

MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE WANDENKOLK

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO DE
SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÕES

1º Ten LUIZ GUILHERME ALMEIDA RAMALHO BARBOSA



ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA LTE NOS
SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DOS NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

Rio de Janeiro

2020

1º Ten LUIZ GUILHERME ALMEIDA RAMALHO BARBOSA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA LTE NOS
SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DOS NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Wandenkolk como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento
Avançado de Segurança da Informação e
Comunicações.

Orientadores:

CF (EN) José Francisco de Andrade Junior
Carlos Vinício Rodríguez Ron, D. Sc.

CIAW

Rio de Janeiro

2020

Barbosa, Luiz Guilherme Almeida Ramalho.

Análise da viabilidade de implementação da tecnologia LTE nos sistemas de comunicação dos navios da Marinha do Brasil / Luiz Guilherme Almeida Ramalho Barbosa. – Rio de Janeiro, 2020.

85f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Vinício Rodríguez Ron;
CF(EN) José Francisco de Andrade Junior.

Monografia (Curso de Aperfeiçoamento Avançado de Segurança da Informação e Comunicações) – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2020.

1. LTE. 2. 3GPP. 3. Comunicações sem fio. 4. Comunicações navais. 5. Radio Mobile. I. Centro de Instrução Almirante Wandenkolk. II. Título.

1º Ten LUIZ GUILHERME ALMEIDA RAMALHO BARBOSA

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA LTE NOS
SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DOS NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Wandenkolk como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento
Avançado de Segurança da Informação e
Comunicações.

Aprovada em ____ de _____ de _____.

Banca Examinadora:

CMG (RM1-EN) Gian Karlo Huback Macedo de Almeida – CIAW

CF (EN) José Francisco de Andrade Junior – DCTIM

Carlos Vinício Rodríguez Ron, D. Sc. – PUC Rio

CIAW

Rio de Janeiro

2020

Dedico este trabalho à minha esposa Amanda Ramalho, por todo amor, carinho e apoio que foi dado a mim ao longo do Curso de Aperfeiçoamento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo, pelo seu imenso amor para com a minha vida e pelo seu sustento a cada dia. A Ele agradeço por me guiar durante esta jornada e pelas vitórias concedidas até aqui.

À minha família por todo incentivo e força que me deram no decorrer desta trajetória. Agradeço ainda por sempre me apoiarem e pela compreensão em momentos difíceis ao longo da minha carreira.

Agradeço aos meus orientadores, CF (EN) José Francisco de Andrade Junior e Prof. Dr. Carlos Vinício Rodríguez Ron, pelo comprometimento e pela dedicação na orientação deste trabalho e por partilharem comigo seus conhecimentos e competências para elaboração do presente estudo.

Ao coordenador do Curso de Aperfeiçoamento Avançado de Segurança da Informação e Comunicações, CMG (RM1-EN) Gian Karlo Huback Macedo de Almeida, pelo apoio e atenção concedidos ao longo de todo o curso, contribuindo de forma significativa para a formação profissional da turma de SIC.

ANÁLISE DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA LTE NOS SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO DOS NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

RESUMO

As comunicações têm papel imprescindível para uma Força Naval em operação. Elas permitem que as informações fluam de maneira rápida, segura e confiável entre as unidades, possibilitando o cumprimento da missão. No entanto para que sejam eficientes, as redes de comunicação devem possuir alta capacidade de transferência de dados e garantir o fluxo seguro das informações, de forma a proporcionar um melhor desempenho da atividade de Comando e Controle (C²). Para isso, é fundamental que os sistemas de comunicações acompanhem as novas tecnologias presentes no cenário atual das telecomunicações. Nesse sentido, a utilização da tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), padronizada pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP), se configura como uma proposta de rede de comunicação de alto desempenho, apropriada para as necessidades atuais, promovendo uma integração eficiente entre os navios. O estabelecimento de enlaces utilizando LTE possibilitaria, ainda, o compartilhamento de recursos de comunicação por satélite, permitindo acesso àqueles que não possuem tais equipamentos. Dessa forma, o presente trabalho analisará a viabilidade da implementação de redes de comunicação entre navios utilizando a tecnologia LTE, por meio da realização de cálculos de cobertura e de simulações realizadas no *Software Radio Mobile*.

Palavras- chave: LTE. 3GPP. Comunicações sem fio. Comunicações navais. *Radio Mobile*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos básicos de um sistema de comunicação	16
Figura 2 - Sistema de comunicação	17
Figura 3 - Forma da onda	18
Figura 4 - O espectro eletromagnético e suas aplicações na comunicação	18
Figura 5 - Mecanismos de propagação para as bandas VLF, LF, MF, HF e VHF.....	20
Figura 6 - Reflexão de ondas eletromagnéticas.....	22
Figura 7 - Modelo de reflexão no solo com dois raios	23
Figura 8 - Zonas de Fresnel	24
Figura 9 - Modelo de difração de gume de faca	25
Figura 10 - Perda por difração de gume de faca.....	26
Figura 11 - Efeito Doppler	29
Figura 12 - Modulação analógica em amplitude e frequência.....	30
Figura 13 - Modulação analógica em fase.....	31
Figura 14 - Modulação digital	32
Figura 15 - Diagramas de constelação das modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM.....	33
Figura 16 - Direct Sequence Spread Spectrum.....	35
Figura 17 - FDMA	37
Figura 18 - TDMA.....	38
Figura 19 - CDMA	39
Figura 20 - Subportadoras OFDM.....	40
Figura 21 - OFDMA	41
Figura 22 - Multiplexação espacial (simplificada).....	44
Figura 23 - Resource block.....	45
Figura 24 - Diferença entre OFDMA e SC-FDMA.....	46
Figura 25 - Parâmetros da rede.....	49
Figura 26 - Parâmetros dos sistemas utilizados.....	50
Figura 27 - Posicionamento das estações	51
Figura 28 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de -1,02 dB	61
Figura 29 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 1,45 dB	62
Figura 30 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 3,44 dB	63
Figura 31 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 6,76 dB	64
Figura 32 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 9,68 dB	65

Figura 33 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 11,06 dB	66
Figura 34 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 12,41 dB	67
Figura 35 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de -1,02 dB	68
Figura 36 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 1,45 dB	69
Figura 37 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 3,44 dB	70
Figura 38 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 6,76 dB	71
Figura 39 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 9,68 dB	72
Figura 40 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 11,06 dB	73
Figura 41 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 12,41 dB	74
Figura 42 - Enlace obstruído por difração	75
Figura 43 - Enlace obstruído entre NavioERB e Navio4	75
Figura 44 - Simulação de enlace com difração.....	76
Figura 45 - Enlace com difração entre NavioERB e Navio4	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nomenclatura das bandas de frequências segundo a ITU	19
Tabela 2 - Comparação de taxas teóricas de redes LTE e LTE-Advanced.....	42
Tabela 3 - Relação entre largura de banda e subportadoras	55
Tabela 4 - <i>Throughput</i> para QPSK, 16-QAM e 64-QAM.....	56
Tabela 5 - Taxas de código utilizadas	56
Tabela 6 - <i>Throughput</i> levando em consideração a taxa de código.....	57
Tabela 7 - Relação sinal-ruído requerida.....	58
Tabela 8 - Relação entre SNR, modulação e taxa de código.....	59
Tabela 9 - Valor de <i>throughput</i> a partir do SNR e da largura de banda.....	60
Tabela 10 - Alcances obtidos nas simulações para 700 MHz e 450 MHz	77
Tabela 11 - Requisitos de <i>throughput</i> para aplicações da internet	78
Tabela 12 - Requisitos de <i>throughput</i> para chamadas no <i>Skype</i>	78

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	Sistema de telefonia móvel celular de quarta geração
5G	Sistema de telefonia móvel celular de quinta geração
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
C ²	Comando e Controle
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
DS-SS	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i>
ERB	Estação Rádio Base
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FH-SS	<i>Frequency Hopping Spread Spectrum</i>
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GIRED	Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
IMT-Advanced	<i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>

MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MSK	<i>Minimum Shift Keying</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PM	<i>Phase Modulation</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SISMC ²	Sistema Militar de Comando e Controle
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SS	<i>Spread Spectrum</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Apresentação do Problema	13
1.2	Justificativa e Relevância	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Organização do Trabalho	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Princípios da transmissão sem fios.....	16
2.1.1	O espectro eletromagnético	17
2.1.2	Mecanismos de propagação	20
2.1.2.1	<i>Reflexão</i>	<i>21</i>
2.1.2.2	<i>Difração</i>	<i>23</i>
2.1.2.3	<i>Dispersão.....</i>	<i>26</i>
2.1.2.4	<i>Modelos de propagação: o modelo de Longley-Rice</i>	<i>27</i>
2.1.3	Perdas de propagação.....	28
2.1.4	Modulação	29
2.1.4.1	<i>Modulação analógica</i>	<i>30</i>
2.1.4.2	<i>Modulação digital.....</i>	<i>31</i>
2.1.5	Espalhamento Espectral.....	34
2.1.6	Técnicas de acesso múltiplo	36
2.1.6.1	<i>FDMA (Frequency Division Multiple Access).....</i>	<i>36</i>
2.1.6.2	<i>TDMA (Time Division Multiple Access).....</i>	<i>37</i>
2.1.6.3	<i>CDMA (Code Division Multiple Access).....</i>	<i>38</i>
2.1.6.4	<i>OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).....</i>	<i>40</i>
2.2	Fundamentos do LTE (Long Term Evolution)	42
2.2.1	MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).....	43
2.2.2	Técnicas de multiplexação e acesso múltiplo	44
2.2.3	Agregação de portadoras	46
2.2.4	Modulação e codificação adaptativa.....	47

3	METODOLOGIA	48
3.1	Classificação da Pesquisa	48
3.1.1	Quanto aos fins	48
3.1.2	Quanto aos meios.....	48
3.2	Coleta e Tratamento de Dados	48
3.3	Limitações do Método	51
4	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
4.1	Cálculo de throughput e relação sinal-ruído.....	52
4.1.1	Máxima perda no <i>downlink</i>	53
4.1.2	Máxima perda no <i>uplink</i>	54
4.1.3	Cálculo do throughput máximo	55
4.1.4	Cálculo da relação sinal-ruído requerida	58
4.2	Cálculo de cobertura	61
4.2.1	Simulação em 700 MHz	61
4.2.2	Simulação em 450 MHz	68
4.2.3	Simulação com obstrução	74
4.2.4	Resultados obtidos	77
4.3	Análise dos resultados	78
5	CONCLUSÃO.....	80
5.1	Considerações Finais	80
5.2	Sugestões para Futuros Trabalhos.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Uma Força Naval se caracteriza por um conjunto de navios, sob comando único, destinado a realizar operações navais. Nesse contexto, a atividade de Comando e Controle (C²) é um fator fundamental para a eficácia na obtenção de objetivos táticos, operacionais e estratégicos. Segundo o Glossário das Forças Armadas, C² consiste no “exercício da autoridade e da direção que um comandante tem sobre as forças sob o próprio comando, para o cumprimento da missão designada”. Assim, o C² possibilita a atuação conjunta dos meios e a convergência de esforços, fatores indispensáveis para a obtenção de eficácia no emprego da Força Naval e, conseqüentemente, para o cumprimento da missão (BRASIL, 2015a; BRASIL, 2015b).

O Sistema Militar de Comando e Controle (SISMC²) é o conjunto de infraestrutura de tecnologia da informação e comunicações, reunião de doutrinas e procedimentos, além dos recursos humanos essenciais ao C². Dentre os elementos do SISMC², a estrutura de comunicações tem papel fundamental para garantir que as informações fluam de maneira rápida, segura e confiável entre as forças em operação (BRASIL, 2015a).

Assim sendo, é imprescindível que os recursos de comunicação utilizados pelos navios acompanhem as inovações tecnológicas emergentes no contexto atual das telecomunicações. Conforme a Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle, atualmente, as redes de comunicações devem ser dotadas de ampla capacidade de transferência de dados e garantir o fluxo seguro de informações. Nesse sentido, as redes de comunicações digitais seriam apropriadas para este fim, uma vez que possuem altas taxas de transmissão, capacidade de armazenar grandes volumes de informação e estrutura para tratamento e atualização de dados em tempo real, possibilitando que o processo decisório seja mais ágil (BRASIL, 2015a).

1.1 Apresentação do Problema

Atualmente, quando uma Força Naval está engajada em uma operação, cada um dos navios componentes precisa fazer uso de um terminal móvel de comunicação via satélite para que possa utilizar o máximo possível dos recursos de C² disponíveis. Isso ocorre, pois, nos dias atuais, a comunicação entre os navios é feita por meio de redes de VHF/UHF para radiotelefonia e radiodados de baixa velocidade e com capacidade de tráfego de dados pequena, impedindo o compartilhamento de recursos de comunicação por satélite. Cabe a

ressalva de que os meios que não possuem o recurso satelital, certamente, terão sua capacidade de C² prejudicada. (LUIZ, 2017).

Uma possível solução para essa questão, segundo Luiz (2017), consistiria no emprego de redes sem fio de alta capacidade entre os navios. Tais redes possibilitariam uma integração dos recursos de C² entre os meios, bastando que apenas um navio necessitasse fazer uso de comunicações via satélite. Assim, a partir desse navio, todas as demais unidades envolvidas na operação, inclusive aqueles sem recursos de comunicação por satélite, teriam acesso às comunicações satelitais, aos recursos de C² e até mesmo a internet para atender às suas demandas administrativas.

Dessa forma, uma proposta de rede de alta capacidade entre os navios de uma Força Naval consiste em utilizar a tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), de uso consolidado em redes terrestres de comunicação móvel celular de quarta geração (4G), cuja viabilidade de implementação será o problema em análise neste trabalho.

1.2 Justificativa e Relevância

A Estratégia Nacional de Defesa identifica as tecnologias de comunicações como assunto de Segurança Nacional. Tal fato, aliado à afirmação da Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle que aponta para a importância de redes de comunicação seguras e com grande capacidade de transmissão, desperta para a necessidade de se pesquisar novas alternativas para os sistemas de comunicação atuais (BRASIL, 2012; BRASIL, 2015a).

Assim, o estudo realizado proporcionará um melhor entendimento da tecnologia LTE e de como ela pode ser aplicada às comunicações navais. Este trabalho evidenciará, portanto, a viabilidade do uso de novas tecnologias para os sistemas de comunicação dos navios.

O sistema proposto nesta pesquisa, por fazer uso de tecnologia LTE, se configura em uma rede de comunicação de alta capacidade, possibilitando a integração entre navios em operação. Por meio desses enlaces, será possível, por exemplo, que meios navais sem equipamentos de comunicação por satélite possam, através de unidades com tais equipamentos, ter acesso à internet e aos recursos de C²

1.3 Objetivos

Esta seção consiste dos objetivos a serem alcançados a partir da pesquisa realizada e está subdividida em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é analisar, principalmente sob o aspecto da propagação, a viabilidade da implementação de redes de comunicação com tecnologia LTE nas frequências de 700 MHz e 450 MHz para o enlace entre navios.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar uma breve revisão bibliográfica acerca dos fundamentos das comunicações sem fio;
- b) Apresentar os princípios de operação do LTE;
- c) Descrever, resumidamente, o funcionamento do *software Radio Mobile*;
- d) Calcular os valores de *throughput* e relação sinal-ruído (SNR) requerida para o enlace;
- e) Estimar o alcance para cada uma das frequências propostas em cada condição de SNR;
- f) Analisar a aplicabilidade dos valores de *throughput* encontrados.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos, descritos a seguir:

O capítulo 1, INTRODUÇÃO, apresenta o problema abordado no trabalho, bem como sua justificativa e relevância, o objetivo geral do estudo e os objetivos específicos.

O capítulo 2, REFERENCIAL TEÓRICO, aborda os principais conceitos que possibilitam a compreensão do tema em pauta.

O capítulo 3, METODOLOGIA, apresenta a classificação da pesquisa realizada, o método para obtenção de dados assim como a forma com que foram processados e suas limitações.

O capítulo 4, DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS, aborda os resultados alcançados ao longo do trabalho bem como sua análise.

O capítulo 5, CONCLUSÃO, apresenta as conclusões obtidas no trabalho em questão, assim como sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

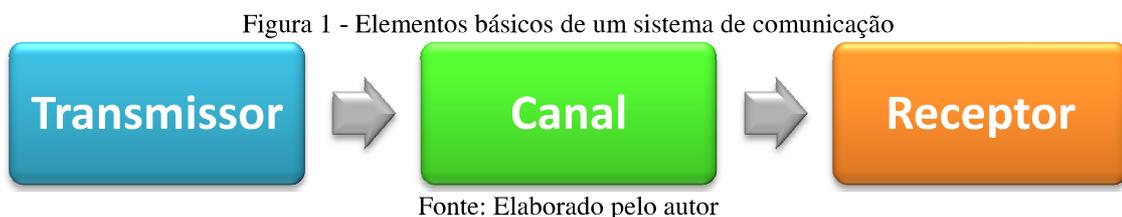
Neste capítulo serão abordados importantes elementos conceituais, necessários para o melhor entendimento do trabalho proposto. Nesse sentido, serão apresentados os princípios básicos da transmissão sem fios, com enfoque nos aspectos da propagação, assim como os fundamentos técnicos do LTE, destacando ainda as tecnologias que dão suporte a este padrão.

2.1 Princípios da transmissão sem fios

O mundo atual vive uma realidade onde as comunicações sem fios estão cada vez mais presentes na vida das pessoas. Sua aplicação se dá tanto para dispositivos móveis quanto para dispositivos fixos, quando a transmissão de dados por cabos não é possível por dificuldades de instalação ou por conta de acidentes geográficos (montanhas, florestas etc.). Cabe mencionar que o primeiro sistema de comunicação digital sem fios teve início nas ilhas havaianas, onde os usuários estavam separados por enormes distâncias no oceano pacífico e os sistemas cabeados não seriam viáveis (TANENBAUM, 2003).

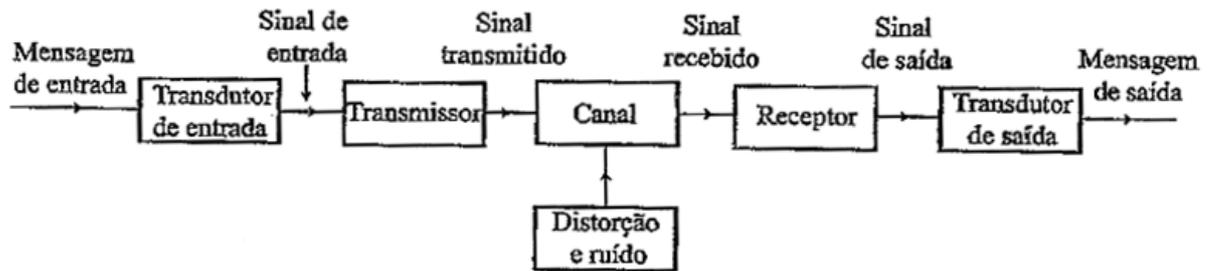
De forma geral, conforme Figueiredo (2004), um sistema de comunicação é formado por três elementos básicos (Figura 1), a saber:

- a) transmissor;
- b) canal;
- c) receptor.



As informações produzidas na origem, caso não sejam um sinal elétrico, passam por um transdutor de entrada, onde são convertidos em uma forma de onda elétrica e entregues ao transmissor. Este pode então atuar na modulação e codificação do sinal e posteriormente direcionar o sinal a um canal. Através deste meio os sinais se propagarão por uma determinada distância até que, por fim, alcancem o receptor e sejam processados por ele. Um esquema mais completo de um sistema de comunicação é apresentado na Figura 2 (LATHI, 2012).

Figura 2 - Sistema de comunicação



Fonte: Lathi (2012)

Tratando especificamente de sistemas de comunicação sem fio, o canal é o espaço livre e a transmissão de informações ocorre por meio da propagação de ondas eletromagnéticas (TANENBAUM, 2003).

Guimarães (1998) define comunicação móvel como aquela onde pode ocorrer movimento relativo entre as partes ou sistemas envolvidos. A comunicação entre aeronaves ou destas com uma base terrena, entre veículos, a telefonia celular e a computação móvel são exemplos de comunicação móvel.

Os sinais transmitidos podem ser classificados como analógicos ou digitais. Sinais analógicos se caracterizam por valores que variam em certo intervalo contínuo, ou seja, sua amplitude pode assumir um número incontável de valores, e ocorrem em um período contínuo de tempo. Um exemplo prático seria a forma de onda da voz, cuja amplitude varia em um intervalo contínuo. Já os sinais digitais podem ser definidos como combinações ordenadas de uma quantidade determinada de símbolos, ou seja, sua amplitude pode assumir um número finito de valores. Em particular, nos sistemas de comunicação digital, esses símbolos correspondem a formas de ondas ou a combinações sequenciais de formas de ondas. Por exemplo, sinais associados a um computador são digitais, pois podem assumir apenas dois valores, sendo ditos sinais binários (LATHI, 2012).

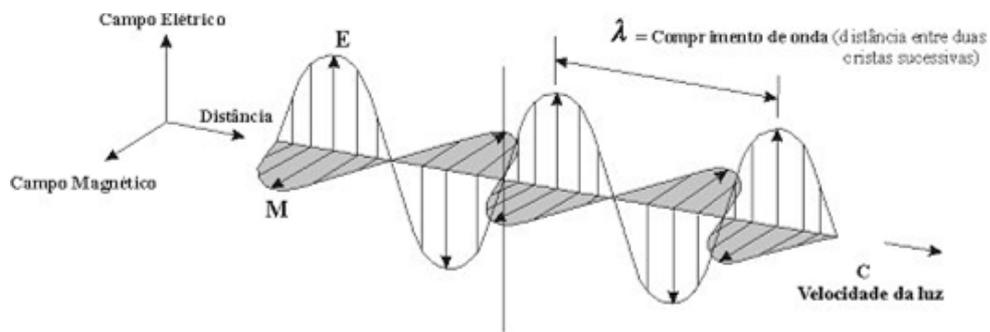
Este trabalho se delimitará ao estudo dos sistemas de comunicações digitais sem fios. Nas seções a seguir serão abordados aspectos relevantes para a compreensão de tais sistemas.

2.1.1 O espectro eletromagnético

Ao se moverem, os elétrons criam ondas eletromagnéticas, que se propagam no espaço, inclusive no vácuo. Essas ondas foram previstas pelo físico James C. Maxwell em 1865, mas só foram de fato observadas pela primeira vez em 1887 por Heinrich Hertz (TANENBAUM, 2003).

Define-se frequência (f) como o número de oscilações por segundo de uma onda eletromagnética, e é medida em Hz (Hertz), em homenagem ao físico alemão Heinrich Hertz. Comprimento de onda é a distancia entre duas cristas ou dois vales (pontos máximos e mínimos, respectivamente) consecutivos, e é representado pela letra grega λ (lambda). No vácuo todas as ondas se propagam à mesma velocidade, dita velocidade da luz (c), que tem por valor aproximado 3×10^8 m/s (TANENBAUM, 2003). A Figura 3 e a Equação 1 representam, respectivamente, a forma da onda e a relação fundamental da onda no vácuo.

Figura 3 - Forma da onda

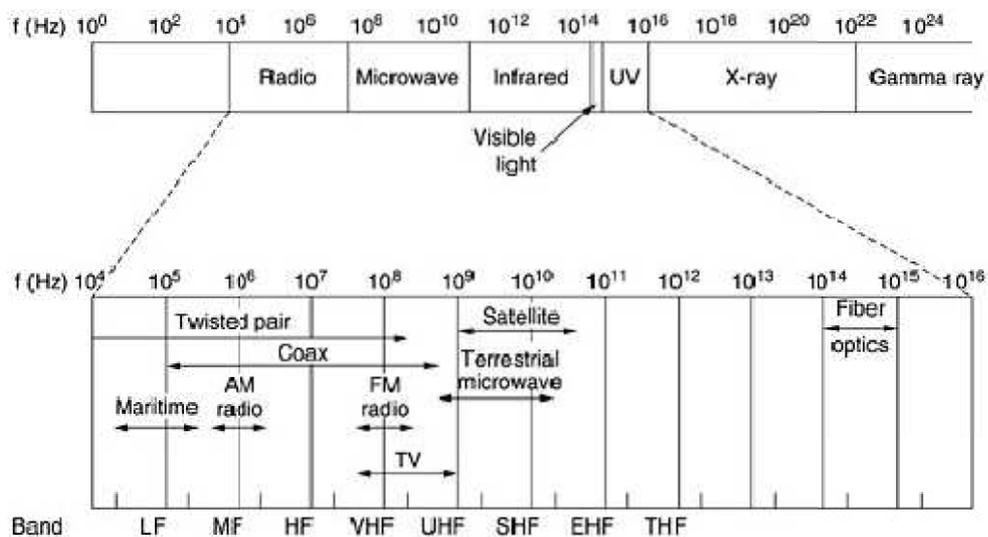


Fonte: Bruscato e Mors (2012)

$$c = \lambda f \tag{1}$$

O espectro eletromagnético, apresentado na Figura 4, é o conjunto reunido de todas as frequências existentes (FIGUEIREDO, 2004).

