



CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
LEANDRO FUCK MACEDO

**ESTUDO PARA MELHORIA DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO
DE RADIOFREQUÊNCIA**

LAGES
2019

LEANDRO FUCK MACEDO

**ESTUDO PARA MELHORIA DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO
DE RADIOFREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário UNIFACVEST, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Franciéli Lima de Sá.

Coorientadora: Prof^ª. Msc. Mônica Nascimento da Silva.

LAGES

2019

LEANDRO FUCK MACEDO

**ESTUDO PARA MELHORIA DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO
DE RADIOFREQUÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro Universitário UNIFACVEST, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Franciéli Lima de Sá.

Coorientadora: Prof^ª. Msc. Mônica Nascimento da Silva.

Lages, SC __/__/2019. Nota _____

Prof. Dra. Franciéli Lima de Sá, Coordenadora do Curso de Engenharia Elétrica

LAGES

2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, por me dar saúde, sabedoria e resiliência para superar as dificuldades encontradas.

Aos meus pais, por sempre estarem ao meu lado em todos os momentos, pela motivação e educação que expressaram a mim.

À minha namorada Vanessa que sempre me incentivou a seguir em frente nos momentos de conquistas e a enxergar as lições da vida nos momentos de dificuldade.

Às minhas orientadoras, Prof^ª. Franciéli Lima de Sá e Prof^ª. Mônica Nascimento da Silva, por todo o tempo que dedicaram a me ajudar durante a realização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram para o meu processo de formação e acreditaram em mim.

E enfim, a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, fica registrado aqui meu agradecimento!

RESUMO

O presente trabalho trata das características que envolvem um sistema de radiocomunicação, bem como dos equipamentos que o contemplam. O sistema de comunicação em discussão é composto basicamente pela informação através da emissão de ondas eletromagnéticas, meio de comunicação, antena, linha de transmissão, transmissor e receptor, e está sujeito a fatores, internos ou externos, que afetam a qualidade do sinal da informação. Logo, faz-se o estudo visando conhecer melhor os aspectos envolvidos, sejam naturais ou de equipamentos, de modo a obter o melhor desempenho para que a informação alcance seu destino sem sofrer degradações significativas. Também são descritas as técnicas de modulação e demodulação, empregadas na modelagem do sinal a ser transmitido ou recebido, seja ele analógico ou digital. Após esses conceitos serem estabelecidos, apresenta-se a rede de internet via rádio da empresa Ebert Informática de Correia Pinto/SC, na qual é realizada simulações e verificações através de ferramentas específicas, que possibilitam obter informações do enlace, além de verificar a condição ideal para o aperfeiçoamento do sistema.

Palavras-chave: Enlace. Qualidade. Radiofrequência.

ABSTRACT

The present work deals with the characteristics that involve a radiocommunication system, as well as the equipment that contemplate it. The communication system under discussion consists basically of information through the emission of electromagnetic waves, communication medium, antenna, transmission line, transmitter and receiver, and is subject to factors, internal or external, that affect the signal quality of the information . Therefore, the study is designed to better understand the aspects involved, whether natural or equipment, in order to obtain the best performance so that the information reaches its destination without suffering significant degradations. Also described are the modulation and demodulation techniques employed in modeling the signal to be transmitted or received, be it analog or digital. After these concepts have been established, the Ebert Informática network of Correia Pinto / SC is presented, in which simulations and verifications are carried out through specific tools, which provide information about the link, as well as verify the ideal condition to improve the system.

