backoff, o elemento
    // tem que fazer o CCA para verificar se o meio
    // está disponível por 8 simbolos.
    // 0 - meio ocupado

```

```

// 1 - pode transmitir
// 2 - colisao
verificaCCA = FazerCCA(tempo, posicaoX, posicaoY, potenciaTransmissao,
fatorBetaShadowing, fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull);

// Adicionar tempo do CCA
tempo = tempo + (slotCCA*symbolPeriod);

if (verificaCCA > 0) then
// Pode transmitir
// Calcular a transmissao do pacote

// Flag para colisao
colisao = 0;
if (verificaCCA == 2) then
    colisao = 1;
end;

// Calcular o tamanho completo do pacote a ser transmitido
phyPayload = tamanhoPacote; // bytes
phyDataUnit = (phyHeader + phyPayload) * 8; // bits

// Calcular tempo de transmissao do pacote
tempoTransmissao = TempoTransmissao(phyDataUnit); // segundos

// Adicionar informacao no vetor de transmissoes
RegistrarTransmissao(tempo, tempo + tempoTransmissao, phyPayload,
indice, posicaoX, posicaoY, potenciaTransmissao, fatorBetaShadowing,
fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull, colisao, valoresBE(indice),
contadorTentativas(indice));

if (ack == 1) then
// Se for com ack calcula tempo de transmissao do ack
// Adicionar tempo de 'Turn around time'
tempoTransmissao = tempoTransmissao + (aTurnaroundTime *
symbolPeriod) + TempoTransmissao(phyDataUnitAck);

// Adicionar informacao no vetor de transmissoes
RegistrarTransmissao((tempo + tempoTransmissao) -
TempoTransmissao(phyDataUnitAck), (tempo + tempoTransmissao),
phyDataUnitAck, indice, posicaoX, posicaoY, potenciaTransmissao,
fatorBetaShadowing, fatorAlphaWeibull, fatorBetaWeibull, colisao,
valoresBE(indice), contadorTentativas(indice));
end;

// Verificar o IFS
// Se o tamanho do pacote for considerado curto
if ( phyPayload <= aMaxSIFSFrameSize) then
// Pacote pequeno, adicionar tempo de SIFS
tempoTransmissao = tempoTransmissao + (macMinSIFSPeriod *
symbolPeriod);
else
// Pacote grande, adicionar tempo de LIFS
tempoTransmissao = tempoTransmissao + (macMinLIFSPeriod *
symbolPeriod);
end;

// Adicionar intervalo entre os pacotes (IFS) no tempo de transmissao
tempoTransmissao = tempoTransmissao + intervaloPacotes;

// Como a transmissao foi feita, reinicia o BE

```

```

valoresBE(indice) = macMinBE;

// Escolher o proximo randomico da janela de backoff
BE = valoresBE(indice);
janelaBackoff = EscolherBE(BE); // segundos

// Adicionar o tempo gasto para transmitir
// no vetor de tempo do elemento
tempoElemento(indice) = tempo + tempoTransmissao + janelaBackoff;

else
// Problemas no CCA e elemento não pode transmitir
// Aumentar o BE, até o limite de maxBE
valoresBE(indice) = min(valoresBE(indice) + 1, macMaxBE);

// Aumentar o contador de tentativas de transmissão
valoresNB(indice) = valoresNB(indice) + 1;

// Verificar se o elemento já tentou o máximo de
// tentativas permitidas.
if (valoresNB(indice) > macMaxCSMABackoffs) then
// Caso já tenha tentado, volta o BE e desiste.
valoresBE(indice) = macMinBE;
end;

// Escolher o proximo randomico da janela de backoff
BE = valoresBE(indice);
janelaBackoff = EscolherBE(BE); // segundos

// Adicionar o tempo gasto para transmitir no
// vetor de tempo do elemento
tempoElemento(indice) = tempo + janelaBackoff;

end;
end;
y = pacotesTransmitidos;
endfunction;

//-----
// Fim da plataforma de simulacao.
//-----

```

APÊNDICE B – CÓDIGO DAS SIMULAÇÕES DO CENÁRIO 1 E CENÁRIO 2

Aqui são apresentados os códigos das simulações do Cenário 1 e do Cenário 2 apresentados como resultados nesse trabalho. Esse código é dependente do código desenvolvido para a plataforma de simulação apresentado no (APÊNDICE A).