Figura 4 - O espectro eletromagnético e suas aplicações na comunicação



Fonte: Tanenbaum (2003)

As faixas de onda de rádio, microondas, infravermelho e luz visível são as porções do espectro que são utilizadas na transmissão de informações, após passarem pela modulação. As frequências ultravioleta, raios-x e raios gama, seriam opções ainda melhores, porém, são difíceis de produzir e modular, além de não se propagarem bem através de prédios e serem perigosas para os seres vivos (TANENBAUM, 2003).

Com o objetivo de padronizar a alocação de frequências foram estabelecidos acordos nacionais e internacionais, promovendo assim a interoperabilidade de sistemas de comunicação móvel. Em âmbito mundial a *International Telecommunication Union* (ITU) é responsável por essa padronização, enquanto que no Brasil a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) é a entidade responsável pela designação e fiscalização do uso das faixas de frequência (FIGUEIREDO, 2004).

As bandas de frequência, indicadas na parte inferior da Figura 4, também são padronizadas pela ITU e são baseadas nos comprimentos de onda. Assim, por exemplo, a banda LF compreende a faixa de frequências com comprimentos de onda de 1 a 10 km, correspondendo aproximadamente às frequências de 30 kHz a 300 kHz (TANENBAUM, 2003). A Tabela1 apresenta a nomenclatura completa das bandas de frequências segundo a publicação *Radio Regulations* da ITU, bem como as faixas de frequências e comprimentos de onda associados.

Tabela1 - Nomenclatura das bandas de frequências segundo a ITU

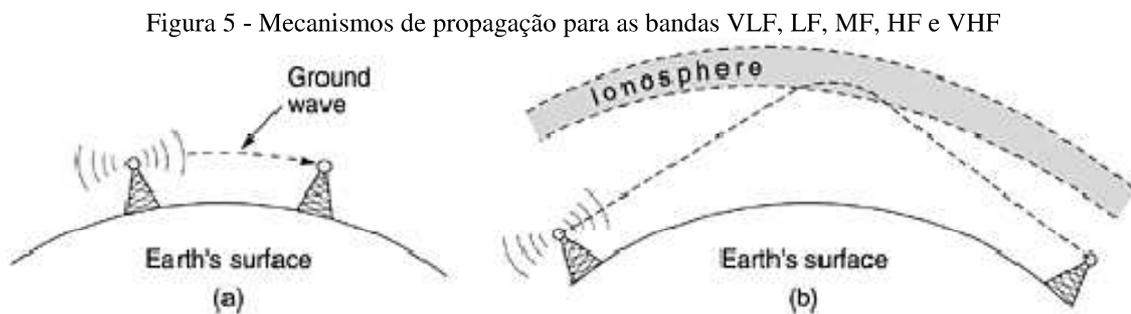
Banda	Descrição	Faixa de frequência	Comprimento de onda
ELF	Extremely Low Frequency	3 Hz - 30 Hz	100.000 km - 10.000 km
SLF	Super Low Frequency	30 Hz - 300 Hz	10.000 km - 1.000 km
ULF	Ultra Low Frequency	300 Hz - 3 kHz	1.000 km - 100 km
VLF	Very Low Frequency	3 kHz - 30 kHz	100 km - 10 km
LF	Low Frequency	30 kHz - 300 kHz	10 km - 1 km
MF	Medium Frequency	300 kHz - 3 MHz	1 km - 100 m
HF	High Frequency	3 MHz - 30 MHz	100 m - 10 m
VHF	Very High Frequency	30 MHz - 300 MHz	10 m - 1 m
UHF	Ultra High Frequency	300 - 3.000 MHz	1 m - 100 cm
SHF	Super High Frequency	3 - 30 GHz	100 cm - 10 mm
EHF	Extremely High Frequency	30 - 300 GHz	10 mm - 1 mm
THF	Tremendously High Frequency	300 - 3.000 GHz	1 mm - 0,1 mm

Fonte: International Telecommunication Union (2016)

2.1.2 Mecanismos de propagação

A forma como as ondas eletromagnéticas se propagam depende diretamente de sua frequência de operação. Tanenbaum (2003) define que nas bandas VLF, LF e MF as ondas se propagam próximas ao solo, conforme ilustra a Figura 5(a). Tais ondas podem ter um raio de ação de até 1.000 km nas frequências mais baixas, sendo esse alcance reduzido na medida em que a frequência aumenta. Ondas nessas bandas têm grande facilidade de propagação, sendo capazes, inclusive, de atravessar edificações. No entanto, a baixa largura de banda é o principal problema para sua utilização nas comunicações de dados.

Já para as frequências nas faixas HF e VHF as ondas próximas à superfície tendem a ser absorvidas pelo solo. A propagação, então, se dá através das ondas que alcançam a ionosfera, camada da atmosfera a uma altura de 100 a 500 km da superfície terrestre, e lá são refratadas e enviadas de volta à Terra, conforme apresentado na Figura 5(b). Em certas condições atmosféricas, esse processo pode ocorrer mais de uma vez, proporcionando alcances ainda maiores. Tal mecanismo é aproveitado para comunicações de longa distância por militares e operadores de radioamador (TANENBAUM, 2003).



Fonte: Tanenbaum (2003)

Nas frequências acima de 100 MHz (micro-ondas), as ondas se propagam praticamente em linha reta, utilizando um feixe estreito. Essa concentração de energia em um pequeno feixe proporciona uma relação sinal-ruído mais alta (TANENBAUM, 2003). Para esse tipo de propagação, Rappaport (2009) apresenta o modelo de propagação no espaço livre, que se aplica quando transmissor e receptor possuem um caminho de visão desobstruído entre eles. É possível calcular a potência recebida por uma antena receptora, separada a uma distância d de uma antena transmissora, a partir da equação de espaço livre de Friis, apresentada na Equação 2.

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

onde $P_r(d)$ é a potência recebida, P_t é a potência transmitida, G_t é o ganho da antena transmissora, G_r é o ganho da antena receptora, d é a distância entre as antenas transmissora e receptora, L é o fator de perda do sistema não relacionado à propagação ($L \geq 1$) e λ é o comprimento de onda.

Pode ser calculada, então, a perda de propagação em espaço livre, que representa a atenuação do sinal, definida pela diferença entre a potência transmitida e a potência recebida (RAPPAPORT, 2009). A Equação 3 expressa, em dB, como um número positivo, o valor da atenuação de espaço livre (L_{el}) (IPPOLITO JR., 1986).

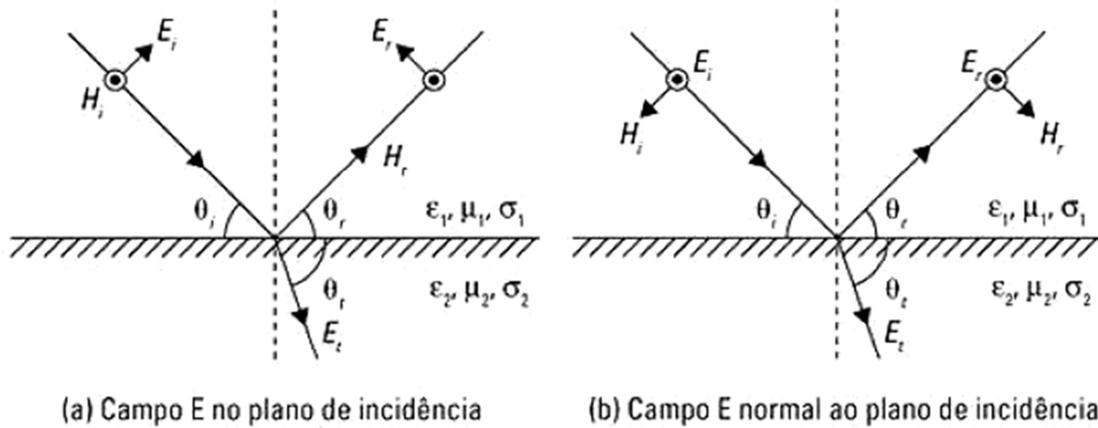
$$L_{el}(\text{dB}) = 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (3)$$

No entanto, a situação ideal onde o caminho de linha de visão entre transmissor e receptor está totalmente desobstruído raramente ocorre. Na prática, a propagação de ondas eletromagnéticas é frequentemente associada aos mecanismos de reflexão, difração e dispersão, os quais serão descritos com mais detalhes nas seções a seguir (RAPPAPORT, 2009).

2.1.2.1 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética colide com um obstáculo que possui dimensões muito maiores que o seu comprimento de onda. Quando este obstáculo possui propriedades elétricas distintas do meio em que a onda se propaga, a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. A relação entre a onda incidente e as ondas refletida e transmitida se dá através do coeficiente de reflexão de Fresnel (Γ), que é função das propriedades do material, da polarização da onda, do ângulo de incidência e da frequência da onda (RAPPAPORT, 2009).

Figura 6 - Reflexão de ondas eletromagnéticas



Fonte: Rappaport (2009)

A Figura 6 apresenta uma onda eletromagnética incidente em um ângulo θ_i com o plano que limita os dois meios. Como pode ser observado, parte da energia é refletida de volta ao primeiro meio, fazendo um ângulo θ_r , e parte da energia é transmitida ao segundo meio, em um ângulo θ_t . Define-se como plano de incidência o plano que contém os raios incidente, refletido e transmitido. Os campos E_i , E_r e E_t referem-se aos campos elétricos incidente, refletido e transmitido, respectivamente. Os parâmetros ϵ_1 , μ_1 , σ_1 e ϵ_2 , μ_2 e σ_2 representam a permissividade elétrica, a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica dos dois meios, respectivamente (RAPPAPORT, 2009).

Os coeficientes de reflexão para os dois casos apresentados na Figura 6 são representados pelas Equações 4 e 5, respectivamente:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_t - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_t + \eta_1 \sin \theta_i} \quad (4)$$

(campo E no plano de incidência)

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t} \quad (5)$$

(campo E normal ao plano de incidência)

onde η_i é a impedância intrínseca do i -ésimo meio ($i=1,2,\dots$), e é dada por $\sqrt{\mu_i/\epsilon_i}$, que corresponde à razão entre os campos elétrico e magnético para uma onda de plano uniforme em um meio particular (RAPPAPORT, 2009).

Aplicando as condições de limite das equações de Maxwell para derivar as Equações 4 e 5, obtemos as Equações 6, 7 e 8:

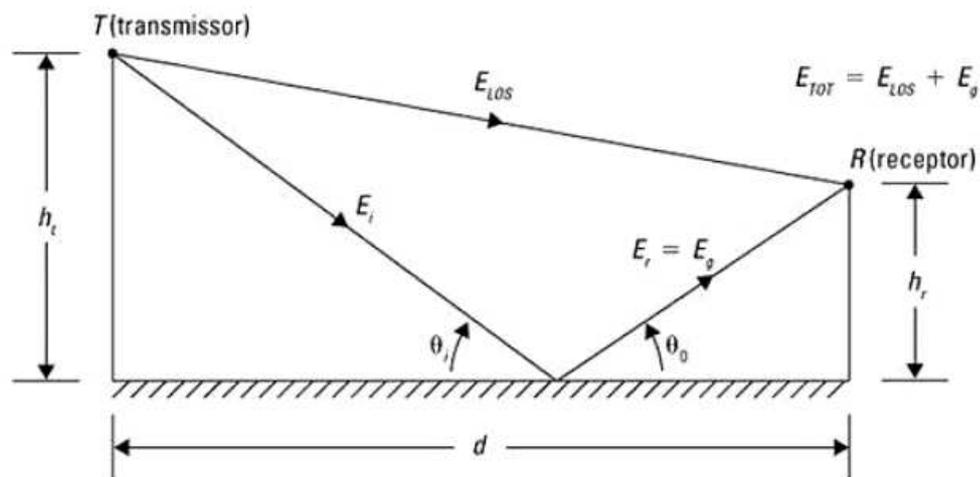
$$\theta_i = \theta_r \quad (6)$$

$$E_r = \Gamma E_i \quad (7)$$

$$E_t = (1 - \Gamma)E_i \quad (8)$$

Rappaport (2009) afirma ainda que raramente o caminho entre duas estações em comunicação é um caminho direto, composto de um único meio de propagação. Assim, o modelo de reflexão no solo de dois raios, mostrado na Figura 7 é um modelo de propagação útil que, utilizando óptica geométrica, considera o caminho direto e um caminho de propagação onde há reflexão no solo entre o transmissor e o receptor. O modelo é considerado razoavelmente preciso na previsão da intensidade do sinal para distâncias de vários quilômetros em determinados sistemas de rádio móvel.

Figura 7 - Modelo de reflexão no solo com dois raios



Fonte: Rappaport(2009)

A partir do modelo de reflexão no solo com dois raios e utilizando as equações anteriormente apontadas, Rappaport (2009) demonstra que a perda pela reflexão (L_{ref}) do caminho entre receptor e transmissor pode ser expressa em dB pela Equação 9:

$$L_{ref}(\text{dB}) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (9)$$

2.1.2.2 Difração

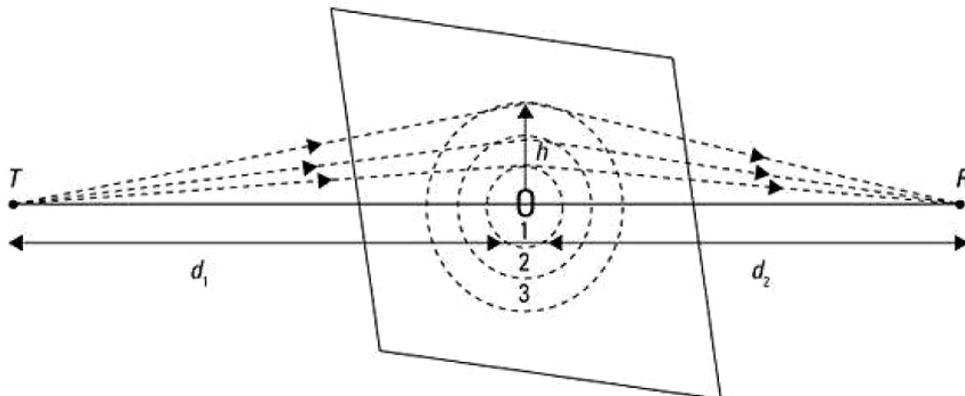
Segundo Rappaport (2009), a difração ocorre quando a trajetória de uma onda eletromagnética é obstruída por um objeto com arestas. As ondas resultantes da obstrução se propagam, inclusive, por trás do obstáculo, fazendo surgir uma curvatura de ondas ao redor

dele. Este mecanismo permite assim a propagação eletromagnética ao redor da superfície da Terra, além do horizonte e por trás de obstruções.

Este mecanismo provoca a atenuação do sinal. Estimar esta atenuação é fundamental para a previsão da intensidade do sinal em determinado receptor. No entanto, esta tarefa se mostra um problema matemático difícil. Assim, o modelo de difração de gume de faca se mostra um método interessante, oferecendo uma boa ideia da ordem de grandeza da perda por difração (RAPPAPORT, 2009).

Para compreender o funcionamento do modelo, faz-se necessário entender o conceito de zonas de Fresnel. Segundo a Recomendação ITU-R P.526-7, que trata de propagação por difração, o espaço compreendido entre dois pontos de um enlace de rádio (transmissor e receptor) pode ser dividido em uma família de elipsóides com focos nos referidos pontos (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2019). Estes são chamados elipsóides de Fresnel e a área da interseção desses elipsóides com um plano são chamadas zonas de Fresnel, conforme ilustra a Figura 8. O raio de um elipsóide de Fresnel situado em certo ponto entre o transmissor e o receptor é representado pela Equação 10.

Figura 8 - Zonas de Fresnel



Fonte: Rappaport (2009)

$$R_n = \sqrt{\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (10)$$

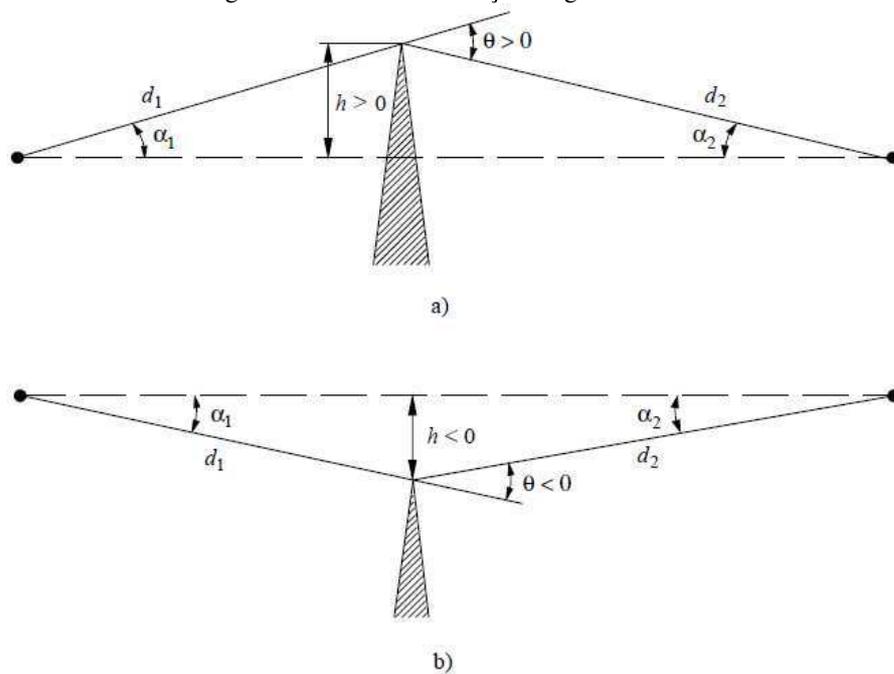
onde n é um número inteiro que caracteriza o elipsóide correspondente ($n=1$ corresponde ao primeiro elipsóide de Fresnel, $n=2$ o segundo e assim sucessivamente), R_n é o raio do n -ésimo elipsóide de Fresnel, d_1 é a distância entre o transmissor e o obstáculo e d_2 é a distância entre o obstáculo e o receptor (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

Para o raio do primeiro elipsóide de Fresnel, substituímos $n=1$ na Equação 10 e obtemos a Equação 11:

$$R_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (11)$$

O modelo de difração de gume de faca (Figura 9) se aplica quando há um único obstáculo entre o transmissor e o receptor. O cálculo é baseado em um obstáculo idealizado e, portanto, os resultados obtidos constituem-se de aproximações. Seus parâmetros geométricos se agrupam em um único parâmetro adimensional representado pela letra grega ν (ν), que tem seu valor expresso pela Equação 12 (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

Figura 9 - Modelo de difração de gume de faca

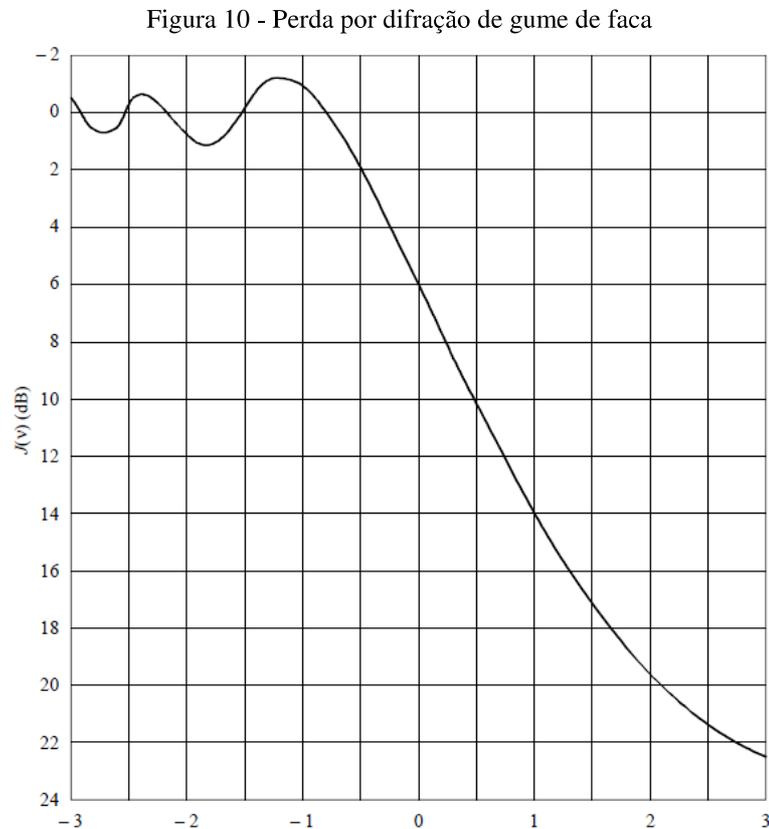


Fonte: International Telecommunication Union (2001)

$$\nu = \sqrt{2} \frac{h}{R_1} \quad (12)$$

onde R_1 é o raio do primeiro elipsóide de Fresnel e h é a altura do topo do obstáculo acima da linha reta que une as duas extremidades do caminho. Se a altura estiver abaixo desta linha, h é negativo (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

Por fim, a Recomendação ITU-R P.526-7 estabelece graficamente a perda causada pela presença de um obstáculo, em função de v , como pode ser observado na Figura 10.



Fonte: International Telecommunication Union (2001)

Para valores de v maiores que $-0,7$, o valor aproximado da perda pode ser obtido por meio da Equação 13. Através do gráfico, pode-se também perceber que para valores de v menores que $-0,7$ a perda é aproximadamente nula, configurando a condição de visibilidade direta.

$$L_{dif}(\text{dB}) = 6,9 + 20 \log \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right] \quad (13)$$

2.1.2.3 Dispersão

A dispersão ocorre quando o meio por onde as ondas se propagam contém muitos obstáculos com dimensões muito menores que o comprimento da onda. Quando uma onda colide com um desses objetos, a energia é espalhada em todas as direções, oferecendo, assim, energia adicional a um receptor. Dessa forma, os sinais recebidos normalmente são mais fortes que o previsto apenas pelos modelos de reflexão e difração (RAPPAPORT, 2009).

Segundo Rappaport (2009), a Equação 14 pode ser usada para calcular a potência recebida após a dispersão provocada pelo choque de uma onda que se propaga no espaço livre com um objeto dispersor.

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) + G_t(\text{dBi}) + 20 \log(\lambda) + RCS[\text{dB} \cdot \text{m}^2] - 30 \log(4\pi) - 20 \log d_T - 20 \log d_R \quad (14)$$

onde P_R e P_T são a potência no receptor e no transmissor, respectivamente, G_T é o ganho no transmissor, d_T e d_R são a distância do objeto dispersor até o transmissor e o receptor, respectivamente, e RCS é a seção cruzada de radar. Esta é definida pela razão entre a densidade de potência da onda dispersa na direção de um receptor e a densidade de potência do sinal incidente no objeto dispersor. A variável RCS também pode ser aproximada pela área da superfície (em m^2) do objeto dispersor, medida em dB com relação a uma referência de um metro quadrado.

2.1.2.4 Modelos de propagação: o modelo de Longley-Rice

Tendo em vista que a transmissão em um sistema de comunicação móvel ocorre em um terreno irregular, o perfil do terreno entre as estações deve ser considerado para a estimativa de perdas no caminho. Para tal finalidade, diversos modelos de propagação podem ser utilizados para prever a intensidade do sinal em determinado receptor ou em uma área específica. Embora o objetivo desses modelos seja basicamente o mesmo, os métodos variam bastante quanto à técnica utilizada, sua complexidade e precisão. Alguns dos modelos de propagação mais utilizados são: Longley-Rice, Durkin, Okumura, Hata, Walfisch e Bertoni e microcélula PCS de banda larga (RAPPAPORT, 2009). Neste trabalho será dado enfoque ao modelo de Longley-Rice, tendo em vista sua utilização no *software Radio Mobile*, empregado na simulação apresentada no capítulo 4.

Segundo Rappaport (2009), o modelo de Longley-Rice pode ser aplicado a sistemas de comunicação sem fio na faixa de 40 MHz a 100 GHz, em diversos tipos de terrenos. A perda na transmissão é estimada com base na geometria do terreno no percurso e na refratividade da troposfera. São utilizadas técnicas de óptica geométrica, em especial o modelo de reflexão no solo com dois raios, para estimar a intensidade do sinal dentro do raio de alcance. Além disso, a previsão das perdas de difração por obstáculo isolado é feita utilizando o modelo de gume de faca. Como limitações do modelo podem ser citadas a impossibilidade de determinar

correções por fatores ambientais nas proximidades do receptor ou considerar os efeitos de prédios ou da folhagem, além de não levar em conta as perdas por multipercurso.

2.1.3 Perdas de propagação

Além das perdas mencionadas anteriormente, existem outras que influenciam significativamente as comunicações sem fio, em especial na faixa de micro-ondas. Neste tópico será abordado o desvanecimento devido a múltiplos percursos, o efeito Doppler e a atenuação pela chuva.

De acordo com Tanenbaum (2003), embora um enlace de micro-ondas seja bastante direcional, ainda há alguma divergência no espaço. Algumas ondas podem ser refratadas em camadas baixas da atmosfera, chegando ao receptor certo tempo depois das ondas diretas. Tais ondas atrasadas podem chegar fora de fase, provocando o cancelamento do sinal. Esse efeito é chamado de desvanecimento de multipercursos.