Keywords: Link. Quality. Radio Frequency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de um sistema de comunicação analógico.	18
Figura 2 – Terminologia de ondas eletromagnéticas.	20
Figura 3 – Defasagem entre duas ondas.	22
Figura 4 – Onda eletromagnética – Campo elétrico e campo magnético oscilando em fase. .	22
Figura 5 – Noção de campo elétrico.	23
Figura 6 – Espectro eletromagnético.	26
Figura 7 – Onda direta e onda refletida.	28
Figura 8 – Refração da onda de rádio na ionosfera.	29
Figura 9 – Ondas de múltiplos percursos.	33
Figura 10 – Atenuação de uma onda eletromagnética.	35
Figura 11 – Duto atmosférico.	38
Figura 12 – Circuito básico de uma antena.	40
Figura 13 – Esquema de uma antena dipolo.	41
Figura 14 – Conjunto de transmissão de RF.	41
Figura 15 – Campo elétrico formado pelo dipolo meia onda.	42
Figura 16 – Antena dipolo dobrado.	42
Figura 17 – Esquema de uma antena vertical plano-terra.	43
Figura 18 – Haste vertical encurtada com bobina de carga.	44
Figura 19 – Antena Yagi-Uda.	44
Figura 20 – Representação da antena helicoidal.	46
Figura 21 – Sinais perpendiculares incidindo no refletor parabólico.	47
Figura 22 – Captação do sinal em uma antena Cassegrain.	47
Figura 23 – Antena de micro-ondas.	48
Figura 24 – Estação transmissora com o sistema de antenas inteligentes.	49
Figura 25 – Diagrama de radiação de uma antena Yagi-Uda.	50
Figura 26 – Padrão de radiação horizontal e largura do feixe de um dipolo de meia-onda. ...	52
Figura 27 – Estrutura de um cabo coaxial.	57
Figura 28 – Linha bifilar.	58
Figura 29 – Linha microstrip.	58
Figura 30 – Guia de onda.	59
Figura 31 – Conjunto de cabos de par trançado do tipo UTP.	59
Figura 32 – Conectores macho e conector fêmea.	60

Figura 33 – Circuito equivalente.	62
Figura 34 – Circuito com linhas casadas.	64
Figura 35 – Transformador casador de impedâncias.	64
Figura 36 – Circuito elétrico de um transmissor típico, sem modulador.	66
Figura 37 – Formas de onda para modulação em amplitude, frequência e fase.	68
Figura 38 – Formas de onda do AM-DSB.	69
Figura 39 – Diagrama de blocos de um modulador AM-DSB.	70
Figura 40 – Forma de onda do sinal AM-DSB modulado.	71
Figura 41 – Circuito modulador AM-DSB.	71
Figura 42 – Forma de onda do sinal AM-DSB/SC modulado.	72
Figura 43 – Circuito modulador em ponte AM-DSB/SC.	73
Figura 44 – Circuito modulador balanceado AM-DSB/SC.	74
Figura 45 – Esquema de um modulador com filtro mecânico.	74
Figura 46 – Diagrama de blocos do modulador de FM pelo processo indireto.	78
Figura 47 – Formas de onda para modulação ASK.	79
Figura 48 – Formas de onda para modulação FSK.	80
Figura 49 – Formas de onda para modulação PSK.	80
Figura 50 – Constelação para a modulação 16 QAM.	81
Figura 51 – Diagrama em blocos de um receptor super-heteródino para recepção de AM, telegrafia ou SSB.	83
Figura 52 – Circuito modulador detector de envoltória.	87
Figura 53 – Análise de funcionamento do circuito detector de envoltória.	88
Figura 54 – Demodulador síncrono AM-DSB/SC com diodos em ponte.	89
Figura 55 – Formas de onda no circuito AM-DSB/SC.	90
Figura 56 – Circuito do detector de inclinação.	92
Figura 57 – Detector de inclinação balanceado.	92
Figura 58 – Curva “S” do detector balanceado.	93
Figura 59 – Sinal PAM e sinal amostrado com retenção.	94
Figura 60 – Circuito amostrador com retenção.	94
Figura 61 – Zona de Fresnel.	95
Figura 62 – (a) Torre de telecomunicação à direita medindo 30 metros de altura. (b) Parte superior da torre e	97
Figura 63 – Mapa correspondente à área urbana da cidade de Correia Pinto/SC e localização atual das antenas em estudo.	98