```

clearglobal(); // limpa variaveis globais
clear; // limpa variaveis

exec('PlataformaSimulacaoIEEE802154.sci');

// Funcao para calcular as posicoes ao redor de um ponto
// Parametros: ponto do meio (x,y), raio e numero de elementos
// Resultado: posicoes x,y de cada elemento
function [y]=CalcularCirculo(x, y, raio, steps)

    angle = 90;
    a = raio;
    b = raio;

    points = zeros(steps,2);

    sinbeta = sin(b);
    cosbeta = cos(b);

    count = 1;
    for (i = 0:(360/steps):360)
        alpha = i / 180 * %pi;
        sinalpha = sin(alpha);
        cosalpha = cos(alpha);

        X = x + (a * cosalpha * cosbeta - b * sinalpha * sinbeta);
        Y = y + (a * cosalpha * sinbeta + b * sinalpha * cosbeta);

        points(count, 1) = X;
        points(count, 2) = Y;

        count = count + 1;

    end;

    y = points;

endfunction;

// -----
//                               Funcao Formatar Resultado
// -----
// Funcao responsável por formatar o resultado e exibir no
// console o resumo dos testes.
// -----
function y=FormatarResultadoResumo(numeroPacotes, propriedadesElementos,
posicoes, pacotesTransmitidos, tempoMaximo)

```

```

if (tempoMaximo == 0) then
    tempoMaximo = max(pacotesTransmitidos(:,2));
else
    tempoMaximo = max(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,2) <=
50) ),2));
end;

//mean(pacotesTransmitidos(find(pacotesTransmitidos(:,2) < 50),13))
numeroElementos = size(propriedadesElementos,1);

//mprintf('\n\n----- Resultados -----
----\n');
mprintf('N;%d;', numeroElementos);

mediaRSSI = mean(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,1) > 0)
& (pacotesTransmitidos(:,2) <= tempoMaximo)),12));
mediaPayload = mean(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,1) >
0) & (pacotesTransmitidos(:,2) <= tempoMaximo) & (pacotesTransmitidos(:,11)
== 1)),3));
sucesso = size(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,1) > 0) &
(pacotesTransmitidos(:,2) <= tempoMaximo) & (pacotesTransmitidos(:,11) ==
1)),11),1);
colisoos = size(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,1) > 0) &
(pacotesTransmitidos(:,2) <= tempoMaximo) & (pacotesTransmitidos(:,11) ==
2)),11),1);
erros = size(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,1) > 0) &
(pacotesTransmitidos(:,2) <= tempoMaximo) & (pacotesTransmitidos(:,11) ==
3)),11),1);

throughput = ((mediaPayload + 6)* 8 * (sucesso + colisoos + erros)) /
tempoMaximo;
goodput = ((mediaPayload + 6)* 8 * (sucesso)) / tempoMaximo;

mprintf('R;%5.2f;', mediaRSSI);
mprintf('C;%5.2f;', (colisoos/(sucesso+colisoos+erros)));
mprintf('E;%5.2f;', (erros/(sucesso+colisoos+erros)));

mprintf('BE;%5.2f;', mean(pacotesTransmitidos(find((pacotesTransmitidos(:,1)
> 0) & (pacotesTransmitidos(:,2) <= tempoMaximo)),13)));
mprintf('Tp;%5.2f;', goodput);
mprintf('TpM;%5.2f;', (goodput/numeroElementos));

y = 0;

endfunction;

// -----
numeroPacotes = 100;
phyPayload = 50;

mprintf('\nCalculando...');

mprintf('\nD=Distancia\nN=Numero          de          Elementos\nR=Media
RSSI\nC=Colisoos\nE=Erros\nBE=Media    do    BE\nTp=Throughput    medio    da
rede\nTpM=Throughput medio por elemento\n');