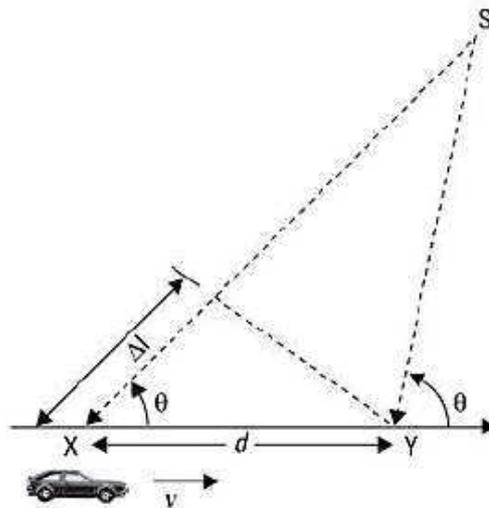
Segundo Guimarães (1998), os multipercursos podem ser formados também pela colisão da onda transmitida em obstáculos próximos ao receptor e a consequente reflexão, difração ou dispersão do sinal. Considerando, ainda, que o receptor pode estar em movimento, as estruturas ao seu redor estarão em constante modificação. Como o sinal recebido é a soma de todos os sinais nos seus múltiplos percursos, então a modificação do entorno faz com que a intensidade do sinal no receptor varie. Quanto maior a velocidade de movimentação do receptor, mais rápidas serão as variações da intensidade do sinal recebido e conseqüentemente maior será o desvanecimento por multipercursos.

Ainda relacionado ao movimento entre as estações, o efeito Doppler se caracteriza pela percepção de uma frequência diferente da que está sendo transmitida. Assim como no desvanecimento por múltiplos percursos, quanto maior é a velocidade do movimento relativo entre transmissor e receptor maior é o desvio de frequência percebido. A expressão que representa o valor do desvio Doppler em função da velocidade de movimento é apresentada na Equação 15 (GUIMARÃES, 1998).

$$f_D = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (15)$$

onde f_D é o desvio Doppler, v é a velocidade do móvel e θ é o ângulo entre a direção do movimento e a direção de propagação da onda eletromagnética. A Figura 11 ilustra uma situação onde ocorre o efeito Doppler.

Figura 11 - Efeito Doppler



Fonte: Rappaport (2009)

Outro fator de atenuação importante é a absorção pela água. Seus efeitos são bastante significativos para os sistemas de comunicação que operam em frequências acima de 10 GHz, onde o comprimento de onda é da ordem de alguns poucos centímetros. A presença de vapor de água e, principalmente, da chuva, na trajetória de micro-ondas é consideravelmente prejudicial. As gotas de água absorvem e dispersam a energia das ondas, provocando atenuação do sinal e degradando o desempenho e a confiabilidade do link de comunicação (IPPOLITO JR., 1986).

2.1.4 Modulação

Modulação é o processo pelo qual a mensagem é convertida em uma forma apropriada para a transmissão. Esse procedimento geralmente consiste em traduzir o sinal da informação na fonte, dita banda base ou sinal modulante, em uma frequência mais alta, chamada banda passante ou sinal modulado, na qual ocorrerá a transmissão. A modulação pode ocorrer pela variação de amplitude, frequência ou fase de um sinal de alta frequência, denominado portadora (RAPPAPORT, 2009).

Lathi (2012) define como portadora o sinal senoidal de alta frequência que terá um de seus parâmetros modificados proporcionalmente pelo sinal modulante para gerar o sinal modulado. Assim, a modulação faz com que o sinal em banda base seja transportado pela portadora.

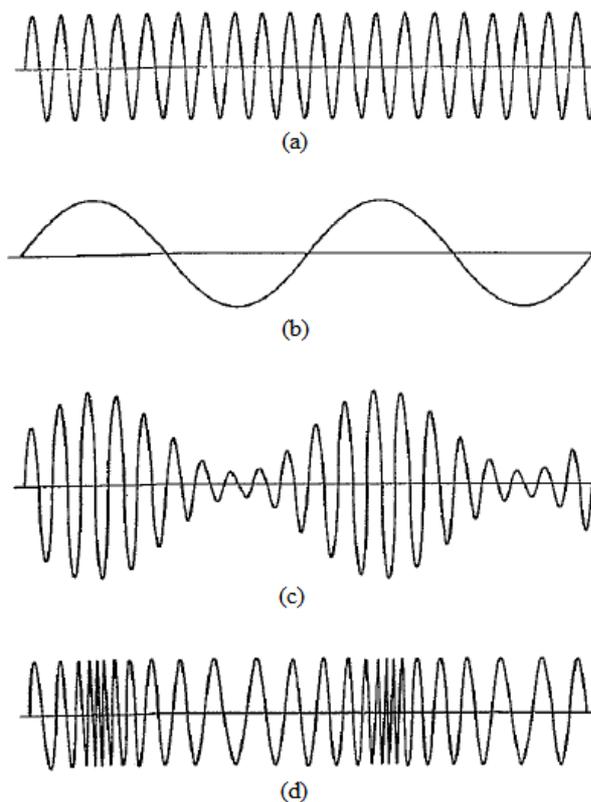
Segundo Sbizera (2003), a modulação pode ser analógica ou digital. Os primeiros esquemas a serem implementados foram os analógicos. As técnicas de modulação digital,

apesar de terem surgido antes das analógicas, só puderam ser utilizadas mais tarde com a evolução tecnológica.

2.1.4.1 Modulação analógica

A Figura 12(c) representa uma onda modulada em amplitude (AM). Nela um sinal de portadora, ilustrado pela Figura 12(a), tem sua amplitude variada de acordo com a amplitude instantânea do sinal modulante, mostrado na Figura 12(b). Nesse tipo de modulação existe uma relação direta entre a qualidade e a potência do sinal, uma vez que os sinais AM sobrepõem as amplitudes relativas do sinal modulante à da portadora. Dessa forma, toda a informação de um sinal AM está na amplitude da portadora (RAPPAPORT, 2009).

Figura 12 - Modulação analógica em amplitude e frequência



Fonte: Lathi (2012)

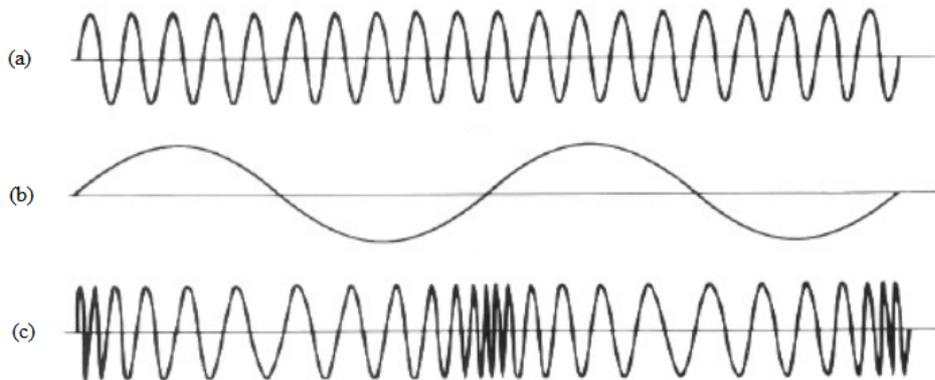
A amplitude modulada possui algumas vantagens em relação à frequência modulada, a saber: ocupação de largura de banda menor, equipamentos menos complexos, melhor desempenho em situações de sinal fraco, uma vez que a frequência modulada deve ser recebida acima de um patamar (RAPPAPORT, 2009).

Uma onda modulada em frequência (FM) é representada na Figura 12(d). Nesta técnica a amplitude da portadora, apresentada na Figura 12(a), é mantida constante, enquanto que sua frequência é transformada conforme o sinal em banda base, ilustrado na Figura 12(b). Desta forma, sinais FM têm toda a informação contida na frequência da portadora (RAPPAPORT, 2009).

A frequência modulada é a forma de modulação mais usada em sistemas de rádio móveis, graças às inúmeras vantagens que apresenta sobre a amplitude modulada. São algumas delas: melhor imunidade ao ruído, possibilidade de ajuste na ocupação de largura de banda a fim de obter melhor desempenho de sinal-ruído, boa resistência a interferência co-canal e excelente qualidade subjetiva de recepção (RAPPAPORT, 2009).

Segundo Lathi (2012), a modulação em fase (PM), representada pela Figura 13(c), consiste da técnica de modulação na qual a fase da onda portadora, mostrada na Figura 13(a), é variada proporcionalmente com o sinal modulante, ilustrado pela Figura 13(b).

Figura 13 - Modulação analógica em fase

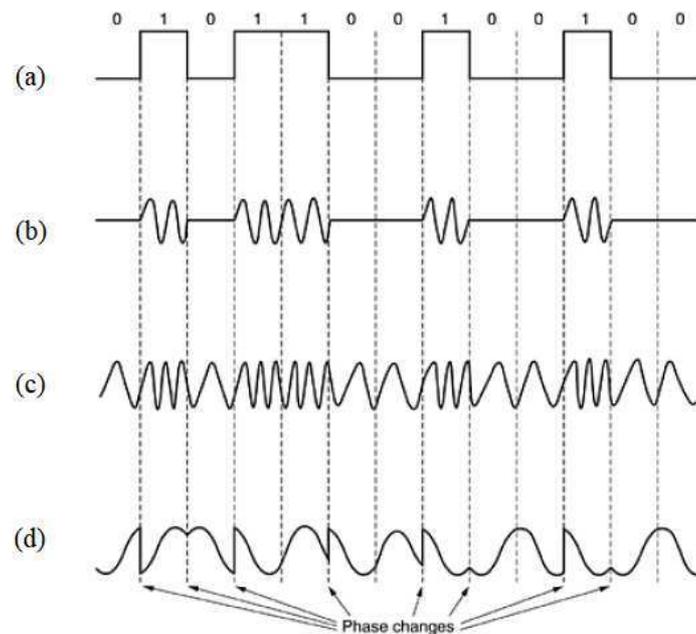


Fonte: Adaptado de Pinheiro (2016)

2.1.4.2 Modulação digital

Semelhantemente aos sinais analógicos, para a transmissão de sinais digitais se faz necessária a utilização de uma portadora e a modulação de um de seus parâmetros: amplitude, frequência ou fase, ou ainda uma composição delas. A Figura 14 ilustra as formas de modulação digital (TANENBAUM, 2003).

Figura 14 - Modulação digital



Fonte: Tanenbaum (2003)

A técnica ASK (*Amplitude Shift Keying*) é representada na Figura 14(b). Nela a modulação ocorre por meio de variações na amplitude da portadora em função do sinal modulante, apresentado na Figura 14(a). Essa modulação se baseia simplesmente em atribuir amplitudes diferentes para a onda portadora em função do valor do sinal digital original (TANENBAUM, 2003).

A Figura 14(c) ilustra a modulação FSK (*Frequency Shift Keying*), que alterna duas ou mais frequências para a portadora. Essa comutação ocorre em função do valor do sinal digital modulante, apresentado na Figura 14(a) (SBIZERA, 2003).

Na modulação PSK (*Phase Shift Keying*), Figura 14(d), a fase da onda portadora é deslocada em 0 ou 180 graus, em intervalos uniformemente espaçados, de acordo com o sinal a ser transmitido (TANENBAUM, 2003).

Para o melhor entendimento de determinadas técnicas de modulação digital, é necessária a definição de alguns conceitos importantes, tais como largura de banda, baud, símbolo e taxa de *bits*. A largura de banda de um canal é a faixa de frequências que podem ser transmitidas. Trata-se de uma propriedade física do meio e é medida em Hz. A taxa de bauds é o número de amostras por segundo. Cada amostra contém uma parte da informação, ou seja, um símbolo. Logo, a taxa de bauds e a taxa de símbolos são idênticas. Cada técnica de modulação utiliza um número de *bits* por símbolo. A taxa de *bits* (ou *throughput*), medida em *bits* por segundo (bps), é a quantidade de informações transmitidas e é obtida multiplicando o número de símbolos por segundo pelo número de *bits* por símbolo (TANENBAUM, 2003).

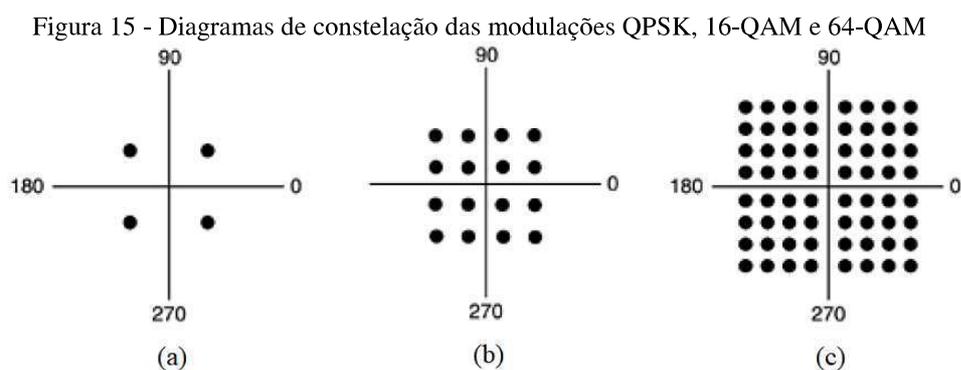
Por essas definições, não seria errado deduzir que para alcançar uma quantidade maior de informações transmitidas, ou seja, uma maior taxa de *bits*, bastaria aumentar o número de *bits* por símbolo. Foi o que Harry Nyquist afirmou em 1924. No entanto, não foram levados em conta os possíveis ruídos presentes no meio. Anos mais tarde, em 1948, Claude Shannon aprofundou o trabalho de Nyquist, chegando a uma taxa máxima de transmissão em um canal na presença de ruído. Tal limite levaria o seu nome, se chamando Lei de Shannon, e é apresentado na Equação 16:

$$C(\text{bps}) = W \log_2(1 + \text{SNR}) \quad (16)$$

onde C é a capacidade máxima do canal em bps, W é a largura de banda em Hz e SNR é a relação sinal-ruído no meio (TANENBAUM, 2003).

Voltando a tratar da modulação PSK, o caso onde a fase pode alternar entre dois valores é chamado de BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) e utiliza um *bit* por símbolo. Podem ser utilizados também esquemas com deslocamentos de 45, 135, 225 e 315 graus. Esta técnica que utiliza quatro deslocamentos de fase, ilustrada na Figura 15(a) é chamada de QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e possibilita a transmissão de dois *bits* por símbolo, permitindo uma maior taxa de transmissão de dados (RAPPAPORT, 2009; TANENBAUM, 2003).

Outra técnica de modulação digital utilizada chama-se QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e combina modulação de amplitude e fase. Podem ser usadas, por exemplo, quatro amplitudes e quatro fases, dando origem ao 16-QAM, apresentado na Figura 15(b). Esse esquema de modulação permite a transmissão de quatro *bits* por símbolo. Outra variação desse método é o 64-QAM, por meio do qual podem ser transmitidos seis *bits* por símbolo, conforme ilustra a Figura 15(c) (TANENBAUM, 2003).



Fonte: Tanenbaum (2003)

A modulação MSK (*Minimum Shift Keying*) é um caso específico da modulação FSK, onde as portadoras utilizadas respeitam uma separação mínima de modo a garantir a ortogonalidade entre elas. Tal característica é fundamental para uma detecção confiável do sinal recebido, visto que sinais ortogonais são facilmente diferenciáveis. Trata-se da técnica de modulação digital para comunicações móveis que possui a menor complexidade de implementação (GUIMARÃES, 1998).

A técnica GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) é uma derivação da modulação MSK. Nela, o sinal de entrada do modulador passa por um filtro passa-baixa com resposta a um pulso retangular gaussiano. A saída desse filtro é responsável por modular as portadoras em MSK. O efeito desse filtro é adequar os pulsos de entrada do modulador MSK fazendo com que as transições de frequência sejam mais suaves e, assim, reduzindo a largura de faixa do lóbulo principal do sinal modulado (GUIMARÃES, 1998).

Na prática, esta última técnica é mais atraente por possuir excelente eficiência de potência e sua excelente eficiência espectral (RAPPAPORT, 2009).

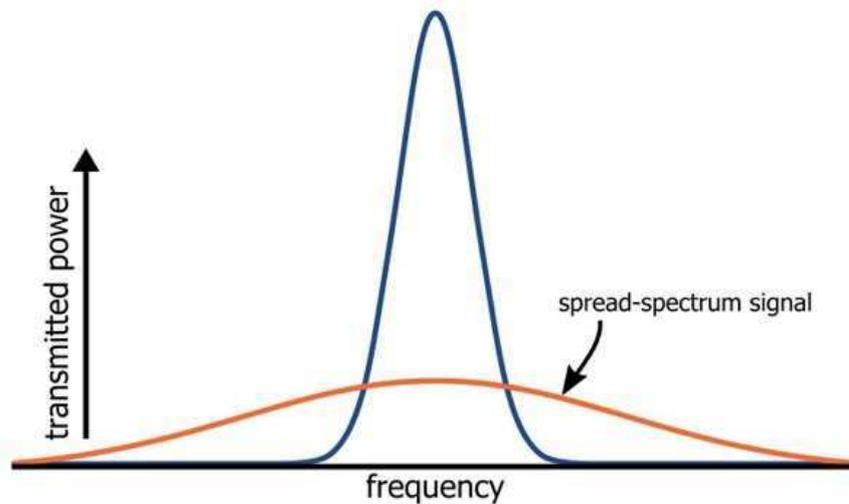
2.1.5 Espalhamento Espectral

O Espalhamento Espectral, ou *Spread Spectrum* (SS), é uma técnica que consiste em ocupar uma largura de faixa maior do que a mínima requerida para a transmissão digital. Essa técnica ajuda a mitigar os efeitos prejudiciais de interferências, acidentais ou propositalis (*jamming*), ou da atenuação de múltiplos percursos (PETERSON; ZIEMER; BORTH, 1995).

O espalhamento espectral pode ser gerado de duas formas básicas: o espalhamento por sequência direta e o espalhamento por saltos em frequência (GUIMARÃES, 1998).

O espalhamento espectral por sequência direta, ou *Direct Sequence Spread Spectrum* (DS-SS), multiplica cada *bit* de dado em banda base por uma sequência de espalhamento pseudo-aleatória. Esta sequência recebe o nome de *chip*. Tal processo faz com que os dados em banda base sejam espalhados no espectro, conforme ilustra a Figura 16 (RAPPAPORT, 2009).

Figura 16 - Direct Sequence Spread Spectrum



Fonte: Kein (2017)

As vantagens de utilizar esta técnica são: melhor desempenho contra interferências e ruídos, maior dificuldade de interceptação do sinal e melhor desempenho em situações de multipercursos. Por outro lado, a utilização de DS-SS demanda um canal de banda larga com pouca distorção e um gerador de código de alta velocidade (SBIZERA, 2003).

A outra forma de espalhamento espectral, chamada espalhamento espectral por saltos em frequência, ou *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FH-SS), consiste basicamente em efetuar mudanças periódicas na frequência da portadora (PETERSON; ZIEMER; BORTH, 1995). Esse padrão de saltos em frequência precisa ser conhecido pelas estações envolvidas para que, estando sincronizados, possam trocar informações como se existisse um canal único. Para uma estação estranha, o sinal se assemelharia a impulsos de ruído de curta duração (SBIZERA, 2003).

Enquanto no DS-SS ocorre um espalhamento instantâneo na faixa de transmissão, no FH-SS o espectro do sinal é espalhado sequencialmente. O sinal FH-SS cobre o espectro fazendo o sinal modulado saltar de uma frequência para outra, de acordo com um padrão preestabelecido (SBIZERA, 2003).

As vantagens de utilizar o FH-SS, segundo Sbizera (2003), são: a possibilidade de ser programável para evitar determinadas porções do espectro e um melhor desempenho em canais com pouco ruído. Em contrapartida, existe a necessidade de utilizar um sintetizador de frequências complexo e empregar códigos de correção de erros.

2.1.6 Técnicas de acesso múltiplo

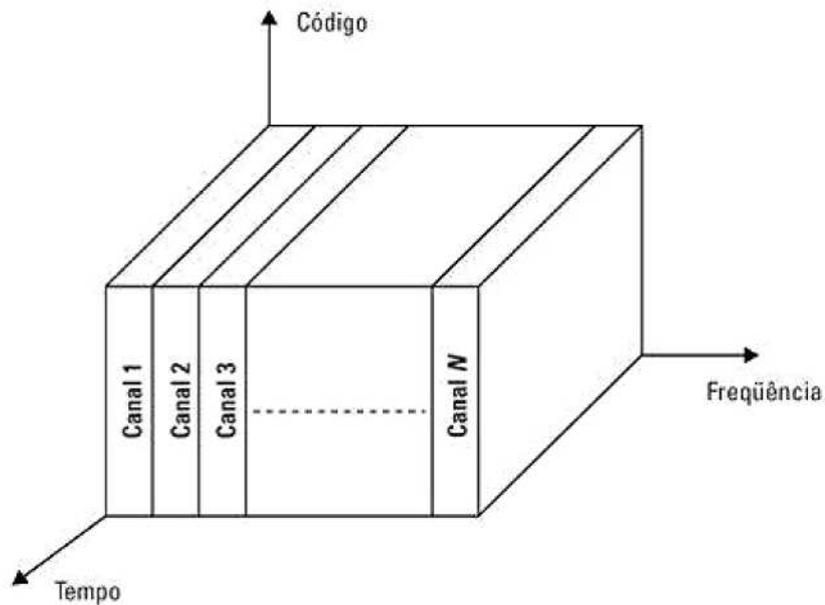
Segundo Rappaport (2009), os esquemas de acesso múltiplo são usados a fim de possibilitar que inúmeros usuários compartilhem ao mesmo tempo uma quantidade limitada do espectro de frequências. Esse compartilhamento é necessário para que se possa alcançar uma alta capacidade alocando concomitantemente a largura de banda disponível a vários usuários.

A fim de possibilitar o fluxo de informações em ambos os sentidos em um canal de comunicação, é necessário implementar alguma técnica de duplexação, o que pode ser feito no domínio do tempo ou da frequência. A primeira delas chama-se duplexação por divisão de tempo ou *Time Division Duplexing* (TDD), enquanto a segunda se chama duplexação por divisão de frequência ou *Frequency Division Duplexing* (FDD). Na FDD são utilizadas duas bandas de frequências diferentes para cada estação, uma para transmissão e outra para recepção. Já na TDD, múltiplas estações compartilham um único canal, alternando-se no tempo. Esta última elimina a necessidade de dois canais e da utilização de frequências distintas, porém implica na inserção de maior atraso na comunicação (RAPPAPORT, 2009).

2.1.6.1 *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*

Em sistemas de acesso múltiplo por divisão em frequência, a largura de banda disponível é subdividida e a cada usuário é designada uma dessas subfaixas, geralmente por demanda. Em outras palavras, a cada usuário individual é atribuído um canal individual, conforme ilustra a Figura 17 (GUIMARÃES, 1998; RAPPAPORT, 2009).

Figura 17 - FDMA



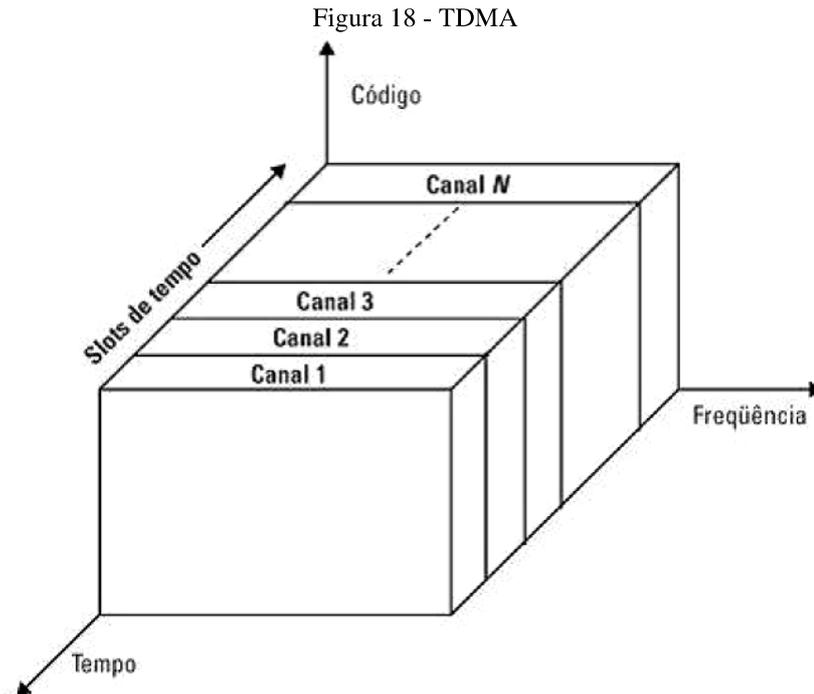
Fonte: Rappaport (2009)

Essa alocação de canais individuais faz com que o FDMA apresente a desvantagem de desperdiçar banda, isto é, quando o canal não está sendo utilizado ele fica ocioso. Outra característica relevante é que os canais FDMA possuem largura de banda estreita, de cerca de 30 kHz, fazendo com que sua principal implementação seja em sistemas de banda estreita. Com isso, o tempo médio de símbolo é relativamente grande, minimizando a interferência intersimbólica e praticamente eliminando a necessidade de equalização no sistema (RAPPAPORT, 2009).