Figura 64 – Basestation e Rocket M5.	100
Figura 65 – Antena Nano Station Loco M5.	101
Figura 66 – Antena LiteBeam M5-23.	102
Figura 67 – Página principal do airOS v5.6.	103
Figura 68 – Qualidade de transmissão.	106
Figura 69 – Página sem fio do airOS v5.6.....	107
Figura 70 – Analisador espectral airView.	109
Figura 71 – Perfil de elevação entre a antena receptora 01 e a torre de transmissão.	110
Figura 72 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 01 e a torre de transmissão.	111
Figura 73 – Perfil de elevação entre a antena receptora 02 e a torre de transmissão.	112
Figura 74 – Perfil de elevação do terreno.....	112
Figura 75 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 02 e a torre de transmissão.	113
Figura 76 – Perfil de elevação entre a antena receptora 02 e a torre de transmissão.	114
Figura 77 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 03 e a torre de transmissão.	115
Figura 78 – Pontos de acesso rastreados pela Receptora 01.	116
Figura 79 – Potência do sinal e sensibilidade ao ruído.	117
Figura 80 – Informações da conectividade entre Receptora01 e Ebert_hospitalE5.8.....	117
Figura 81 – Pontos de acesso rastreados pela Receptora 03.	118
Figura 82 – Potência do sinal e sensibilidade ao ruído.	119
Figura 83 – Informações da conectividade entre Receptora03 e Ebert_hospitalSao_Pedro.	119
Figura 84 – Nova estação transmissora.	120
Figura 85 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 02 e a nova central de transmissão.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Subdivisão das bandas de rádio.....	32
Tabela 2 – Ganhos.....	54
Tabela 3 – Impedâncias.....	55
Tabela 4 – Antenas transmissoras e receptoras.....	98
Tabela 5 – Especificações complementares da antena Rocket M5.....	99
Tabela 6 – Especificações complementares da antena Nano Station Loco M5.....	100
Tabela 7 – Especificações complementares da antena LiteBeam M5-23.....	101
Tabela 8 – Configuração dos transmissores.....	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Anternating Current</i>
AM	<i>Amplitude Modulation</i>
AM-DSB	<i>Amplitude Modulation - Double Side Band</i>
AM-DSB/SC	<i>Amplitude Modulation - Double Side Band/Supressed Carrier</i>
AM-SSB	<i>Amplitude Modulation - Single Side Band</i>
AM-VSB	<i>Amplitude Modulation - Vestigal Side Band</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
CAG	Controle Automático de Ganho
CW	<i>Carrier Wave</i>
DC	<i>Direct current</i>
DFS	<i>Dynamic Frequency Selection</i>
EIRP	<i>Effective Isotropic Radiation Power</i>
FI	Frequência Intermediária
FM	<i>Frequency Modulation</i>
FMFL	Modulação de Frequência de Faixa Larga
FPS	<i>Frames Per Second</i>
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HF	<i>High Frequency</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, Medical</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union - Radiocommunication Sector</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LC	Indutor-capacitor
LF	<i>Low Frequency</i>
LT	Linha de Transmissão
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
PAM	<i>Pulse Amplitude Modulation</i>
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i>

PM	<i>Phase Modulation</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	Radiofrequência
Rx	Receptor
SHF	<i>Super High Frequency</i>
STP	<i>Shielded Twisted Pair</i>
Tx	Transmissor
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UTP	<i>Unshielded Twisted Pair</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLf	<i>Very Low Frequency</i>
WRC	<i>World Radiocommunications Conference</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Aplicações.....	17
1.4 Metodologia.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Sistemas de comunicação	18
2.1.1 Enlace de comunicação	19
2.2 Telecomunicação	19
2.3 Ondas eletromagnéticas.....	20
2.3.1 Campo elétrico e campo magnético.....	22
2.3.2 Equações de Maxwell.....	23
2.3.3 Espectro de ondas	24
2.3.4 Propagação	27
2.3.5 Polarização.....	29
2.3.6 Reflexão.....	30
2.3.7 Refração.....	30
2.3.8 Difração	31
2.4 Ondas de rádio	31
2.5 Distúrbios na radiopropagação	32
2.5.1 Interferência e ruídos	32
2.5.2 Ondas de multipercurso	33
2.5.3 Desvanecimento.....	33
2.5.4 Atenuação	35
2.5.5 Absorção	36
2.5.6 Efeito Doppler	37
2.5.7 Dutos.....	37
3 TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE RADIOFREQUÊNCIA	39
3.1 Antenas	39
3.1.1 Tipos de antena	40
3.1.2 Características das antenas	49

3.2 Linhas de transmissão.....	56
3.2.1 Tipos de linhas de transmissão	56
3.2.2 Conectores	59
3.2.3 Fator velocidade	60
3.2.4 Comprimento das linhas de transmissão	61
3.2.5 Circuito equivalente, Impedância, Atenuação e Frequência de corte.....	62
3.2.6 Casamento de impedância	63
3.3 Transmissor.....	64
3.3.1 Modulação	67
3.4 Receptor.....	82
3.4.1 Demodulação	85
3.5 Zona de Fresnel	94
4 ESTUDO DE CASO	96
4.1 Materiais e métodos.....	96
4.1.1 Especificações Técnicas	99
4.1.2 <i>airOS</i>	102
4.1.3 <i>airView</i>	108
4.1.4 <i>Google Earth PRO</i>	109
4.1.4 <i>airLink</i>	110
4.2 Análise do enlace	110
4.3 Resultados.....	115
4.4 Considerações finais	121
5 CONCLUSÃO.....	123
6 BIBLIOGRAFIA	124

1 INTRODUÇÃO

A telecomunicação apresenta-se na vida cotidiana na forma de telefones celulares, rádios portáteis, televisores, redes sem fio de internet que são exemplos simples e capazes de fornecer uma comunicação rápida, e de qualquer parte do mundo. Além disso, ela também está presente em campos mais avançados, como a orientação de navios em alto mar, aeronaves em voo, foguetes, satélites no espaço e serviço meteorológico baseado em sensores remotos. Nesse sentido o autor Haykin (2004) define que, fundamentalmente, a comunicação envolve a informação transmitida de um ponto a outro por uma sucessão de processos.