// Variando o numero de elementos
for n = [1 2 5 10 20 50 100]

```

```

// Variando a distancia
for d = 10:10:100

    pos = CalcularCirculo(0,0,d,n);

    posicoes = list();

    for i=1:n
        posicoes($+1) = [0,1000,pos(i,1),pos(i,2),pos(i,1),pos(i,2)];
    end;

    mprintf('\nFixo;D=%d;', d);

    propiedadesElementos = zeros(n,7);

    propiedadesElementos(1:n,1) = phyPayload; // bytes
    propiedadesElementos(1:n,2) = 0; // dBm
    propiedadesElementos(1:n,3) = 0; // segundos
    propiedadesElementos(1:n,4) = 0; // ack
    propiedadesElementos(1:n,5) = 3; // beta
    propiedadesElementos(1:n,6) = 0; // alpha
    propiedadesElementos(1:n,7) = 0; // beta

    pacotesTransmitidos = TransmitirPacotes(numeroPacotes,
    propiedadesElementos, posicoes);

    FormatarResultadoResumo(numeroPacotes, propiedadesElementos, posicoes,
    pacotesTransmitidos, 0);

    mprintf('\nMovel;D=%d;', d);

    propiedadesElementos(1:n,1) = phyPayload; // bytes
    propiedadesElementos(1:n,2) = 0; // dBm
    propiedadesElementos(1:n,3) = 0; // segundos
    propiedadesElementos(1:n,4) = 0; // ack
    propiedadesElementos(1:n,5) = 3; // beta
    propiedadesElementos(1:n,6) = 5.33; // alpha
    propiedadesElementos(1:n,7) = 1.09; // beta

    pacotesTransmitidos = TransmitirPacotes(numeroPacotes,
    propiedadesElementos, posicoes);

    FormatarResultadoResumo(numeroPacotes, propiedadesElementos, posicoes,
    pacotesTransmitidos, 0);

    end;

end;

```

ANEXO C – PROBABILIDADE DE ERRO DE PACOTE

Para calcular a probabilidade de erro de pacote deve ser considerado a probabilidade de erro de bit. Esta probabilidade de erro de bit depende do canal. Neste momento por questões de simplicidade seja um pacote de dois bits. Assim, temos:

Bit 1	Bit 2
-------	-------

A probabilidade de um bit estar errado é P_b . Para esta análise, no caso geral é considerado AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

Para esta análise precisamos interpretar a relação entre as probabilidades de estar errado ou certo dos bits que compõem o bit. Analisando o pacote, a probabilidade de ocorrência de um erro em um bit não afeta a probabilidade de estar certo ou errado o outro bit. Ou seja, a probabilidade do pacote estar errado é a soma das probabilidades de um dos dois bits estar errado ou dos dois bits estarem errados. Já o cálculo da probabilidade de um bit estar errado e o outro certo é a multiplicação das probabilidades uma vez que estamos dizendo que um está certo e outro errado.

Assim, para calcular a probabilidade de erro de pacote temos que avaliar todas as condições que leve a ter o pacote errado. Esta é a condição onde um dos dois bits estar errado, como mostrado na tabela abaixo.

Bit 1	Bit 2	Prob
Errado P_b	Certo $(1 - P_b)$	$P_b(1 - P_b)$
Certo $(1 - P_b)$	Errado P_b	$(1 - P_b)P_b$
Errado P_b	Errado P_b	P_bP_b

A probabilidade do pacote estar errado será a probabilidade de cada uma das condições da tabela acima somadas, pois são condições independentes. Cada condição é a multiplicação das probabilidades que são dependentes.

A probabilidade de erro de pacote será portanto:

$$P_f = P_b(1 - P_b) + P_b(1 - P_b) + P_b P_b$$

Trabalhando esta expressão:

$$P_f = 2P_b - P_b^2 = 1 - (1 - P_b)^2$$

Outra forma de analisar seria considerar as condições de não existir erro.

Bit 1	Bit 2	Prob
Certo $(1 - P_b)$	Certo $(1 - P_b)$	$(1 - P_b)^2$

Ou seja, a probabilidade de ocorrer erro será uma condição somente:

$$P_f = 1 - (1 - P_b)^2$$

Para os pacotes com L bits teremos a probabilidade de erro de pacote dado por:

$$P_f = 1 - (1 - P_b)^L$$