Os sistemas FDMA possuem ainda menor complexidade quando comparados aos demais. Além disso, por operarem em esquema de transmissão contínua, geram menos *overhead* com *bits* de sincronização e enquadramento. No entanto, possuem custo mais elevado de sistema, uma vez que precisam de filtros de canal caros para evitar a interferência entre canais adjacentes e seus transceptores necessitam de duplexadores (RAPPAPORT, 2009).

2.1.6.2 Time Division Multiple Access (TDMA)

Na técnica de acesso múltiplo por divisão de tempo, o espectro é dividido em *slots* de tempo e cada usuário utiliza um *slot* para transmitir ou receber. Cada *slot* é considerado um canal e se repete ciclicamente a cada quadro, onde um quadro é composto de N *slots* de tempo, conforme ilustra a Figura 18 (RAPPAPORT, 2009).



Fonte: Rappaport (2009)

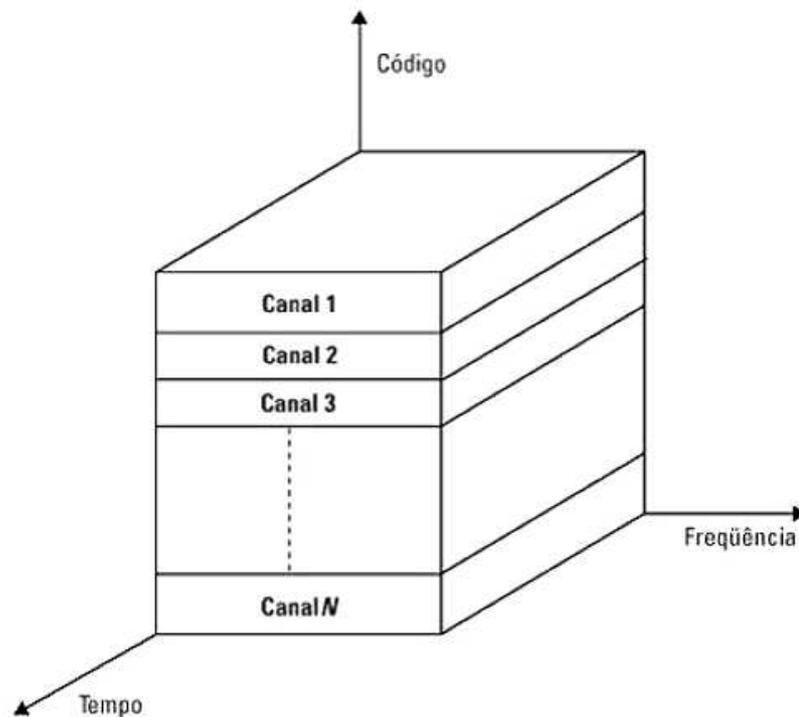
Diferentemente dos sistemas FDMA, o TDMA pode operar apenas com sinais digitais. Pode operar de duas formas: TDMA/TDD ou TDMA/FDD. No TDMA/TDD metade dos *slots* é alocada para transmissão e a outra metade para a recepção, enquanto que no TDMA/FDD um mesmo *slot* é utilizado tanto na transmissão quanto na recepção, sendo a separação realizada através da frequência (GUIMARÃES, 1998).

Outra característica importante dos sistemas TDMA é que os *slots* de tempo podem ser alocados de acordo com a demanda das diferentes estações e conforme a prioridade. Dessa forma obtém-se um melhor compartilhamento do espectro, permitindo alcançar um aumento na capacidade do sistema (GUIMARÃES, 1998).

2.1.6.3 Code Division Multiple Access (CDMA)

No método de acesso múltiplo com divisão por código, utiliza-se a técnica de espalhamento espectral, na qual cada usuário utiliza um código de espalhamento diferente. Conforme ilustrado na Figura 19, no CDMA todas as estações podem transmitir simultaneamente e utilizar a mesma frequência de portadora. Para a detecção da mensagem, o receptor utiliza o respectivo código da estação desejada, para assim extrair o seu sinal corretamente (GUIMARÃES, 1998).

Figura 19 - CDMA



Fonte: Rappaport (2009)

A capacidade de um sistema CDMA é dita limitada pelas interferências, diferentemente dos sistemas FDMA e TDMA, limitadas pela largura de faixa. Dessa forma, qualquer melhoria no nível de interferências implica diretamente no aumento do número de estações no sistema (GUIMARÃES, 1998).

Uma possível situação desfavorável no CDMA ocorre quando muitas estações móveis compartilham o mesmo canal. Os sinais mais fortes recebidos elevam o patamar de ruído nos demoduladores do receptor de uma estação-base, fazendo com que sinais mais fracos não sejam recebidos. A forma de combater esse problema é através do controle de potência, implementado na estação-base. Com isso, os sinais provenientes de estações próximas ou distantes chegarão ao receptor com a mesma intensidade (RAPPAPORT, 2009).

Nos sistemas FDMA e TDMA, a setorização tem como objetivo a redução do nível de interferências, gerando um pequeno aumento na capacidade do sistema. Já no CDMA, a setorização provoca uma efetiva diminuição do nível de ruídos ocasionando um aumento diretamente proporcional na capacidade do sistema (GUIMARÃES, 1998).

Há também outros fatores importantes a considerar: a atenuação de multipercursos é consideravelmente diminuída uma vez que o sinal é espalhado no espectro; as taxas de dados do canal são muito altas e, conseqüentemente a duração do símbolo é muito curta; não existe

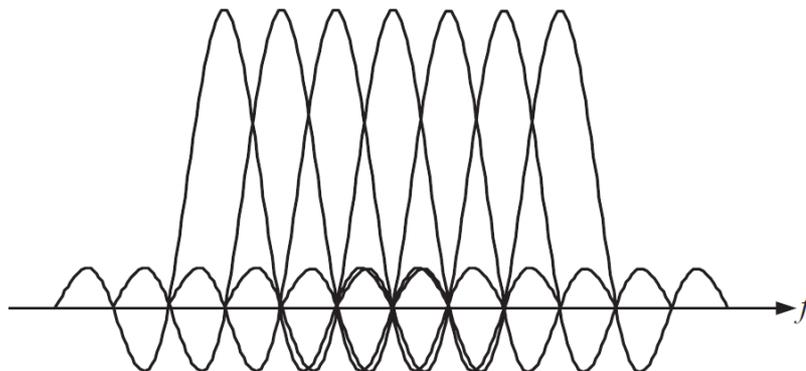
um limite absoluto de estações em um sistema CDMA, porém, o seu desempenho é inversamente proporcional ao número de estações participantes (RAPPAPORT, 2009).

Uma variante do CDMA é o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), que seria um CDMA de banda larga. Diferente do CDMA, que normalmente possui uma largura de banda de 1,25 MHz, o WCDMA opera com uma largura de banda de 5 MHz (TANENBAUM, 2003).

2.1.6.4 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

Trata-se de uma técnica de múltiplo acesso baseada em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Como o próprio nome sugere, o OFDM é uma extensão da técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*). A ideia básica é dividir a largura de banda disponível em várias sub-bandas estreitas e usar um grande número de subportadoras paralelas de banda estreita, em vez de uma única portadora de banda larga para transferir as informações. O que diferencia o OFDM é a eliminação da banda de guarda presente no método FDM, obtendo com isso uma redução de 50% do uso do espectro de frequências. Para isso, são utilizadas subportadoras ortogonais, como mostra a Figura 20. É possível observar que no ponto correspondente ao pico do espectro de cada subportadora todos os outros espectros cruzam o zero, ou seja, as subportadoras são ortogonais (KROUK; SEMENOV, 2011).

Figura 20 - Subportadoras OFDM

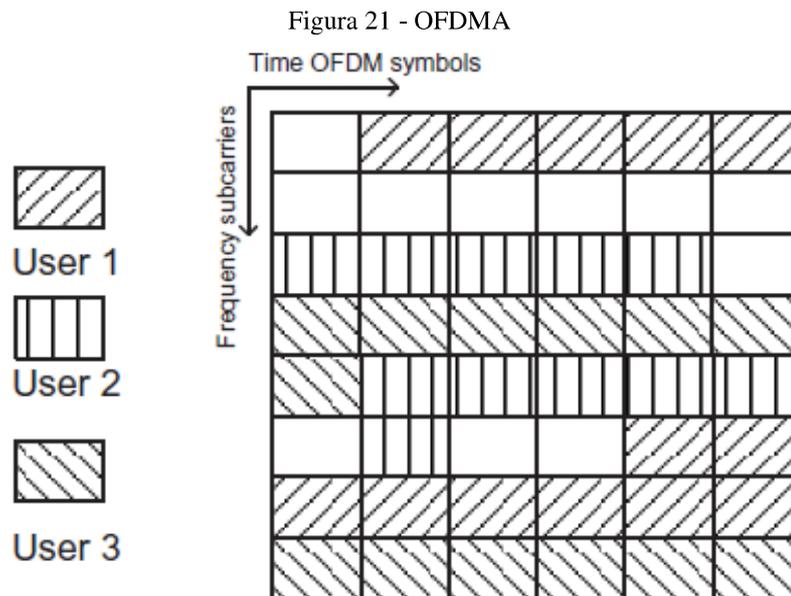


Fonte: Krouk e Semenov (2011)

O uso de subportadoras ortogonais permite que os espectros das subportadoras se sobreponham. Devido à ortogonalidade, é possível recuperar os sinais das subportadoras individuais, apesar dos espectros sobrepostos. O uso das subportadoras ortogonais também

ajuda a diminuir a complexidade da implementação do transmissor e do receptor. No FDM, cada subportadora precisa de um par separado de filtros correspondentes no transmissor e no receptor para possibilitar a eliminação da interferência entre portadoras. No OFDM, a interferência entre as portadoras é eliminada devido à ortogonalidade das subportadoras e não há necessidade de usar filtros separados para cada subportadora. Além disso, essa técnica confere robustez contra a interferência múltiplos percursos (KROUK; SEMENOV, 2011)

Assim, o sistema OFDMA é uma combinação do OFDM com o FDMA, e opera atribuindo um subconjunto de subportadoras a cada usuário, em que o número de subportadoras de um usuário específico pode variar de forma adaptativa em cada quadro, conforme ilustra a Figura 21. Em outras palavras, as subportadoras em cada símbolo OFDM são divididas ortogonalmente entre os vários usuários (CHO *et al.*, 2010)



Fonte: Cho *et al.* (2010)

O OFDMA mantém os benefícios do OFDM em comparação à transmissão digital de uma única portadora, por exemplo, tratamento eficiente da atenuação de multipercursos e melhora a eficiência espectral e a flexibilidade da alocação de recursos em comparação com o FDMA tradicional. Essa flexibilidade pode ser alcançada não apenas pela alocação desigual de subportadoras aos usuários, mas também pela distribuição de subportadoras específicas para um usuário e alocação de energia (KROUK; SEMENOV, 2011).

2.2 Fundamentos do LTE

A crescente demanda por redes de banda larga, ocasionada pela popularização de dispositivos móveis inteligentes no início dos anos 2000, fez com que fosse necessário buscar uma nova tecnologia que oferecesse velocidades de acesso mais rápidas, menor latência, mais capacidade e maior eficiência. Com esse intuito, o padrão LTE foi desenvolvido e devidamente padronizado pelo *Third Generation Partnership Project (3GPP)* em março de 2009 através da *release 8*, sendo a primeira rede comercial LTE estabelecida em dezembro do mesmo ano (HOLMA; TOSKALA, 2012).

O LTE é uma rede de banda larga sem fio totalmente baseada em IP. Como principais tecnologias, utiliza como método de acesso o padrão OFDMA, tratado na seção 2.1.6.4 deste trabalho, e a técnica MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), que será tratada mais adiante. Além disso, faz uso de modulação adaptativa e modulação de taxa alta com o propósito de alcançar a melhor eficiência espectral possível (UMTS FORUM, 2009).

Em 2007, a ITU publicou o padrão *IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications-Advanced)*, que trazia os requisitos para que um serviço fosse classificado como 4G. A tecnologia LTE, considerada a princípio como 4G, não cumpria totalmente esses requisitos. Somente com o 3GPP release 10, também chamado de *LTE-Advanced*, foram alcançadas melhorias na eficiência espectral, nas taxas de pico de dados e na experiência do usuário em relação ao LTE. Com uma taxa máxima de dados de 1 Gbps, em vez dos 300 Mbps alcançados pelo LTE, o *LTE-Advanced* foi então aprovado pela ITU como uma tecnologia *IMT-Advanced* (ZARRINKOUB, 2014). A Tabela2 apresenta a comparação de parâmetros entre o LTE e o *LTE-Advanced* como largura de banda, taxa de transmissão e eficiência espectral tanto para o *downlink*, ou seja, da estação rádio base (ERB) para a estação móvel, quanto para *uplink*, isto é, da estação móvel para a ERB.

Tabela2 - Comparação de taxas teóricas de redes LTE e *LTE-Advanced*

Parâmetro		LTE (Res. 8)	LTE-A (Res. 10)
Bandas escaláveis		1,4 - 20MHz	20-100MHz
Máx. Banda de Transmissão	Downlink	20MHz	100MHz
	Uplink	20MHz	40MHz
Taxa de Pico	Downlink	300Mbps	1Gbps
	Uplink	75Mbps	500Mbps
Eficiência Espectral	Downlink	15bps/Hz	30bps/Hz
	Uplink	3,75bps/Hz	15bps/Hz

Fonte: Abdullah e Yonis (2012)

Segundo a ITU, diversas bandas de frequências podem ser utilizadas para o LTE/LTE-*Advanced*. As faixas vão desde 450 MHz até 3,6 GHz (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2012). Em geral, são utilizadas as faixas de frequência de 2,5 GHz e 700 MHz para telefonia móvel 4G (IZARIO, 2015). Além disso, outras bandas como 450 MHz e 250 MHz podem ser utilizadas em implementações que necessitem de maior raio de cobertura, como por exemplo, em áreas rurais (TRÓPICO, 2020).

Segundo Izario (2015), a melhor frequência de operação para o LTE é a faixa de 700 MHz. No entanto, esta frequência por muito tempo foi ocupada pela TV analógica. Assim, somente após a transição para a TV digital seria possível a liberação desta porção do espectro, e, então, a destinação por parte da ANATEL da faixa de 698 MHz a 806 MHz para o 4G. Enquanto este processo não estava concluído, a ANATEL disponibilizou para o LTE a faixa de frequências entre 2500 MHz e 2690 MHz.

Atualmente, segundo a ANATEL, e após estudo realizado pelo Grupo de Implantação do Processo de Redistribuição e Digitalização de Canais de TV e RTV (GIRED), todos os municípios brasileiros já possuem viabilidade para a operação do LTE na faixa de 700 MHz. Tal fato possibilita a ampliação da disponibilidade dos serviços de telefonia móvel 4G (ANATEL, 2019).

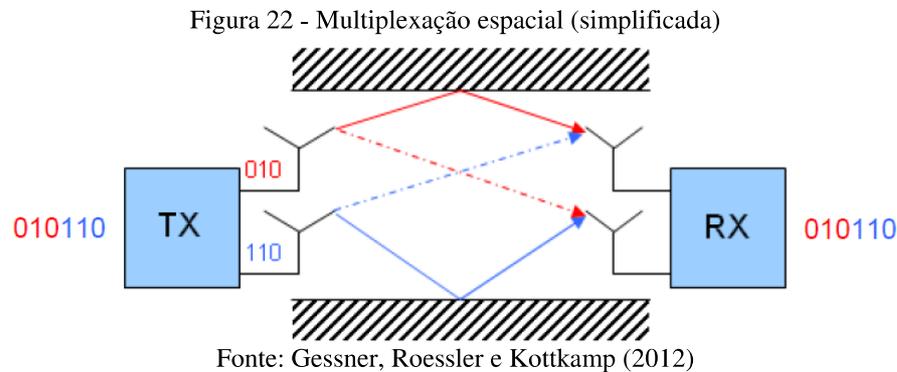
A seguir serão abordadas as principais tecnologias que dão suporte aos padrões LTE e LTE-*Advanced*: MIMO, OFDMA, agregação de portadoras e modulação e codificação adaptativa.

2.2.1 MIMO

A tecnologia MIMO faz uso de múltiplas antenas na transmissão e recepção de sistemas de comunicação sem fio. Apesar da interferência existente entre antenas, o uso de MIMO possibilita a obtenção de ganhos significativos nas taxas de dados, sem a necessidade de empregar maior largura de banda ou potência adicional para a transmissão (YIN; CAVALLARO, 2012).

O LTE utiliza sistemas MIMO, o que é fundamental para atingir os seus requisitos de rendimento e eficiência espectral. Em geral são utilizados esquemas 2x2, isto é, duas antenas de transmissão e duas antenas de recebimento. Assim, aproveitando a propagação de multipercurso é possível aumentar a taxa de transmissão e o alcance, ou para reduzir a taxa de erro por *bit*, por meio do envio e recebimento de mais de um sinal no mesmo canal

simultaneamente, o que é chamado multiplexação espacial, conforme ilustrado na Figura 22 (GESSNER; ROESSLER; KOTTKAMP, 2012).



O MIMO também pode ser usado para aumentar a robustez da transmissão de dados através do esquema de diversidade de transmissão. Nele, cada antena transmite o mesmo fluxo de dados, de forma que o receptor obtenha cópias do mesmo sinal. Com isso, obtém-se maior relação sinal-ruído no receptor, garantindo maior robustez do sinal, compensando possíveis atenuações na transmissão (GESSNER; ROESSLER; KOTTKAMP, 2012).

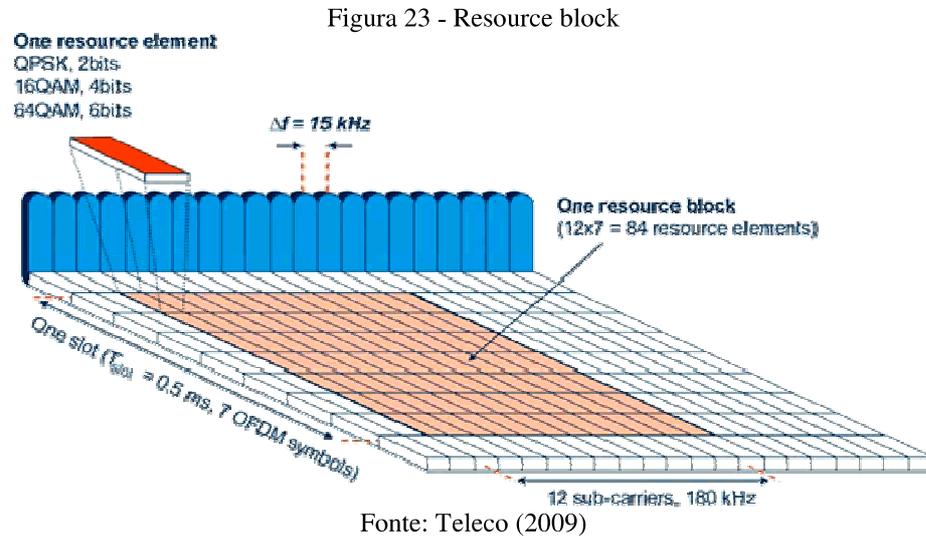
2.2.2 Técnicas de multiplexação e acesso múltiplo

No LTE, as técnicas de multiplexação e acesso múltiplo são implementadas de formas distintas no *downlink* e no *uplink*. Para o *downlink* é utilizado o OFDMA. Já para o *uplink* é empregado o acesso múltiplo por divisão de frequência de uma única portadora, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) (COSTA, 2016).

O OFDMA, conforme apresentado na seção 2.1.6.4 do presente trabalho, se baseia no OFDM para a multiplexação, alocando subportadoras ortogonais sobrepostas para os usuários. Como já mencionado, o uso desta técnica garante um ganho espectral de 50%, além de trazer robustez contra a interferência de multipercursos e pode ser utilizada de forma muito eficiente com um sistema de antenas MIMO.

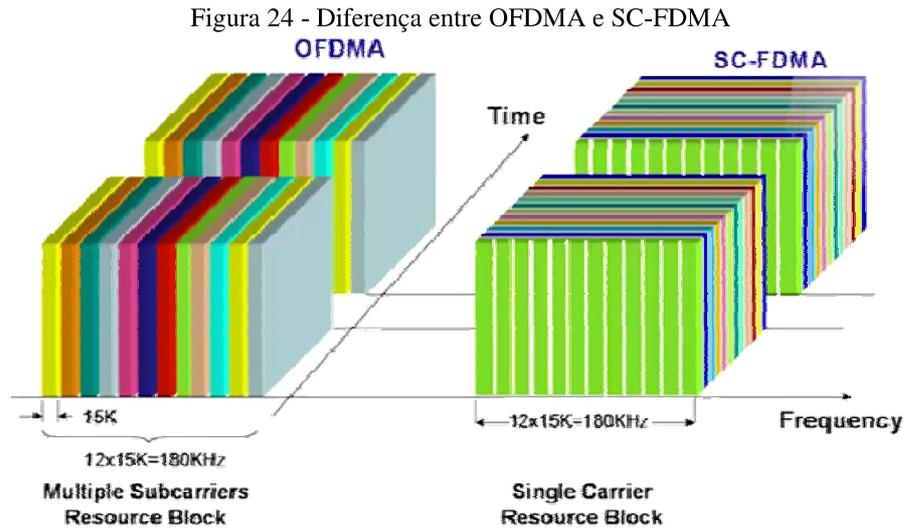
A largura de banda da portadora, que pode chegar a 20 MHz no LTE e até 100 MHz no LTE-Advanced, é dividida em pequenas subportadoras estreitas espaçadas de 15 kHz. Estas são divididas em grupos com doze subportadoras, com sete símbolos OFDM cada uma, formando um *resource block*. Cada *resource block* tem uma banda de 180 kHz e 0,5 ms de duração no domínio do tempo e é composto por 84 *resource elements*, como apresenta a Figura 23. Nem todos os *resource elements* são empregados para a transmissão de dados,

podendo ser usados também para medidas de qualidade dos canais de *downlink* ou *uplink*, por exemplo (MORAES, 2015).



A técnica OFDMA permite que diversos usuários compartilhem não somente a largura de banda disponível no domínio da frequência, mas também no domínio do tempo. Essa flexibilidade permite configurações apropriadas para diferentes alocações de banda, taxas de codificação e métodos de modulação por usuário, bem como para diversos recursos de comunicação. A vantagem dessa técnica, além das já citadas, como a robustez à propagação em multipercurso e a redução da complexidade dos transmissores e receptores, está na possibilidade de organizar os recursos de rádio em uma grade de tempo e frequência, provendo maior flexibilidade aos algoritmos de controle do enlace e de alocação de recursos (RODOVALHO, 2017).

A técnica SC-FDMA, utilizada para o *uplink*, é semelhante ao OFDMA, porém com uma implementação diferente, conforme ilustra a Figura 24. Tal tecnologia consiste em transmitir uma única subportadora modulada por vez, por um determinado tempo, ao invés de transmitir diversos sinais simultaneamente como no OFDMA. Isto reduz os picos de potência nos amplificadores durante a transmissão dos dados com uma implementação mais simples e mais barata. Tal prática se traduz em economia de energia, mantendo os benefícios do OFDM, como a resiliência aos multipercursos e a alocação flexível de subportadoras (HOLMA; TOSKALA, 2012).



Fonte: 4G-LTE/LTE-A (2014)

2.2.3 Agregação de portadoras

A agregação de portadoras é técnica mais inovadora do *LTE-Advanced*, que permite, do ponto de vista da camada física, a agregação de diversas parcelas do espectro disponível. Com isso é possível aumentar expressivamente a banda de transmissão de uma estação por meio do emprego de múltiplas portadoras ao mesmo tempo (RODOVALHO, 2017).

Em outras palavras, trata-se da transmissão simultânea de portadoras de múltiplos componentes em paralelo entre terminais, e é usada para suportar larguras de banda maiores que 20 MHz. As portadoras componentes não precisam ser contíguas no espectro de frequências e podem estar localizados em diferentes faixas de frequência, a fim de possibilitar a exploração de fragmentos de espectro por meio de sua agregação (INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION, 2001).

Esta técnica possibilita, então, que o *LTE-Advanced* suporte uma largura de banda de até 100 MHz, satisfazendo os requisitos exigidos pelo *IMT-Advanced*. Uma vez que raramente uma parcela contínua tão grande do espectro estará disponível, duas ou mais portadoras, cada uma com uma largura de banda de até 20 MHz, podem ser agregadas, atingindo uma largura de banda máxima de 100 MHz (HASSANEIN; TAHA; ALI, 2012; SHEN *et al.*, 2012).

2.2.4 Modulação e codificação adaptativa

O LTE faz uso da técnica de Modulação e Codificação Adaptativa, ou *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), para melhorar a eficiência e a robustez da transmissão. Esta técnica ajusta os parâmetros do sinal, particularmente a modulação e a taxa de codificação, com base no estado do canal. Por exemplo, caso as condições do canal sejam boas, a ordem de modulação e a taxa de codificação são aumentadas para obter maiores taxas de transmissão. Por outro lado, se o canal estiver ruidoso, uma ordem de modulação mais baixa será usada junto com uma taxa de codificação menor, a fim de garantir robustez ao sinal (MORAES, 2015).

Dessa forma, para valores altos de SNR são utilizadas constelações de alta ordem, como 16-QAM ou 64-QAM, podendo chegar a 256-QAM, proporcionando alta taxa de transmissão. Aliado a isso, são utilizadas maiores taxas de codificação, ou seja, menos *bits* de redundância, o que implica em menos sobrecarga de proteção de dados e, portanto, maior eficiência no processo de decodificação. Em contrapartida, para valores baixos de SNR são empregadas constelações pequenas, como o QPSK. Nesse caso, são adotadas menores taxas de codificação, isto é, mais *bits* de redundância na transmissão, tornando o sinal mais robusto. Sendo assim, a técnica de modulação e codificação adaptativa proporciona uma utilização máxima do canal, garantindo ao mesmo tempo eficiência e confiabilidade na transmissão (RODOVALHO, 2017).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a classificação da pesquisa realizada no presente trabalho e os métodos de coleta e tratamento de dados empregados visando atingir os objetivos já apresentados anteriormente.

3.1 Classificação da Pesquisa

Inicialmente, este estudo pode ser considerado uma pesquisa quantitativa, segundo Dias e Silva (2010), uma vez que se baseará na análise de dados quantitativos e na realização de simulações empregando modelos matemáticos. Além disso, esta monografia também pode ser classificada conforme os critérios a seguir:

3.1.1 Quanto aos fins

Este trabalho pode ser classificado, quanto aos fins, como uma pesquisa descritiva. Segundo Gil (2002), esse tipo de pesquisa tem por objetivo a descrição das características de determinado fenômeno e se utiliza de técnicas padronizadas de coleta de dados. A pesquisa pode ainda ser classificada como aplicada, de acordo com Vergara (2016), tendo em vista que tem finalidade prática, ou seja, está inserida em um contexto, sendo motivada pela resolução de uma questão real.

3.1.2 Quanto aos meios

Com base nos procedimentos técnicos utilizados, o presente trabalho pode ser classificado, segundo os critérios de Vergara (2016), como bibliográfica e de laboratório. O primeiro se justifica pela utilização, no desenvolvimento deste estudo, de material já publicado, como teses, artigos científicos e livros. O segundo se baseia no fato de se fazer uso de simulações em computador para a obtenção dos resultados alcançados nesta monografia.

3.2 Coleta e Tratamento de Dados

Os dados para este trabalho foram obtidos, inicialmente, a partir dos cálculos para dimensionamento de um enlace LTE. Os parâmetros utilizados baseiam-se na dissertação

“Comparação do sistema LTE operando na faixa de 2,5 GHz e 700 MHz” de Bruno Rodrigues Ferraz Izario (2015). Além desses, outros parâmetros intrínsecos aos sistemas de comunicação LTE foram utilizados para a obtenção dos dados necessários ao estudo.

A partir dos valores de tempo de símbolo, próprio do símbolo OFDM utilizado no LTE, o número de *bits* referente à modulação utilizada, o número de subportadoras, que depende da largura de banda adotada e a taxa de codificação empregada, é possível chegar aos valores de *throughput* do enlace para cada combinação dos parâmetros citados. Utilizando esses valores e a largura de banda pode-se, então, a partir da Lei de Shannon, calcular a relação sinal-ruído requerida para cada modulação utilizada.

Assim, com base no SNR requerido e fazendo uso dos demais parâmetros do enlace, foram realizadas as simulações no *Radio Mobile*. Este *software* trata-se de uma ferramenta usada na previsão do desempenho de enlaces de radio. Ele utiliza dados de relevo para modelar o perfil do terreno entre as estações e, juntamente com parâmetros estatísticos, ambientais e do sistema, faz uso do modelo de propagação *Longley-Rice*, permitindo a predição do nível de sinal recebido por uma estação (RADIO MOBILE, 2019).

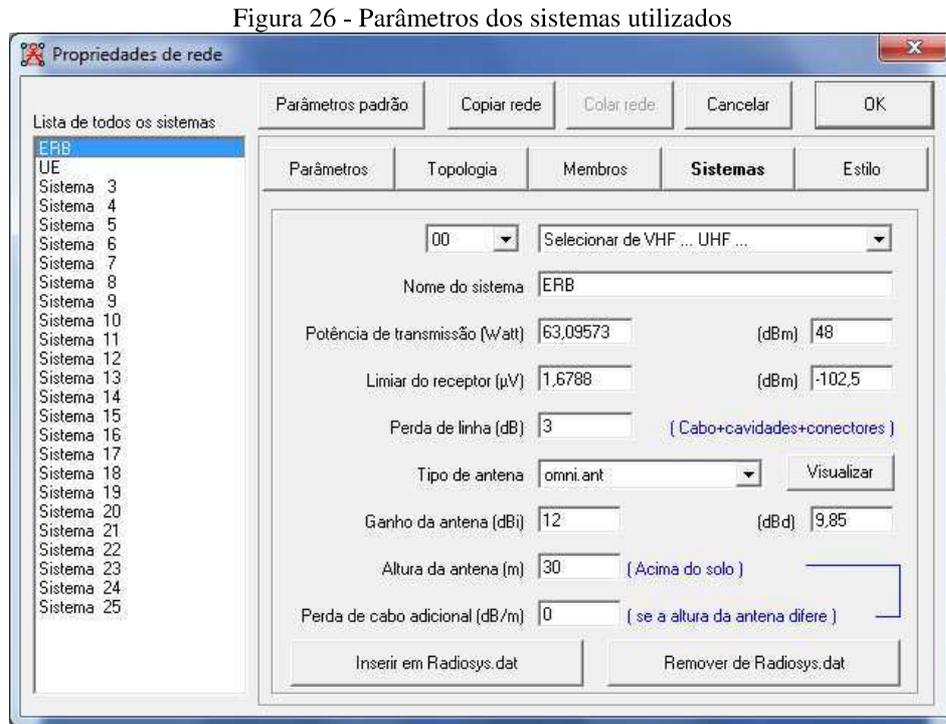
Neste estudo as simulações foram separadas de acordo com as frequências de operação de 700 e 450 MHz. Para cada caso, são inseridos os parâmetros da rede, como frequência, informação sobre o clima e dados de refratividade da superfície, condutividade do solo e permissividade média do solo, conforme exemplificado na Figura 25 para a rede de 700 MHz.

Figura 25- Parâmetros da rede

The image shows a screenshot of the 'Propriedades de rede' (Network Properties) dialog box in the Radio Mobile software. The dialog has a title bar with a close button (X) and a list of networks on the left. The 'Parâmetros' tab is selected, showing various configuration options. The network name is 'Rede 700'. The minimum frequency is 700 MHz and the maximum frequency is 700 MHz. The surface refractivity is 350 N-Units, soil conductivity is 5 S/m, and average soil permittivity is 81. The polarization is set to Vertical. The statistical mode is 'Móvel' (Mobile) with 70% of situations. The climate is 'Temperado marítimo sobre o mar' (Temperate maritime over the sea).

Fonte: Elaborado pelo autor

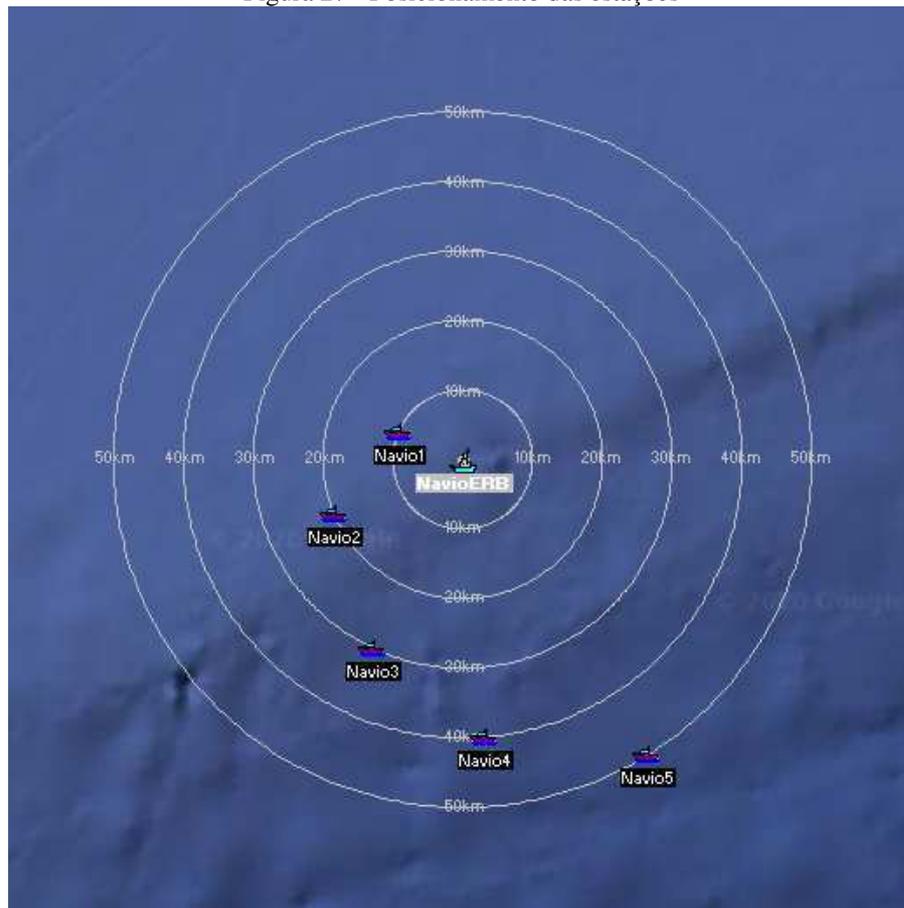
Após isso, são inseridas as informações dos sistemas utilizados pela ERB e pelas estações móveis, como potência de transmissão, limiar do receptor, perda de linha, ganho da antena e sua altura, por exemplo. A Figura 26 ilustra esse procedimento, utilizando como exemplo o sistema da ERB.



Fonte: Elaborado pelo autor

Estando configuradas as redes e os sistemas a serem utilizados, são então posicionadas as estações. Neste estudo foi utilizado um navio como ERB, sendo considerada a altura da antena de 30 m. Como estações móveis, foram empregados cinco navios dispostos ao redor da ERB, afastados desta de 10, 20, 30, 40 e 50 km. A altura adotada para as antenas das estações móveis foi de 15 m. Tendo em vista que o sistema proposto é de aplicação estritamente marítima, a simulação foi realizada com um afastamento de cerca de 100 km do litoral, de forma a não haver interferência com os sistemas terrestres. A Figura 27 apresenta o posicionamento das estações para as simulações.

Figura 27 - Posicionamento das estações



Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, cada um dos valores de relação sinal-ruído encontrados é somado ao valor de sensibilidade dos receptores, resultando no valor utilizado como limiar do receptor. Finalmente são realizadas as simulações, gerando para cada frequência e cada valor de SNR um diagrama de cobertura, onde é possível visualizar o alcance da rede, relacionando a este um valor de *throughput*. Adicionalmente foi realizada uma simulação com um obstáculo a fim de verificar a consequência de uma obstrução entre os navios.

3.3 Limitações do Método

Tendo em vista que a simulação em computador se dá por modelos de propagação estáticos, os resultados não são afetados por todas as variáveis de um ambiente real. Fatores como vento, o estado do mar provocando ondas que possam atuar como obstáculo ou gerando movimentos excessivos nas antenas e obstruções causadas pelos próprios navios não são consideradas. Além disso, o modelo *Longley-Rice*, utilizado no *Radio Mobile*, possui algumas limitações, como por exemplo, não levar em conta o desvanecimento por multipercurso.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O sistema proposto no presente trabalho, cuja viabilidade é analisada neste capítulo, trata-se de um enlace de dados utilizando a tecnologia LTE entre navios operando em conjunto. Tal enlace pode ser útil não só para a comunicação entre os navios envolvidos, mas também possibilitaria que um navio que não possui equipamentos de comunicação via satélite obtivesse acesso à internet por meio de um navio que dispusesse de tais recursos.

Em um cenário típico, um navio de maior porte e de maior valor estratégico para a força, denominado Corpo Principal, estaria preferencialmente posicionado no centro da formatura. Sendo o Corpo Principal o navio alocado para atuar como ERB, sua posição central é particularmente interessante do ponto de vista da cobertura, uma vez que pode favorecer o alcance aos demais navios envolvidos.

Desta forma, nas simulações realizadas neste estudo serão adotados navios como estações receptoras em distâncias que variam entre 10 km e 50 km da ERB, a fim de verificar a viabilidade de cobertura do sistema proposto.

4.1 Cálculo de throughput e relação sinal-ruído

Para o dimensionamento do sistema, inicialmente é calculada a máxima perda de propagação permitida para que ele opere satisfatoriamente. Vale ressaltar que devem ser feitos os cálculos para *downlink* e *uplink* separadamente, uma vez que os parâmetros em cada um dos sentidos são distintos. Para este cálculo será utilizada a Equação 17 (IZARIO, 2015).

$$L = P_{tx} + G_{tx} - L_{tx} - SNR_{req} - S_{rx} + G_{rx} - L_{rx} + G_{dv} - M \quad (17)$$

onde, L - Máxima perda no espaço livre [dB];

P_{tx} - Potência de transmissão [dBm];

G_{tx} - Ganho da antena de transmissão [dBi];

L_{tx} - Perdas na transmissão [dB];

SNR_{req} - Relação sinal-ruído requerida [dB];

S_{rx} - Sensibilidade na recepção [dB];

G_{rx} - Ganho da antena de recepção [dBi];

L_{rx} - Perdas na recepção [dB];

G_{dv} - Ganho de diversidade [dBi];

M - Margem de desvanecimento [dB].

A máxima perda para o sistema corresponde ao menor valor de perda no espaço livre encontrada comparando-se *downlink* e *uplink* e é adotado para o cálculo do raio de alcance de uma ERB. Nos itens a seguir serão demonstrados os cálculos de perda para o *downlink* e para o *uplink*.

4.1.1 Máxima perda no *downlink*

Os parâmetros adotados para o cálculo de máxima perda no *downlink* são relacionados a seguir:

Potência de transmissão: 48 dBm;
 Ganho da antena transmissora: 12 dBi;
 Perdas na transmissão: 3 dB;
 SNR: 0 dB;
 Ganho da antena receptora: 12 dBi;
 Perdas na recepção: 0 dB;
 Ganho de diversidade: 0 dB;
 Margem de desvanecimento: 5 dB;
 Sensibilidade na recepção: -92 dBm.

Cabe mencionar que, conforme Izario (2015), o valor da sensibilidade requerida na recepção de -92 dBm trata-se do pior caso, ou seja, a maior sensibilidade requerida e corresponde à maior largura de banda possível no sistema (20 MHz). Tal cálculo deve ser feito para o pior caso, uma vez que, se o sistema operar com outras larguras de bandas, perde-se a cobertura.

Aplicando os valores relacionados acima na Equação 17, determina-se o valor de máxima perda no *downlink*:

$$L_{downlink} = 48 + 12 - 3 - 0 - (-92) + 12 - 0 + 0 - 5$$

$$L_{downlink} = 156 \text{ dB}$$

4.1.2 Máxima perda no *uplink*

Os parâmetros adotados para o cálculo de máxima perda no *uplink* são relacionados a seguir:

Potência de transmissão: 30 dBm;
 Ganho da antena transmissora: 12 dBi;
 Perdas na transmissão: 0 dB;
 SNR: 0 dB;
 Ganho da antena receptora: 12 dBi;
 Perdas na recepção: 3 dB;
 Ganho de diversidade: 0 dB;
 Margem de desvanecimento: 5 dB;
 Sensibilidade na recepção: -101,5 dBm.

Semelhantemente ao caso anterior, a sensibilidade adotada de -101,5 dBm corresponde ao pior caso. Aplicando este valor juntamente com os demais acima relacionados à Equação 17, determina-se o valor de máxima perda no *uplink*:

$$L_{uplink} = 30 + 12 - 0 - 0 - (-101,5) + 12 - 3 + 0 - 5$$

$$L_{uplink} = 147,5 \text{ dB}$$

Assim, comparando-se os valores obtidos de máxima perda no espaço livre conclui-se que o *uplink* corresponde ao sentido limitante do enlace, pois se esse valor de perda for atingido o enlace deixa de funcionar adequadamente. Assim, para os demais cálculos, inclusive para as simulações no *Radio Mobile*, é levado em conta o pior caso, ou seja, o enlace de *uplink*.

4.1.3 Cálculo do throughput máximo

Para o cálculo do *throughput*, é considerado o tempo de símbolo (71,367 s para um símbolo OFDM), o número de *bits* em cada modulação utilizada e o número de subportadoras disponíveis, o que depende da largura de banda do sistema. A Equação 18 é utilizada para o cálculo do *throughput* (IZARIO,2015).

$$\text{Throughput} = 1/T_s \times N_b \times S_p \quad (18)$$

onde, T_s – Tempo de símbolo [s];

N_b – Número de *bits*;

S_p – Número de subportadoras.

Neste trabalho serão utilizadas as modulações QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Conforme já mencionado anteriormente, tais modulações transportam, respectivamente, dois, quatro e seis *bits* por símbolo. Acerca do número de subportadoras, a Tabela 3 apresenta o seu valor para cada largura de banda.

Tabela 3- Relação entre largura de banda e subportadoras

Largura de banda [MHz]	Número de subportadoras
5	300
10	600
15	900
20	1200

Fonte: Adaptado de Holma e Toskala(2012).

Assim, utilizando a Equação 18, o tempo de símbolo OFDM, o número de *bits* transportado e o número de subportadoras por modulação, pode-se calcular o *throughput* para cada largura de banda em cada uma das modulações utilizadas. Os valores de *throughput* são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4-Throughput para QPSK, 16-QAM e 64-QAM

Largura de banda [MHz]	Modulação	Throughput [Mbps]
5	QPSK	8,4
5	16-QAM	16,8
5	64-QAM	25,2
10	QPSK	16,8
10	16-QAM	33,6
10	64-QAM	50,4
15	QPSK	25,2
15	16-QAM	50,4
15	64-QAM	75,7
20	QPSK	33,6
20	16-QAM	67,9
20	64-QAM	100,9

Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, além dos fatores já considerados até então, deve ser levada em conta a taxa de código, que indica, em cada tipo de modulação, quantos *bits* são utilizados para transportar a informação em cada símbolo (IZARIO, 2015). A Tabela 5 apresenta as taxas de código utilizadas para cada modulação:

Tabela 5 - Taxas de código utilizadas

Modulação	Taxa de código
QPSK	1/2
QPSK	3/4
16-QAM	1/2
16-QAM	3/4
64-QAM	1/2
64-QAM	2/3
64-QAM	3/4
64-QAM	5/6

Fonte: Izario (2015)

Por exemplo, para uma modulação 64-QAM, que pode transmitir 6 *bits* por símbolo, caso seja utilizada uma taxa de código 5/6, apenas 5 *bits* de informação são transmitidos juntamente com 1 *bit* de redundância.

Assim, levando em consideração a taxa de codificação, o cálculo do *throughput* é realizado através da Equação 19, apresentada a seguir:

$$\text{Throughput} = 1/T_s \times N_b \times S_p \times R_c \quad (19)$$

onde, T_s – Tempo de símbolo [s];

N_b – Número de *bits*;

S_p – Número de subportadoras;

R_c – Taxa de códigos de modulação.

Dessa forma, utilizando a Equação 19 e os demais parâmetros citados, pode-se calcular o *throughput* levando em consideração a taxa de código, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6-*Throughput* levando em consideração a taxa de código

Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	<i>Throughput</i> [Mbps]
5	QPSK	1/2	4,2
5	QPSK	3/4	6,3
5	16-QAM	1/2	8,4
5	16-QAM	3/4	12,6
5	64-QAM	1/2	12,6
5	64-QAM	2/3	16,8
5	64-QAM	3/4	18,9
5	64-QAM	5/6	21,0
10	QPSK	1/2	8,4
10	QPSK	3/4	12,6
10	16-QAM	1/2	16,8
10	16-QAM	3/4	25,2
10	64-QAM	1/2	25,2
10	64-QAM	2/3	33,6
10	64-QAM	3/4	37,8
10	64-QAM	5/6	42,0
15	QPSK	1/2	12,6
15	QPSK	3/4	18,9
15	16-QAM	1/2	25,2
15	16-QAM	3/4	37,8
15	64-QAM	1/2	37,8
15	64-QAM	2/3	50,4
15	64-QAM	3/4	56,7
15	64-QAM	5/6	63,1
20	QPSK	1/2	16,8

Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	Throughput [Mbps]
20	QPSK	3/4	25,2
20	16-QAM	1/2	33,6
20	16-QAM	3/4	50,4
20	64-QAM	1/2	50,4
20	64-QAM	2/3	67,3
20	64-QAM	3/4	75,7
20	64-QAM	5/6	84,1

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores acima correspondem, portanto, a capacidade máxima do canal para cada combinação possível de largura de banda, modulação e taxa de código.

4.1.4 Cálculo da relação sinal-ruído requerida

A partir da Lei de Shannon, já apresentada anteriormente neste trabalho, sabe-se que a capacidade máxima de um canal depende da largura de banda utilizada e da relação sinal-ruído no meio. Assim, com base nos resultados encontrados na subseção anterior aplicados à Equação 16 é possível encontrar a relação sinal-ruído requerida para cada modulação utilizada, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7- Relação sinal-ruído requerida

Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	SNR	SNR [dB]
5	QPSK	1/2	0,7909	-1,02
5	QPSK	3/4	1,3968	1,45
5	16-QAM	1/2	2,2075	3,44
5	16-QAM	3/4	4,7445	6,76
5	64-QAM	1/2	4,7445	6,76
5	64-QAM	2/3	9,2881	9,68
5	64-QAM	3/4	12,7681	11,06
5	64-QAM	5/6	17,4254	12,41
10	QPSK	1/2	0,7909	-1,02
10	QPSK	3/4	1,3968	1,45
10	16-QAM	1/2	2,2075	3,44
10	16-QAM	3/4	4,7445	6,76
10	64-QAM	1/2	4,7445	6,76
10	64-QAM	2/3	9,2881	9,68
10	64-QAM	3/4	12,7681	11,06

Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	SNR	SNR [dB]
10	64-QAM	5/6	17,4254	12,41
15	QPSK	1/2	0,7909	-1,02
15	QPSK	3/4	1,3968	1,45
15	16-QAM	1/2	2,2075	3,44
15	16-QAM	3/4	4,7445	6,76
15	64-QAM	1/2	4,7445	6,76
15	64-QAM	2/3	9,2881	9,68
15	64-QAM	3/4	12,7681	11,06
15	64-QAM	5/6	17,4254	12,41
20	QPSK	1/2	0,7909	-1,02
20	QPSK	3/4	1,3968	1,45
20	16-QAM	1/2	2,2075	3,44
20	16-QAM	3/4	4,7445	6,76
20	64-QAM	1/2	4,7445	6,76
20	64-QAM	2/3	9,2881	9,68
20	64-QAM	3/4	12,7681	11,06
20	64-QAM	5/6	17,4254	12,41

Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando a Tabela 7 nota-se a existência de apenas sete valores possíveis para a relação sinal-ruído no sistema em questão e que o SNR depende apenas das modulações e taxas de código utilizadas. Assim, podemos reordenar a tabela acima conforme a Tabela 8.

Tabela 8 - Relação entre SNR, modulação e taxa de código

Modulação	Taxa de código	SNR [dB]
QPSK	1/2	-1,02
QPSK	3/4	1,45
16-QAM	1/2	3,44
16-QAM	3/4	6,76
64-QAM	1/2	6,76
64-QAM	2/3	9,68
64-QAM	3/4	11,06
64-QAM	5/6	12,41

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, é possível relacionar todas as informações obtidas, de forma que, a partir de cada combinação dos valores de SNR, modulação, taxa de código e largura de banda possa ser obtido um respectivo *throughput*, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Valor de *throughput* a partir do SNR e da largura de banda

SNR [dB]	Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	<i>Throughput</i> [Mbps]
-1,02	5	QPSK	1/2	4,2
-1,02	10	QPSK	1/2	8,4
-1,02	15	QPSK	1/2	12,6
-1,02	20	QPSK	1/2	16,8
1,45	5	QPSK	3/4	6,3
1,45	10	QPSK	3/4	12,6
1,45	15	QPSK	3/4	18,9
1,45	20	QPSK	3/4	25,2
3,44	5	16-QAM	1/2	8,4
3,44	10	16-QAM	1/2	16,8
3,44	15	16-QAM	1/2	25,2
3,44	20	16-QAM	1/2	33,6
6,76	5	16-QAM	3/4	12,6
6,76	10	16-QAM	3/4	25,2
6,76	15	16-QAM	3/4	37,8
6,76	20	16-QAM	3/4	50,4
6,76	5	64-QAM	1/2	12,6
6,76	10	64-QAM	1/2	25,2
6,76	15	64-QAM	1/2	37,8
6,76	20	64-QAM	1/2	50,4
9,68	5	64-QAM	2/3	16,8
9,68	10	64-QAM	2/3	33,6
9,68	15	64-QAM	2/3	50,4
9,68	20	64-QAM	2/3	67,3
11,06	5	64-QAM	3/4	18,9
11,06	10	64-QAM	3/4	37,8
11,06	15	64-QAM	3/4	56,7
11,06	20	64-QAM	3/4	75,7
12,41	5	64-QAM	5/6	21,0
12,41	10	64-QAM	5/6	42,0
12,41	15	64-QAM	5/6	63,1
12,41	20	64-QAM	5/6	84,1

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se então que, para uma determinada combinação de modulação e taxa de código, quanto maior a largura de banda maior o valor de *throughput*. De igual forma, para uma dada largura de banda, o aumento número de *bits* por símbolo ou da taxa de código proporcionam o aumento do *throughput*.

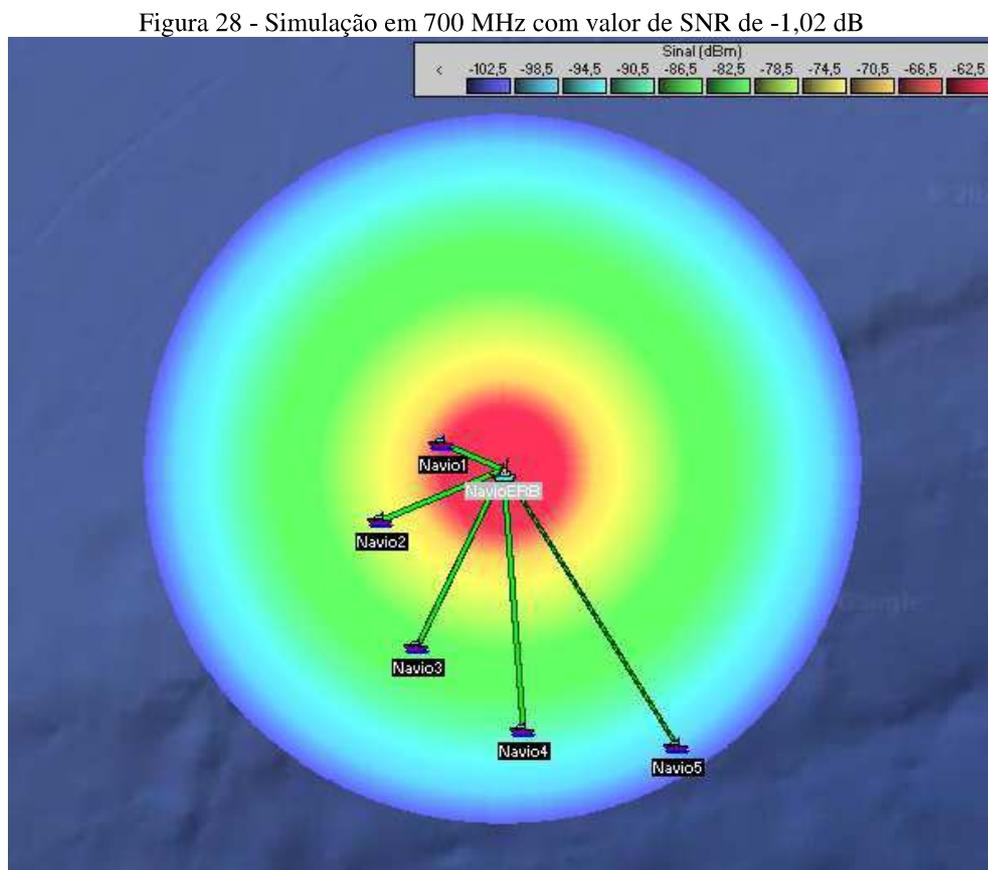
4.2 Cálculo de cobertura

Nesta seção do trabalho serão apresentadas as simulações realizadas no *software Radio Mobile* a fim de determinar a cobertura de uma rede LTE baseada em um navio nas frequências de 700 e 450 MHz. Para tal, serão utilizados os parâmetros apresentados em 4.1.1 e em 4.1.2, além dos valores de SNR obtidos em 4.1.4. Quanto às estações, adotou-se como ERB um navio de maior porte, considerando a antena localizada a 30 metros de altura e como estações móveis navios um pouco menores, admitindo-se que a antena esteja a 15 metros de altura.

Para cada valor de SNR existente será apresentado o diagrama de cobertura do sistema gerado, através do qual será possível estimar o seu raio de alcance. Por fim, serão relacionados os raios de cobertura com os valores de *throughput* alcançáveis.

4.2.1 Simulação em 700MHz

a) SNR = -1,02 dB

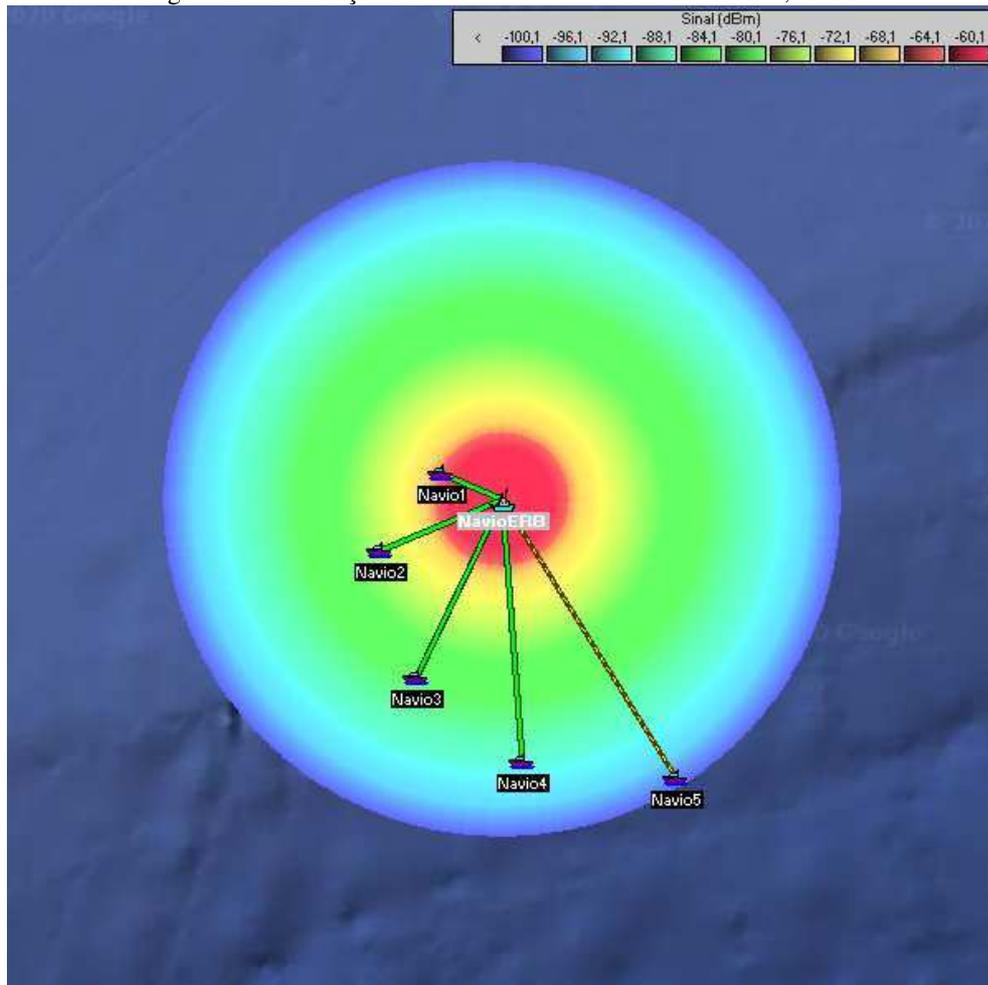


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o valor de SNR igual a $-1,02$ dB, apresentado na Figura 28, que equivale à modulação QPSK com taxa de código igual a $1/2$, obtém-se um alcance máximo de 55 km. Para essa situação pode ser alcançado o *throughput* de 4,2 Mbps, 8,4 Mbps, 12,6 Mbps e 16,8 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

b) SNR = 1,45 dB

Figura 29 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 1,45 dB

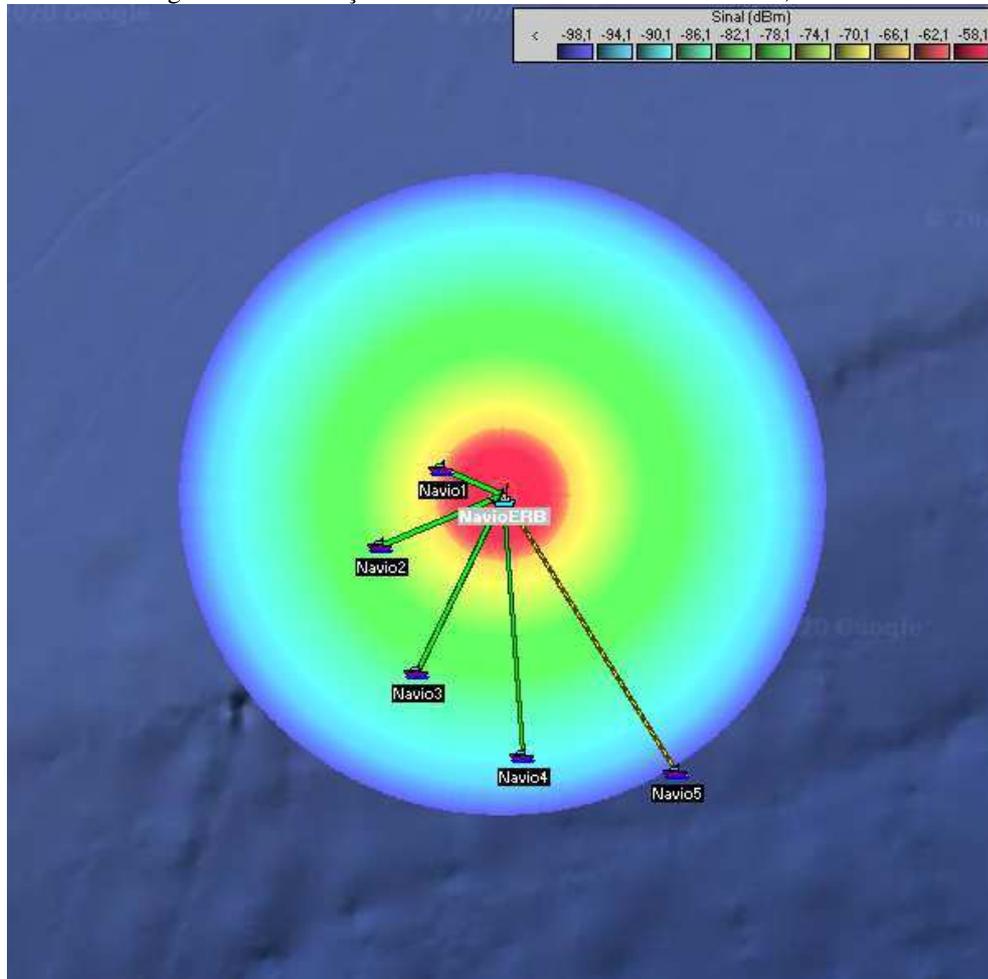


Fonte: Elaborado pelo autor

Com SNR igual a 1,45 dB, ilustrado na Figura 29, correspondente à modulação QPSK com taxa de código igual a $3/4$, é possível atingir um alcance máximo de 51 km. Nessa situação pode-se obter o *throughput* de 6,3 Mbps, 12,6 Mbps, 18,9 Mbps e 25,2 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

c) SNR = 3,44 dB

Figura 30 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 3,44 dB

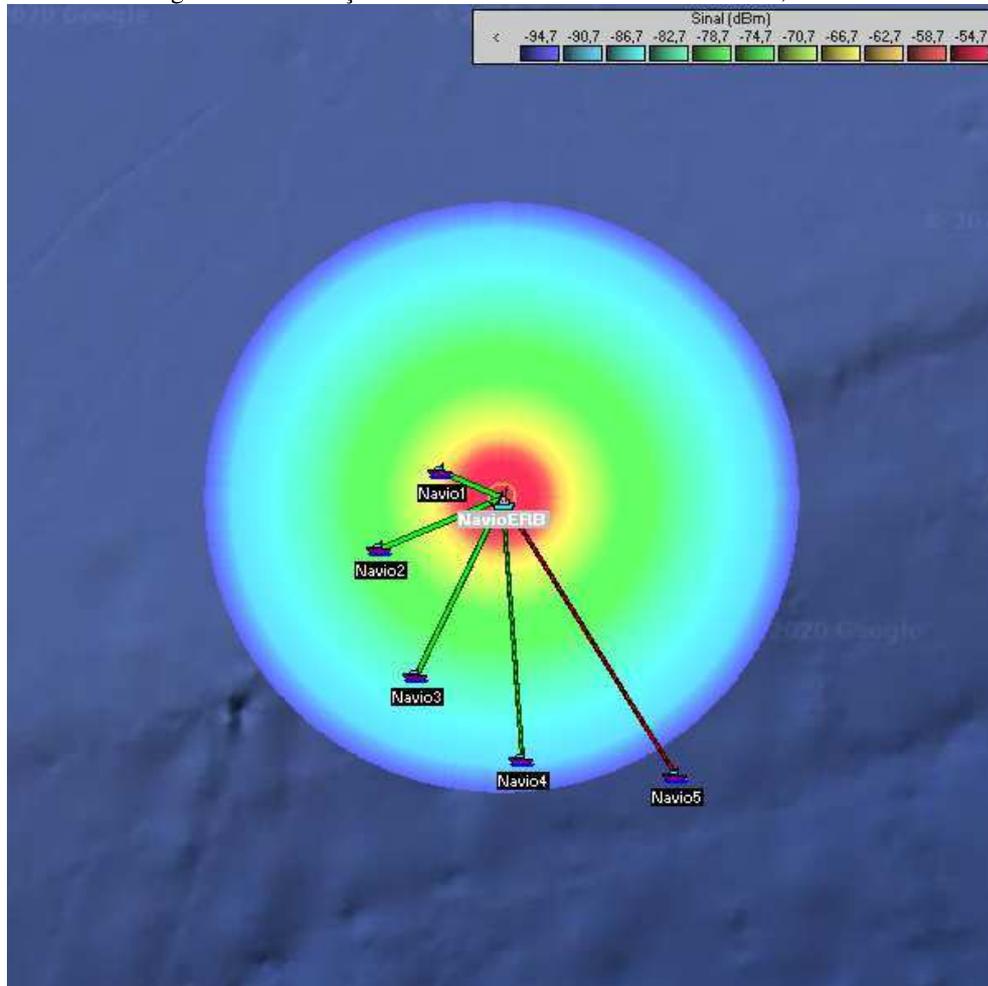


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o valor de sinal-ruído de 3,44 dB, mostrado na Figura 30, equivalente à modulação 16-QAM com taxa de código igual a 1/2, pode-se alcançar uma cobertura máxima de 49 km. Nessa condição pode ser alcançado, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente, o *throughput* de 8,4 Mbps, 16,8 Mbps, 25,2 Mbps e 33,6 Mbps.

d) SNR = 6,76 dB

Figura 31- Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 6,76 dB

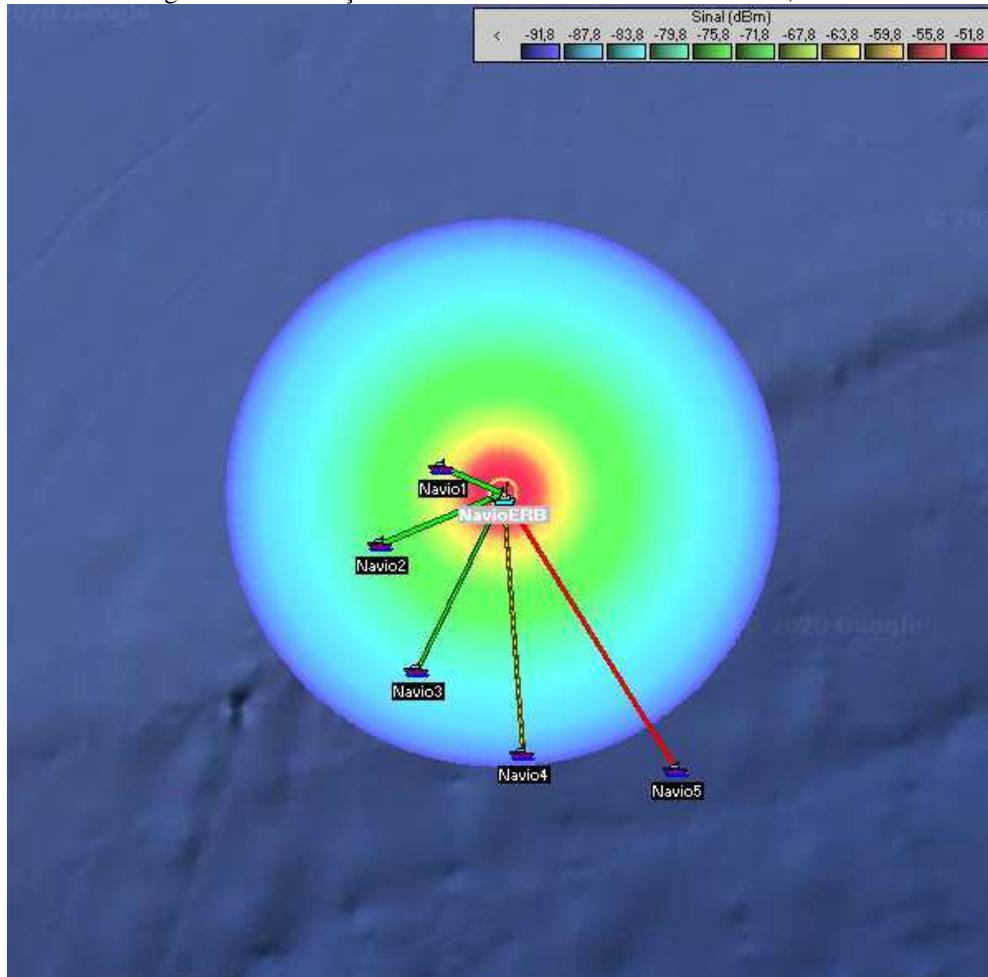


Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma relação sinal-ruído igual a 6,76 dB, conforme apresentado na Figura 31, referente à modulação 16-QAM com taxa de código igual a 3/4 e à modulação 64-QAM com taxa de código igual a 1/2, pode ser obtido um alcance máximo de 45 km. Nessas circunstâncias é possível atingir o *throughput* de 12,6 Mbps, 25,2 Mbps, 37,8 Mbps e 50,4 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

e) SNR = 9,68 dB

Figura 32 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 9,68 dB

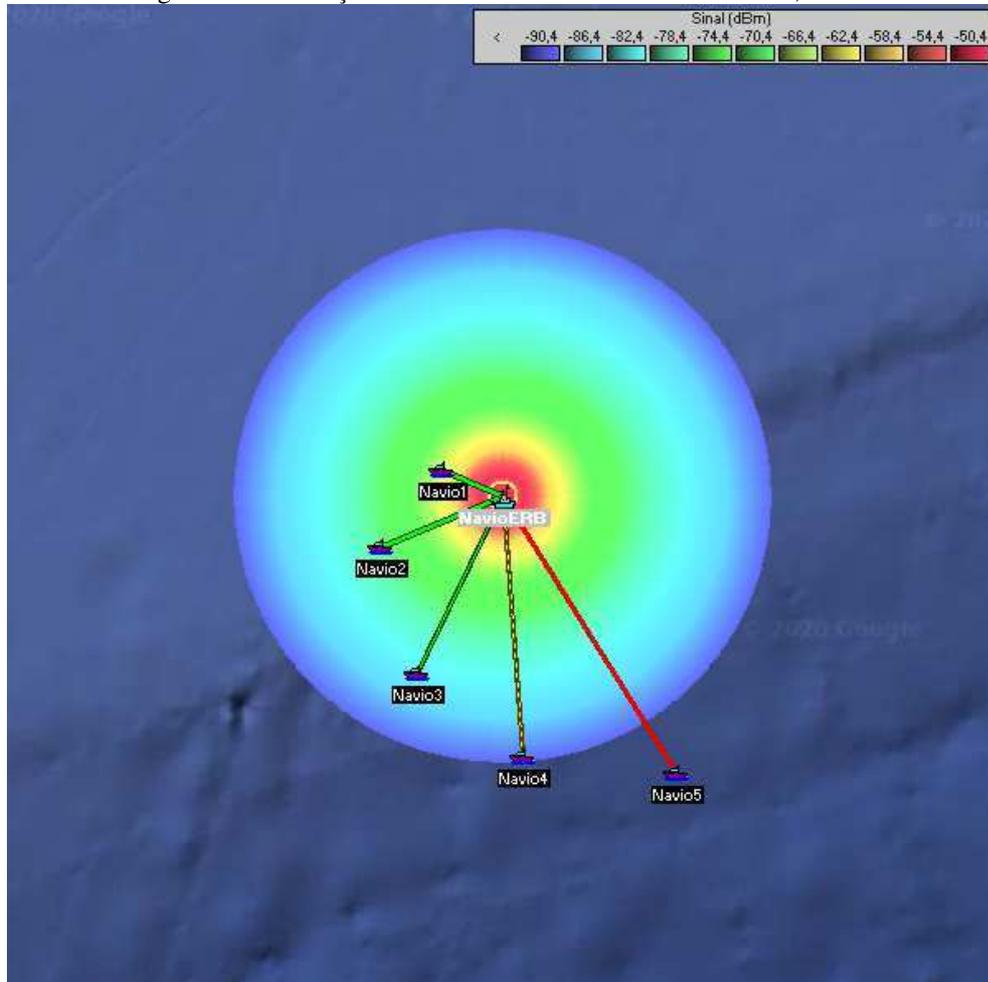


Fonte: Elaborado pelo autor

Para SNR igual a 9,68 dB, exibido na Figura 32, relacionado à modulação 64-QAM com taxa de codificação igual a $2/3$, é possível atingir um alcance máximo de 42 km. Para essa condição pode-se alcançar o *throughput* de 16,8 Mbps, 33,6 Mbps, 50,4 Mbps e 67,3 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

f) SNR = 11,06 dB

Figura 33 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 11,06 dB

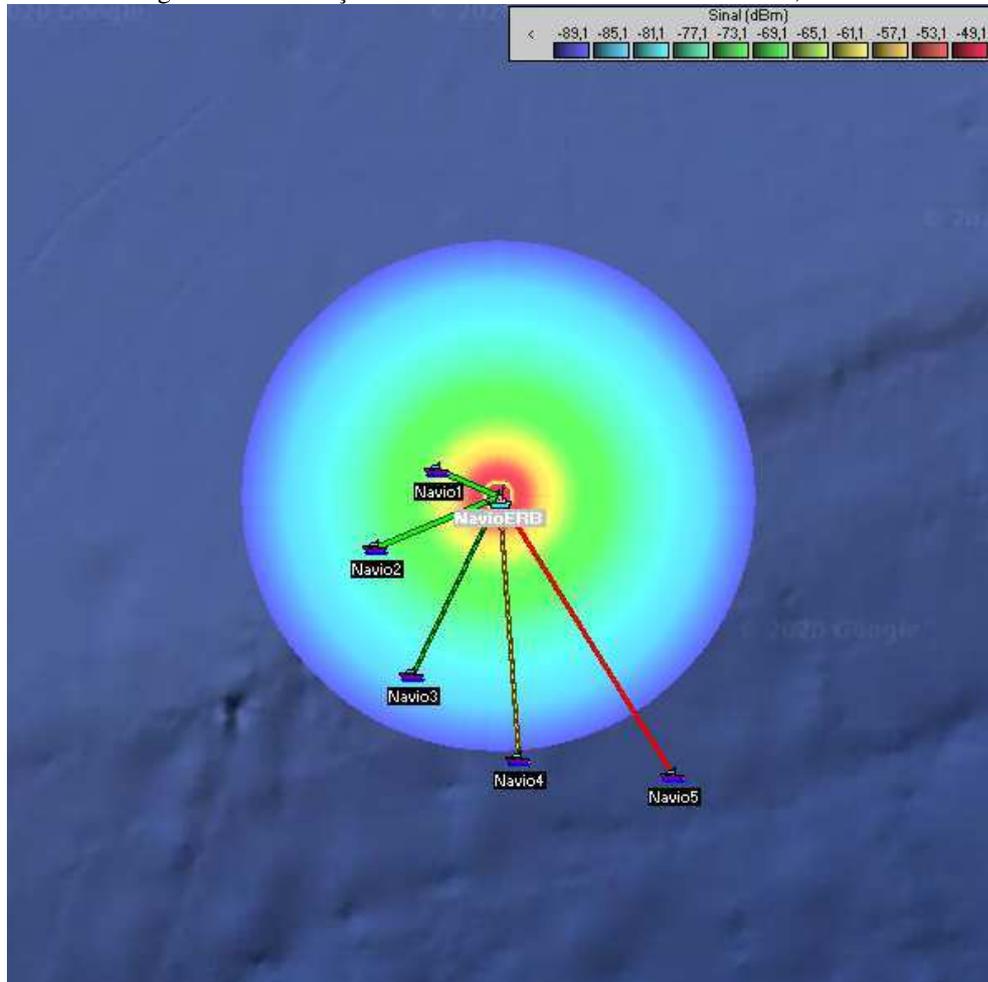


Fonte: Elaborado pelo autor

Com o valor de sinal-ruído igual a 11,06 dB, retratado na Figura 33, alusivo à modulação 64-QAM com taxa de código igual a 3/4, obtém-se uma cobertura máxima de 41 km. Nesse cenário pode ser atingido, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente, o *throughput* de 18,9 Mbps, 37,8 Mbps, 56,7 Mbps e 75,7 Mbps.

g) SNR = 12,41 dB

Figura 34 - Simulação em 700 MHz com valor de SNR de 12,41 dB

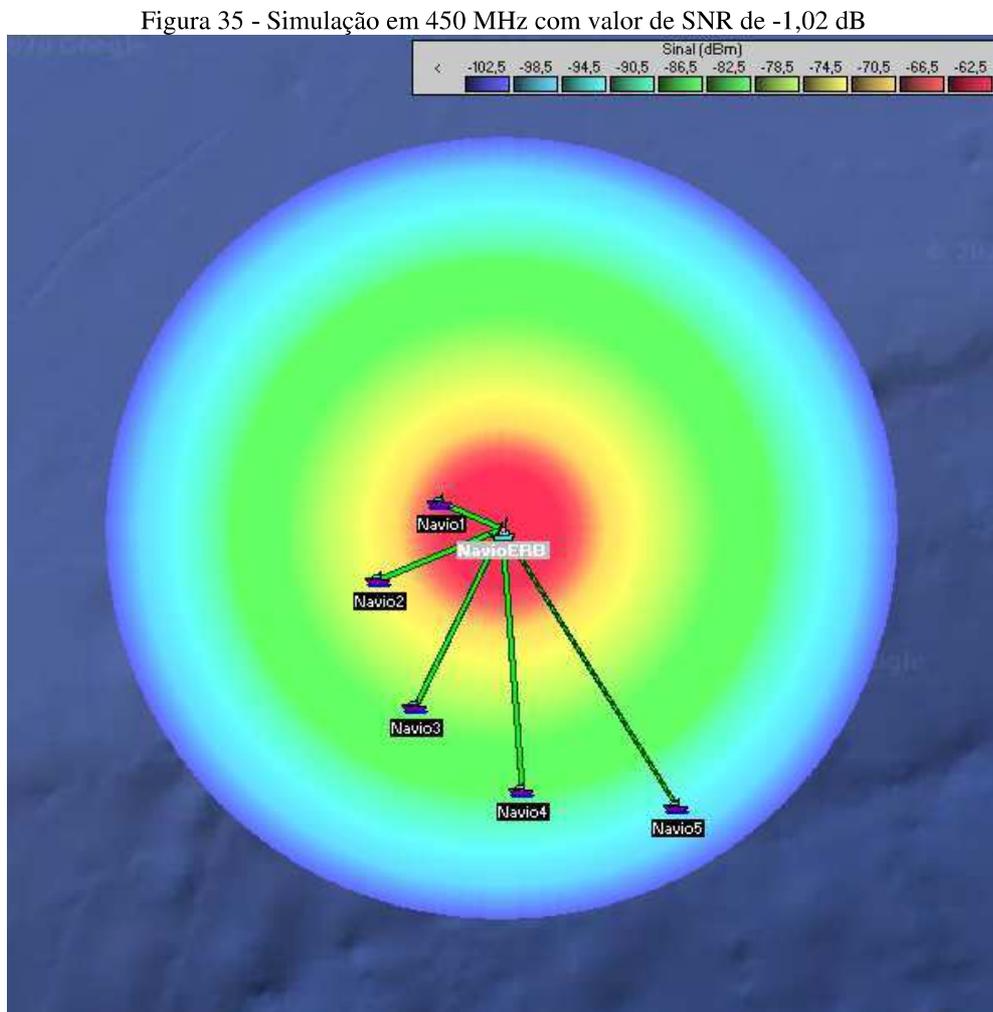


Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma relação sinal-ruído igual a 12,41 dB, conforme ilustrado na Figura 34, que corresponde à modulação 64-QAM com taxa de código igual a 5/6, pode-se atingir um alcance máximo de 39 km. Nessas configurações é possível obter o *throughput* de 21 Mbps, 42 Mbps, 63,1 Mbps e 84,1 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

4.2.2 Simulação em 450MHz

a) SNR = -1,02 dB

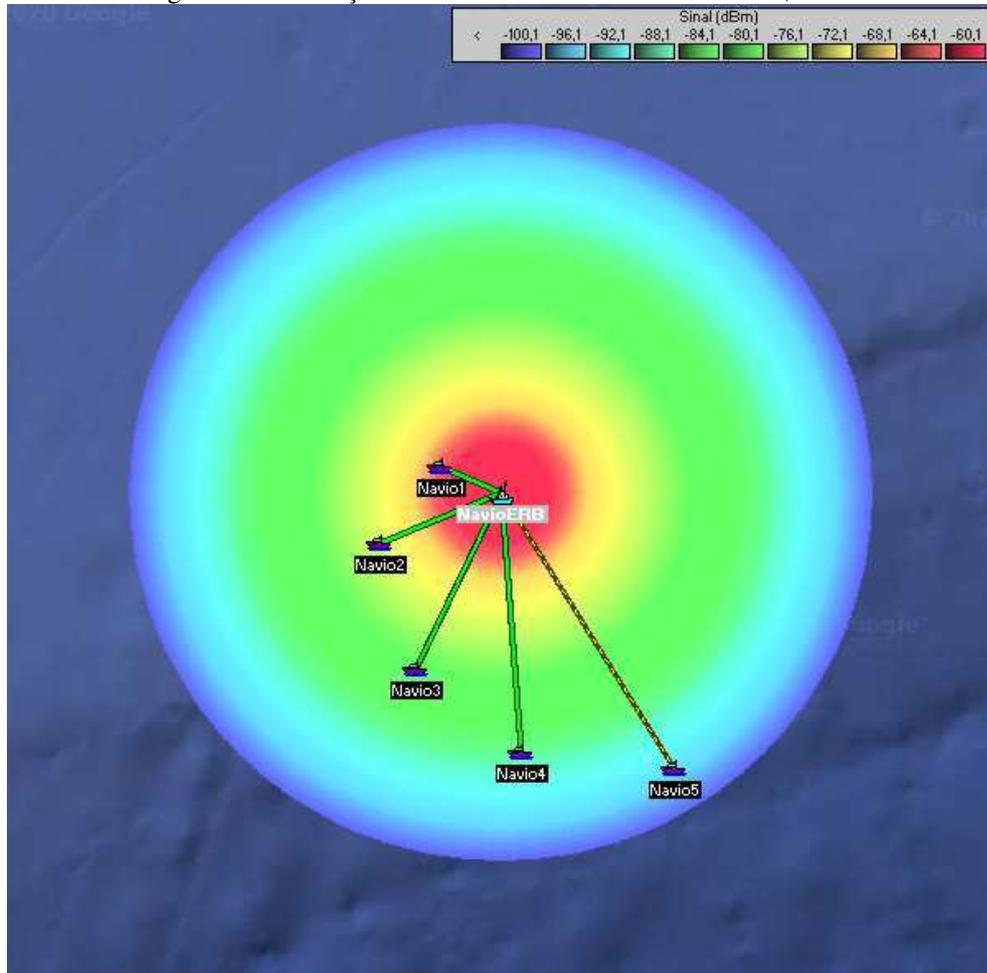


Fonte: Elaborado pelo autor

Para SNR igual a -1,02 dB, ilustrado na Figura 35, equivalente à modulação QPSK com taxa de código igual a $1/2$, pode ser obtida uma cobertura de 60 km. Nessa situação pode ser alcançado o *throughput* de 4,2 Mbps, 8,4 Mbps, 12,6 Mbps e 16,8 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

b) SNR = 1,45 dB

Figura 36 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 1,45 dB

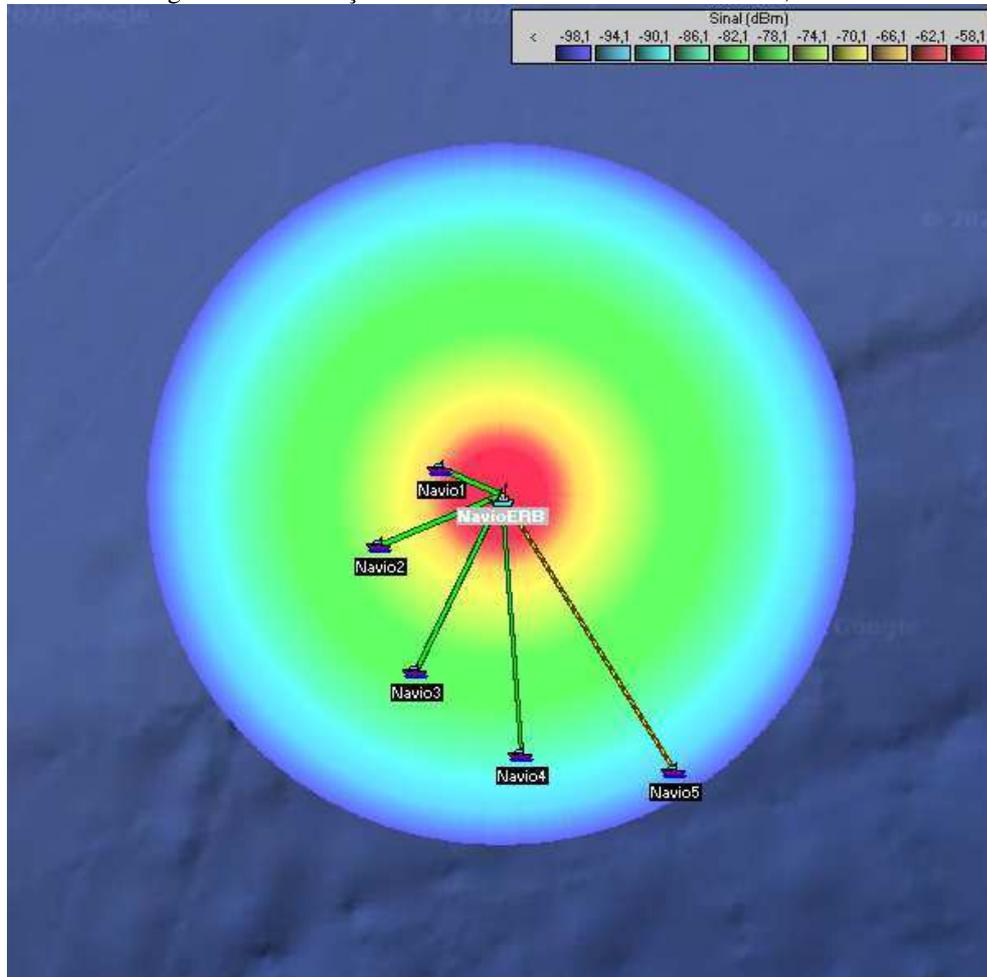


Fonte: Elaborado pelo autor

Com o valor de sinal-ruído igual a 1,45 dB, retratado na Figura 36, relacionado à modulação QPSK com taxa de codificação igual a 3/4, pode-se atingir um alcance máximo de 57 km. Para essa condição pode ser atingido, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente, o *throughput* de 6,3 Mbps, 12,6 Mbps, 18,9 Mbps e 25,2 Mbps.

c) SNR = 3,44 dB

Figura 37 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 3,44 dB

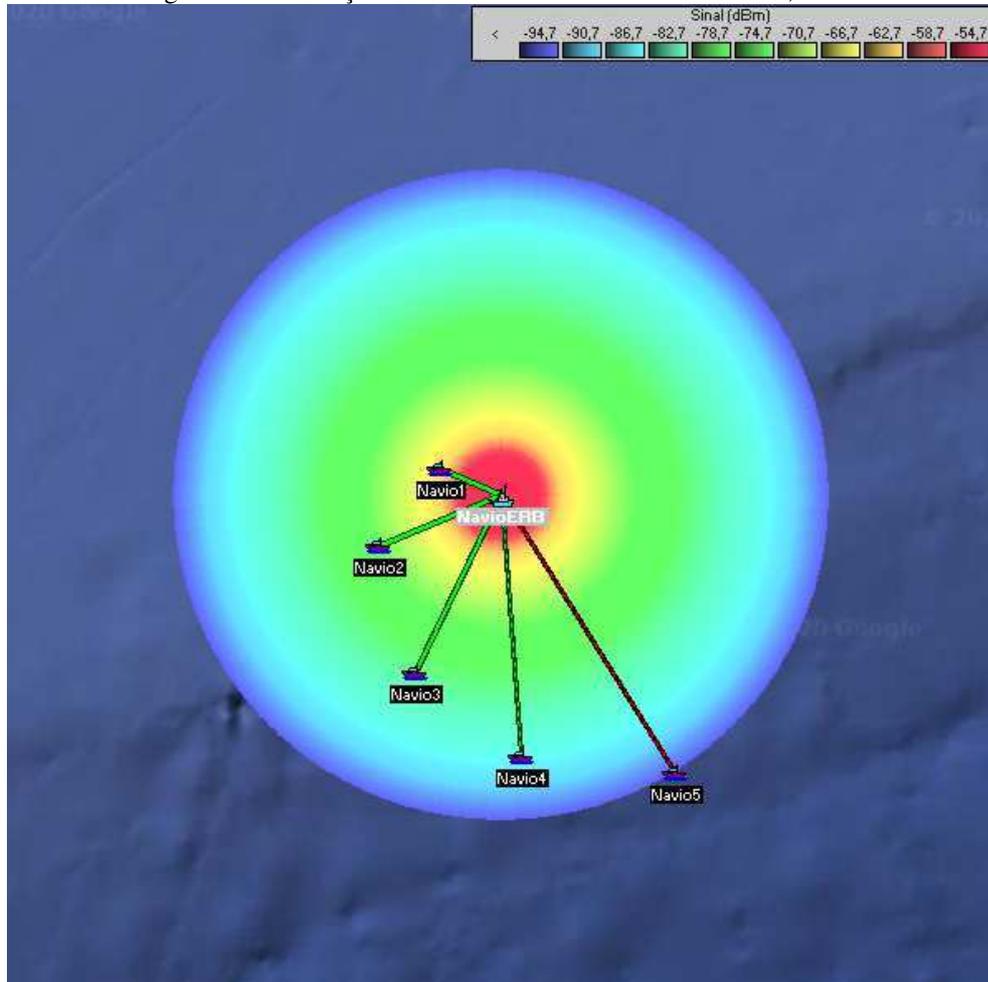


Fonte: Elaborado pelo autor

Para o valor de SNR igual a 3,44 dB, conforme apresentado na Figura 37, que corresponde à modulação 16-QAM com taxa de código igual a 1/2, pode-se alcançar uma cobertura máxima de 54 km. Nessas configurações é possível obter o *throughput* de 8,4 Mbps, 16,8 Mbps, 25,2 Mbps e 33,6 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

d) SNR = 6,76 dB

Figura 38 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 6,76 dB

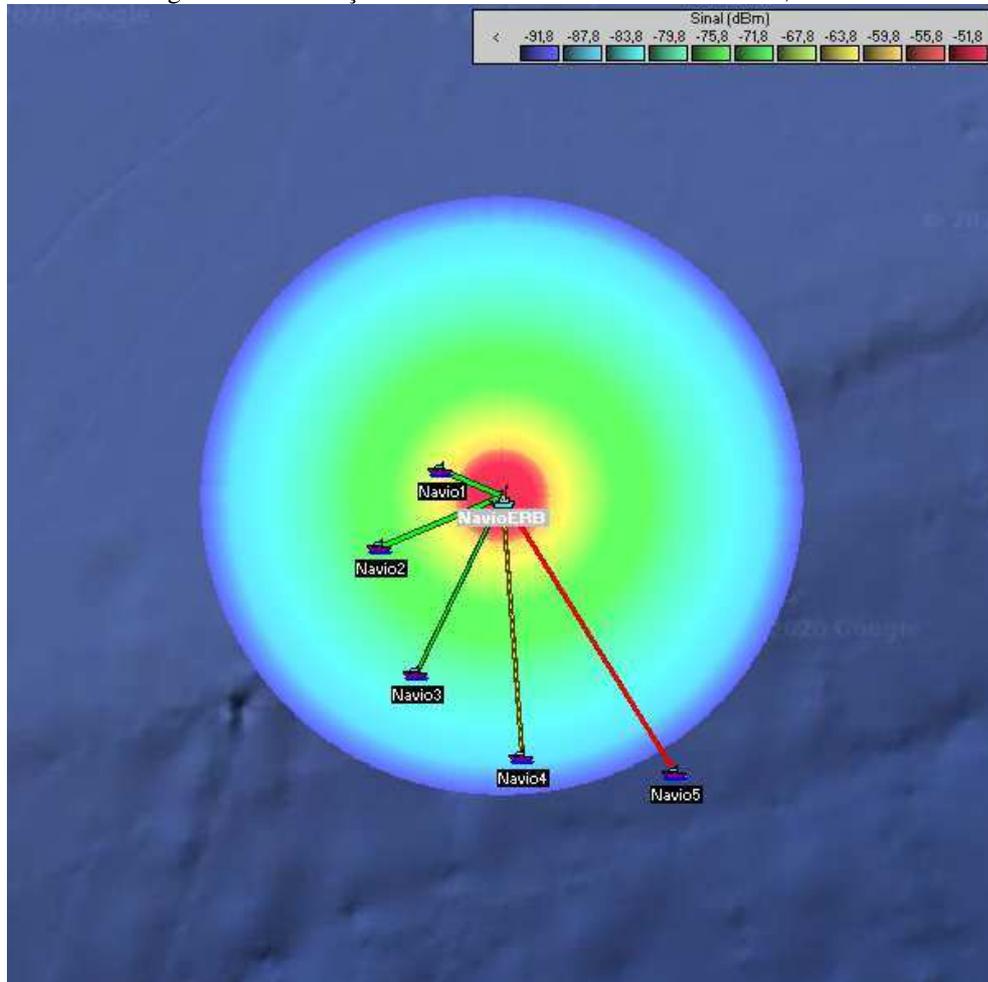


Fonte: Elaborado pelo autor

Com SNR igual a 6,76 dB, mostrado na Figura 38, referente à modulação 16-QAM com taxa de código igual a 3/4 e à modulação 64-QAM com taxa de código igual a 1/2, obtém-se um alcance máximo de 50 km. Nessas circunstâncias pode-se alcançar o *throughput* de 12,6 Mbps, 25,2 Mbps, 37,8 Mbps e 50,4 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

e) SNR = 9,68 dB

Figura 39 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 9,68 dB

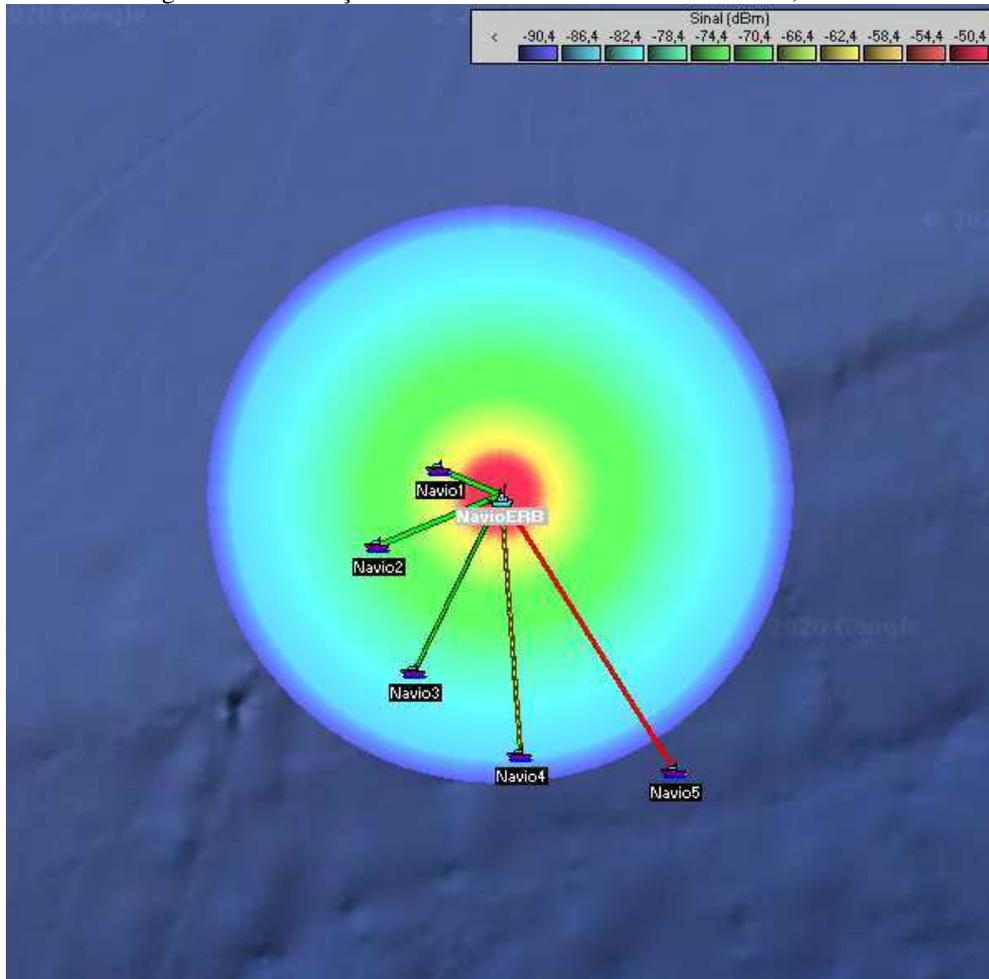


Fonte: Elaborado pelo autor

Para uma relação sinal-ruído igual a 9,68 dB, conforme ilustrado na Figura 39, que equivale à modulação 64-QAM com taxa de codificação igual a 2/3, obtém-se um alcance máximo de 46 km. Para essa situação é possível atingir, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente, o *throughput* de 16,8 Mbps, 33,6 Mbps, 50,4 Mbps e 67,3 Mbps.

f) SNR = 11,06 dB

Figura 40 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 11,06 dB

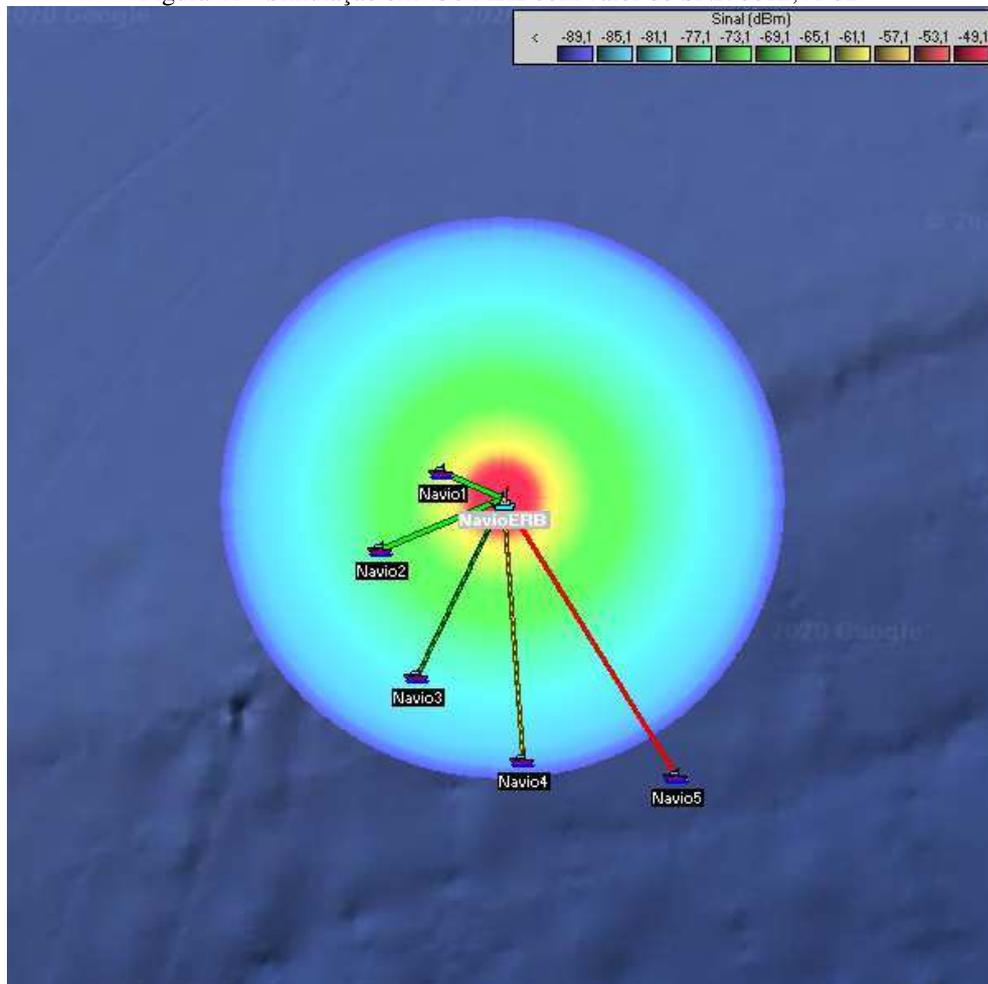


Fonte: Elaborado pelo autor

Com uma relação sinal-ruído igual a 11,06 dB, apresentado na Figura 40, correspondente à modulação 64-QAM com taxa de código igual a 3/4, é possível alcançar uma cobertura máxima de 44 km. Nesse cenário pode ser alcançado o *throughput* de 18,9 Mbps, 37,8 Mbps, 56,7 Mbps e 75,7 Mbps, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente.

g) SNR = 12,41 dB

Figura 41 - Simulação em 450 MHz com valor de SNR de 12,41 dB



Fonte: Elaborado pelo autor

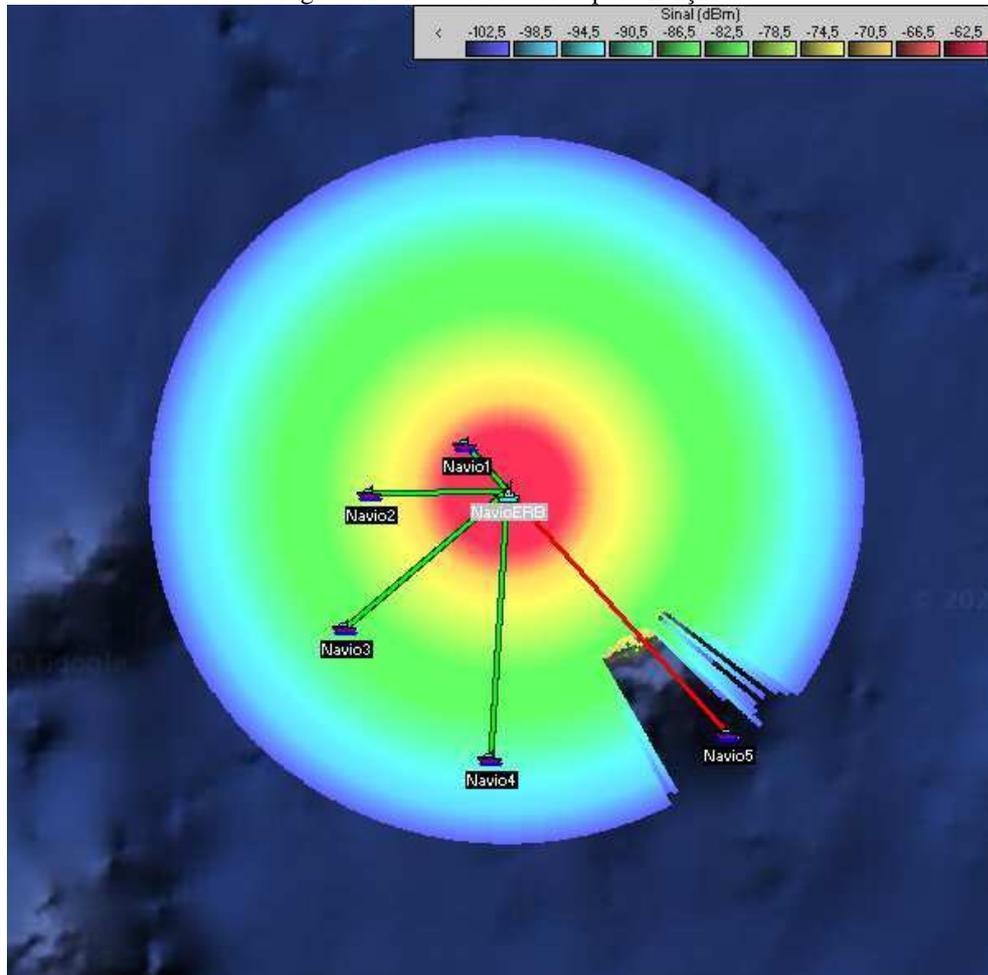
Para o valor de sinal-ruído de 12,41 dB, exibido na Figura 41, alusivo à modulação 64-QAM com taxa de código igual a 5/6, é possível atingir um alcance máximo de 43 km. Nessa condição pode-se obter, para largura de banda igual a 5, 10, 15 e 20 MHz, respectivamente, o *throughput* de 21 Mbps, 42 Mbps, 63,1 Mbps e 84,1 Mbps.

4.2.3 Simulação com obstrução

Nas seções anteriores foi realizada simulação em situação na qual os navios estão suficientemente afastados do litoral ou de qualquer porção de terra que possa obstruir o sinal. Tal condição explica o fato de os diagramas de cobertura terem formato praticamente circular, centrado no NavioERB, uma vez que o modelo de propagação utilizado pelo *software Radio Mobile* adota valores baixos para a irregularidade da superfície da água do mar. No entanto,

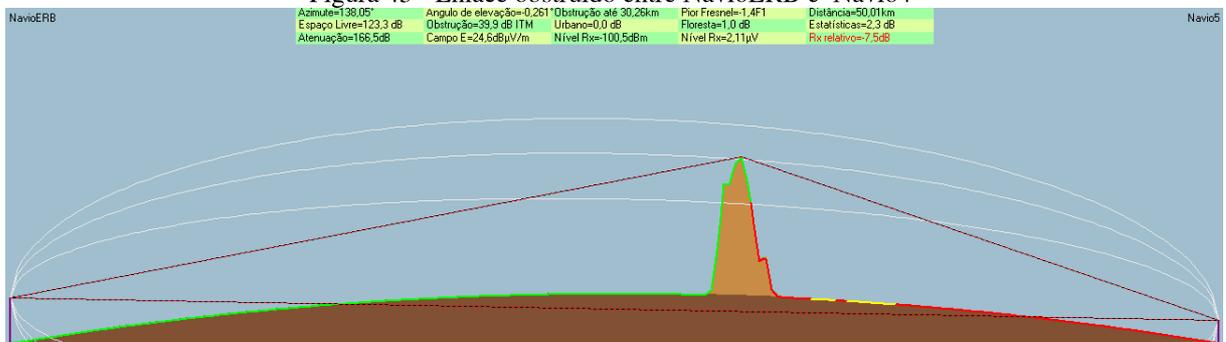
em outros casos é possível que haja algum obstáculo, como uma ilha, entre os navios. O modelo *Longley-Rice*, utilizado pelo *Radio Mobile*, leva em conta o mecanismo de difração, possibilitando realizar a simulação mesmo nesses casos. Essa situação é apresentada a seguir.

Figura 42 - Enlace obstruído por difração



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 43 - Enlace obstruído entre NavioERB e Navio4



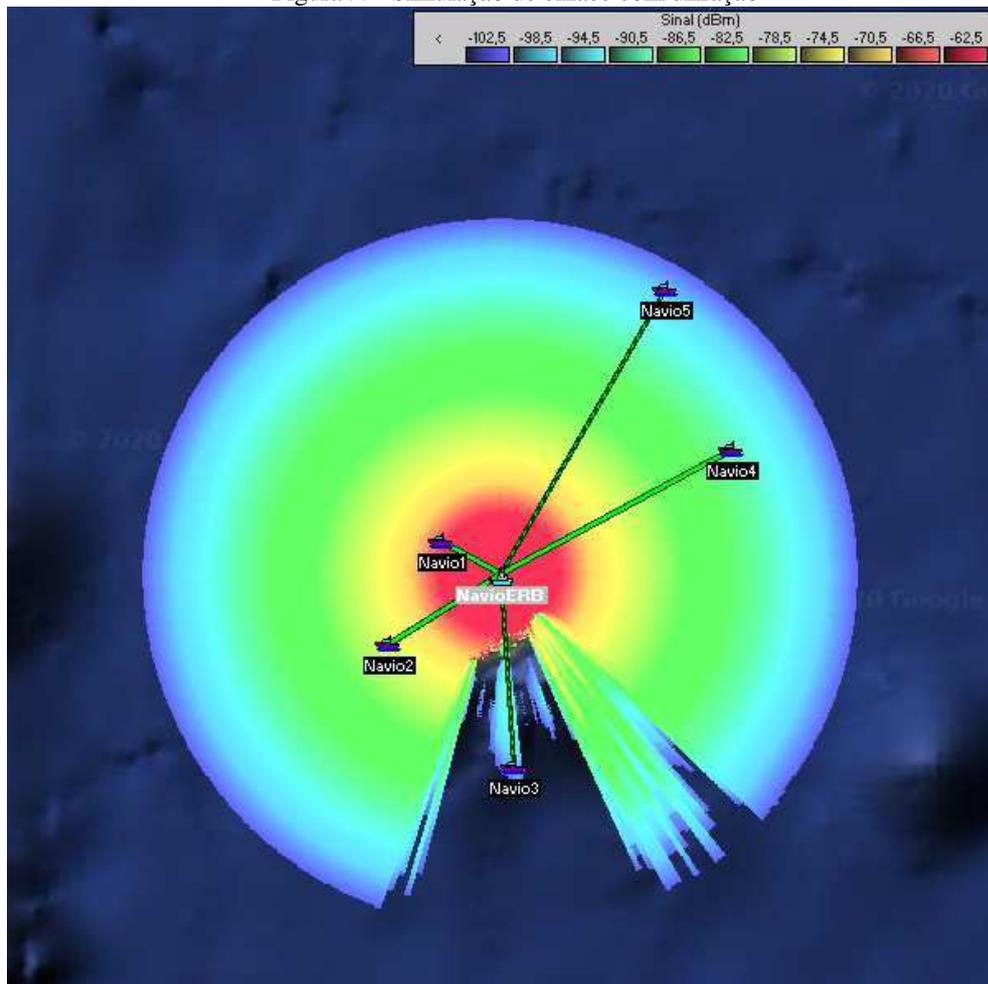
Fonte: Elaborado pelo autor

Nas Figuras 42 e 43 é possível observar que o enlace entre NavioERB e Navio5 foi obstruído pela presença de uma ilha. A situação simulada como exemplo utiliza a faixa de 700

MHz e valor de SNR de -1,02. Nessas configurações, conforme apresentado anteriormente, o alcance máximo seria de 55 km, valor superior ao afastamento do Navio5, que é de 50 km.

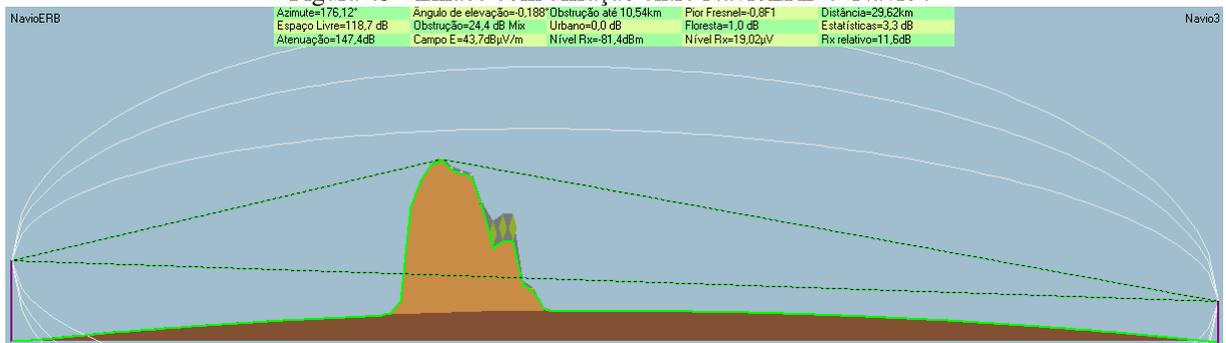
Em outra disposição das estações observa-se a possibilidade do estabelecimento de um enlace mesmo na presença de um obstáculo, conforme ilustrado abaixo.

Figura44 - Simulação de enlace com difração



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45 - Enlace com difração entre NavioERB e Navio4



Fonte: Elaborado pelo autor

Nas Figuras 44 e 45 é possível observar que, apesar do obstáculo entre NavioERB e Navio3, o enlace pôde ser estabelecido. No entanto, percebe-se pelo diagrama de cobertura que somente em determinadas direções e distâncias específicas esse enlace poderia ser completado. No exemplo acima, o alcance de 55 km ficaria reduzido para cerca de 30 km.

Assim, quando há obstáculo entre a ERB e uma estação móvel, mesmo que ela esteja dentro do raio de cobertura, é possível que a difração provoque a interrupção do enlace.

4.2.4 Resultados obtidos

Com base nas simulações realizadas é possível compilar os resultados obtidos de alcance e *throughput* a partir dos parâmetros de largura de banda, modulação, taxa de código e relação sinal-ruído, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10-Alcances obtidos nas simulações para 700 MHz e 450 MHz

Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	SNR [dB]	Throughput [Mbps]	Alcance 700MHz [km]	Alcance 450MHz [km]
5	QPSK	1/2	-1,02	4,2	55	60
5	QPSK	3/4	1,45	6,3	51	57
5	16-QAM	1/2	3,44	8,4	49	54
5	16-QAM	3/4	6,76	12,6	45	50
5	64-QAM	1/2	6,76	12,6	45	50
5	64-QAM	2/3	9,68	16,8	42	46
5	64-QAM	3/4	11,06	18,9	41	44
5	64-QAM	5/6	12,41	21,0	39	43
10	QPSK	1/2	-1,02	8,4	55	60
10	QPSK	3/4	1,45	12,6	51	57
10	16-QAM	1/2	3,44	16,8	49	54
10	16-QAM	3/4	6,76	25,2	45	50
10	64-QAM	1/2	6,76	25,2	45	50
10	64-QAM	2/3	9,68	33,6	42	46
10	64-QAM	3/4	11,06	37,8	41	44
10	64-QAM	5/6	12,41	42,0	39	43
15	QPSK	1/2	-1,02	12,6	55	60
15	QPSK	3/4	1,45	18,9	51	57
15	16-QAM	1/2	3,44	25,2	49	54
15	16-QAM	3/4	6,76	37,8	45	50
15	64-QAM	1/2	6,76	37,8	45	50
15	64-QAM	2/3	9,68	50,4	42	46

Largura de banda [MHz]	Modulação	Taxa de código	SNR [dB]	Throughput [Mbps]	Alcance 700MHz [km]	Alcance 450MHz [km]
15	64-QAM	3/4	11,06	56,7	41	44
15	64-QAM	5/6	12,41	63,1	39	43
20	QPSK	1/2	-1,02	16,8	55	60
20	QPSK	3/4	1,45	25,2	51	57
20	16-QAM	1/2	3,44	33,6	49	54
20	16-QAM	3/4	6,76	50,4	45	50
20	64-QAM	1/2	6,76	50,4	45	50
20	64-QAM	2/3	9,68	67,3	42	46
20	64-QAM	3/4	11,06	75,7	41	44
20	64-QAM	5/6	12,41	84,1	39	43

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Análise dos resultados

A partir dos valores de *throughput* possíveis, é necessário analisar quais aplicações seriam viáveis de utilizar com desempenho satisfatório. As Tabelas 11 e 12 apresentam os requisitos de taxa de transferência para aplicações típicas da internet e para chamadas de vídeo.

Tabela 11 - Requisitos de *throughput* para aplicações da internet

Aplicação	Download [Mbps]	Upload [Mbps]
Email	2	1
VoIP	0,5	0,5
Navegação Web	3	1,5
Vídeo	3	1,5

Fonte: GoBrolly (2018)

Tabela 12 - Requisitos de *throughput* para chamadas no Skype

Tipo de chamada	Download [Mbps]	Upload [Mbps]
Videochamada	1,5	1,5
Videoconferência (3 pessoas)	2	0,5
Videoconferência (5 pessoas)	4	0,5
Videoconferência (7 pessoas)	8	0,5

Fonte: Skype (2020)

Assim, para uma estação de trabalho utilizando apenas email ou navegação web seria suficiente uma taxa de 3 Mbps de *download* e 1,5 Mbps de *upload*. Supondo, em um navio, a

existência de cinco computadores semelhantes com acesso a essa rede, a taxa necessária passaria a ser de 15 Mbps de *download* e 7,5 Mbps de *upload*. Observando a Tabela 10, percebe-se que se trata de um valor de *throughput* alcançável, bastando para isso que a combinação dos demais fatores seja adequada.

No caso de mais computadores serem disponibilizados para acesso ou caso seja autorizada a utilização de outras aplicações simultaneamente, como o acesso a vídeos, naturalmente a taxa requerida passará a ser maior. Assim, para atingir essa nova taxa seria necessário adequar parâmetros do enlace, como por exemplo, usar maior largura de banda ou modulação e taxa de codificação mais altas. No entanto, percebe-se que, nesse caso, o alcance seria diminuído.

É importante observar que, em uma rede já estabelecida, os recursos são finitos e pode não haver flexibilidade em determinados parâmetros. Assim, em caso de necessidade de utilizar uma aplicação com maior requisito de taxa de transmissão, como em uma videoconferência, pode ser necessário interromper o acesso dos demais usuários, com o propósito de direcionar os recursos para uma estação de trabalho específica.

5 CONCLUSÃO

A partir do estudo desenvolvido, é possível perceber que tecnologias de redes de comunicação tradicionalmente terrestres podem ser utilizadas em ambiente marítimo, dada a necessidade de acesso à internet para atender a demandas administrativas.

As simulações realizadas no *software Radio Mobile* demonstraram que é possível atingir uma área de cobertura suficiente para um grupo de navios atuando conjuntamente com a rede proposta. Além disso, mostraram a capacidade de alcançar taxas de transmissão que podem suprir as necessidades de acesso dos navios.

Assim, com base nos experimentos realizados e nos resultados obtidos, comprovou-se a viabilidade da utilização de redes com tecnologia LTE para o enlace entre navios.

5.1 Considerações Finais

É importante relembrar que as simulações não consideram fatores presentes em um ambiente real como vento, o estado do mar e a formação de ondas gerando variações no alcance, obstruções em partes do próprio navio ou reflexões causadas por estes. Apesar disso, os experimentos realizados, em média, permitem alcançar uma boa percepção das possibilidades de áreas de cobertura do sistema proposto.

Outro aspecto relevante é que ainda existe a carência, por parte das agências reguladoras, de documentação normativa a respeito da utilização de determinadas faixas de frequência, de forma a possibilitar a real implementação das redes estudadas neste trabalho.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Como proposta de continuidade deste trabalho, sugere-se que sejam realizados testes em campo, utilizando um grupo de navios dotados de sistemas LTE a fim de verificar o alcance real do equipamento. A partir da comparação com os resultados obtidos nas simulações será possível verificar sua precisão bem como propor ajustes aos modelos utilizados.

Além disso, como sugestão para trabalhos futuros, pode-se estudar a viabilidade de técnicas mais modernas em emergência no cenário atual das telecomunicações, como as tecnologias empregadas na quinta geração (5G) de telefonia móvel.

REFERÊNCIAS

- 4G-LTE/LTE-A. *In: GTA/UFRJ*. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: www.gta.ufrj.br/ensino/ee1879/trabalhos_vf_2014_2/rafaelreis/ofdma_scfdma.html. Acesso em: 12 jan. 2020.
- ABDULLAH, M. F. L.; YONIS, A. Z. Performance of LTE Release 8 and Release 10 in Wireless Communications. **International Conference on Cyber Security, Cyber Warfare and Digital Forensic (CyberSec 2012)**, Kuala Lumpur, Malaysia, p. 236-241, jun. 2012.
- ANATEL. **Gired aprova último estudo de liberação da faixa de 700 MHz**, 18 jun. 2019. Disponível em: www.anatel.gov.br/institucional/component/content/article?id=2303. Acesso em: 18 fev. 2020.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia Nacional de Defesa (END)**. Brasília, DF, 2012.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **MD-31-M-03 Doutrina para o Sistema Militar de Comando e Controle**. 3. ed. Brasília, DF, 2015a.
- BRASIL. Ministério da Defesa. **MD-35-G-01 Glossário das Forças Armadas**. 5. ed. Brasília, DF, 2015b.
- BRUSCATO, G. C.; MORS, P. M. Ensinando Física através do radioamadorismo. *In: MOREIRA, M. A.; VEIT, E. A. (ed.). Textos de Apoio ao Professor de Física*. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, v. 23, n. 4, 2012.
- CHO, Y. S. *et al.* **MIMO-OFDM wireless communications with MATLAB**. Singapore: John Wiley & Sons, 2010. 439p.
- COSTA, V. O. **Alocação de Antenas para Rede Celular de 4G utilizando Algoritmos Meméticos**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional de Sistemas) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2016.
- DIAS, D. S.; SILVA, M. F. **Como Escrever Uma Monografia**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPEAD, 2009. 72p.
- FIGUEIREDO, T. B. **Aplicações de tecnologia sem fio em operações logísticas**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Departamento de Engenharia Industrial, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2004.
- GESSNER, C.; ROESSLER, A.; KOTTKAMP, M. **UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction**. 4. ed. München: Rohde & Schwarz, out. 2012. 115p.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 175p.

GOBROLLY. **Summary of Data and Bandwidth Requirements for Internet Applications**, 2018. Disponível em: gobrolly.com/summary-data-bandwidth-requirements/. Acesso em: 23 fev. 2020.

GUIMARÃES, D. A. Introdução às Comunicações Móveis. **Revista Telecomunicações**, Santa Rita do Sapucaí, v. 1, n. 1, ago. 1998.

HASSANEIN, H. S.; TAHA, A. E. M.; ALI, N. A. **LTE, LTE-Advanced and WiMAX: Towards IMT-Advanced Networks**. UK: John Wiley & Sons, 2012. 304p.

HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE-advanced: 3GPP solution for IMT-advanced**. UK: John Wiley & Sons, 2012. 248p.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Frequency and wavelength bands. **Radio Regulations: Articles**, Genebra, 2016. Disponível em: www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/reg/R-REG-RR-2016-ZPF-E.zip. Acesso em: 27 dez. 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Recommendation ITU-R M.2012-4. **Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-Advanced (IMT-Advanced)**, Genebra, 2019. Disponível em: www.itu.int/rec/R-REC-M.2012-4-201911-I/en. Acesso em: 13 jan. 2020.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Recommendation ITU-R P.526-7. **Propagation by diffraction**, Genebra, 2001. Disponível em: www.itu.int/rec/R-REC-P.526-7-200102-S/en. Acesso em: 29 dez. 2019.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Spectrum for IMT. **Mobile Communications**. Genebra, 2012. Disponível em: www.itu.int/ITU-D/tech/MobileCommunications/Spectrum-IMT.pdf. Acesso em: 19 jan. 2020.

IPPOLITO JR., L. J. **Radiowave Propagation in Satellite Communications**. 1. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. 242p.

IZARIO, B. R. F. **Comparação do sistema LTE operando na faixa de 2,5 GHz e 700 MHz**. 2015. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2015.

KEIN, R. Understanding Spread Spectrum Modulation in RF Systems. **All About Circuits**, 2017. Disponível em: allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-spread-spectrum-modulation-rf-systems/. Acesso em: 3 jan. 2020.

KROUK, E.; SEMENOV, S. **Modulation and coding techniques in wireless communications**. UK: John Wiley & Sons, 2011. 680p.

LATHI, B. P. **Sistemas de Comunicações Analógicos e Digitais Modernos**. Tradução: J. R. Souza. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 862p.

LUIZ, A. V. P. **A evolução tecnológica e sua influência no Sistema Militar de Comando e Controle**: impactos e consequências das novas tecnologias e do SGDC na capacidade do Sistema Militar de Comando e Controle. 2017. Monografia (Curso Superior) - Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2017.

MORAES, R. S. **Aplicação da tecnologia 4G em projetos de telefonia**. 2015. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

PETERSON, R. L.; ZIEMER, R. E.; BORTH, D. E. **Introduction to Spread-Spectrum Communications**. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 695p.

PINHEIRO, R. J. **Tratamento do sinal**. 2016. 20 slides. Disponível em: slidex.tips/download/tratamento-do-sinal-prof-ricardo-j-pinheiro. Acesso em: 2 jan. 2020.

RADIO MOBILE. **About**, 2019. Disponível em: www.ve2dbe.com/rme.html. Acesso em: 22 fev. 2020.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio**: Princípios e práticas. Tradução: D. Vieira. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 464p.

RODOVALHO, T. N. **Análise de Desempenho Experimental de Redes LTE-Advanced Baseadas em MIMO e Agregação de Portadoras**. 2017. 130p. Dissertação (Mestrado em Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL, Santa Rita do Sapucaí, 2017.

SBIZERA, D. O. **Um sistema de comunicação para transmissão de dados a longa distância em aeronaves do Projeto ARARA**. 2003. 143p. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SHEN, Z. *et al.* Overview of 3GPP LTE-Advanced Carrier Aggregation for 4G Wireless Communications. **IEEE Communications Magazine**, UK, v. 50, n. 2, p. 122-130, fev. 2012.

SKYPE. **How much bandwidth does Skype need?**, 2020. Disponível em: support.skype.com/en/faq/fa1417/how-much-bandwidth-does-skype-need. Acesso em: 23 fev. 2020.

TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2003. 674p.

TELECO. **LTE (Long Term Evolution): A Evolução das Redes 3G**, 16 fev. 2009. Disponível em: www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallte/pagina_3.asp. Acesso em: 12 jan. 2020.

TRÓPICO. **Soluções Wireless**, 2020. Disponível em: www.tropiconet.com.br/solucoes-wireless/. Acesso em: 19 jan. 2020.

UMTS FORUM. **Mobile Broadband Evolution**: the roadmap from HSPA to LTE. 2009 Disponível em: www.ums-forum.org/component/option_com_docman/task_doc_download/gid_2089/Itemid_214/. Acesso em: 8 jan. 2020.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016. 104p.

YIN , B.; CAVALLARO, J. R. LTE uplink MIMO receiver with low complexity interference cancellation. **Analog Integrated Circuits and Signal Processing**: An International Journal, v. 73, n. 2, p. 443-450, nov. 2012. Disponível em: link.springer.com/article/10.1007/s10470-012-9945-1. Acesso em: 12 jan. 2020.

ZARRINKOUB, H. **Understanding LTE with MATLAB**: from mathematical foundation to simulation, performance evaluation and implementation. UK: John Wiley & Sons, 2014. 490p.