Conforme descrito por Medeiros (2007), a era da telecomunicação começou em 1875, quando Alexander Graham Bell (1847 – 1922) criou o primeiro sistema telefônico usando sinais elétricos por fios condutores, capaz de transmitir voz inteligível. Esta realização motivou estudiosos a desenvolverem pesquisas que proporcionaram o avanço na forma de comunicação, chegando ao que se conhece hoje como wireless, comunicação sem fio ou comunicação de rádio. Posteriormente, em 1897, depois de uma série de experimentos bem-sucedidos na Itália e Inglaterra, Marchese Guglielmo Marconi (1874 – 1937), enviou sinais telegráficos sem fio a 12 milhas de distância, o que lhe conferiu o título de inventor do rádio. Aleksandr Stepanovich Popov (1859 – 1905), trabalhou na recepção de sinais eletromagnéticos, e construiu em 1898 um sistema de comunicação de rádio para navios russos, o qual foi considerado o inventor do rádio naquele país. O alemão Heinrich Rudolph Hertz (1859 – 1905), provocou descargas elétricas e estudou as ondas eletromagnéticas, sendo que suas descobertas foram essenciais para o aprimoramento das comunicações sem fio. Já em 1894, Sir Oliver Lodge, apresentou à sociedade real britânica um transmissor e um receptor de rádio.

Ainda conforme Medeiros (2007), no Brasil, o Padre Roberto Landell de Moura, projetou um transmissor de rádio e fez a primeira transmissão de voz através de ondas eletromagnéticas em 1893. Ouvida com clareza em um receptor a oito quilômetros de distância, pode ser considerada a primeira do mundo, antes mesmo dos experimentos de Marconi. Outros grandes nomes da ciência deram continuidade a esses estudos e suas pesquisas levaram ao desenvolvimento das telecomunicações conhecidas atualmente.

Dentro deste contexto, é abordada a tecnologia de rádio, um sistema formado por um conjunto de meios e dispositivos permitindo que fonte e destino se comuniquem a distância. São esses meios e dispositivos que iremos estudar para compreender todo processo envolvido na transmissão sem fio e o seu princípio de funcionamento.

A metodologia utilizada para o estudo é a pesquisa quanti-qualitativa, onde será

apresentado o princípio de funcionamento do sistema de transmissão de rádio. Além do estudo teórico, será desenvolvido no trabalho um estudo de caso, visando identificar as limitações na radiopropagação, os fatores que afetam a qualidade do sinal, e com base nos estudos literários elaborados, serão realizadas simulações para constatar a efetividade do sistema de comunicação, propiciando ao leitor uma base sólida para implementação eficiente de um enlace de radiofrequência.

1.1 Justificativa

É através dos sistemas de comunicações que os usuários trocam informações utilizando equipamentos compatíveis com o sistema, como terminais, aparelhos elétricos e eletrônicos. Destacam-se nesse meio os enlaces de rádio, comumente utilizados devido ao baixo custo de investimento e à facilidade de sua implantação.

Faz-se necessário o conhecimento acerca das condições existentes na elaboração do projeto de dimensionamento do enlace de radiofrequência para obtenção do melhor desempenho que o sistema pode oferecer. Avaliar fatores como a distância e a frequência são fundamentais no desempenho e no dimensionamento de uma antena. “A determinação da frequência de operação do enlace de radiofrequência está relacionada aos seguintes fatores: distância, atenuação do sinal por causa da chuva e interferência de outros enlaces já existentes” (PIAU; CARRIJO, 2014, p. 81).

Diante do grande número de variáveis envolvidas no dimensionamento do enlace, ou seja, o conjunto de equipamentos e técnicas utilizados no sistema de comunicação, realizou-se esse estudo, trazendo maior compreensão sobre o tema abordado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo identificar os fatores que afetam a qualidade da transmissão de sinal de rádio e apresentar possibilidades para alcançar um melhor desempenho na propagação dessas ondas eletromagnéticas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Explicar os conceitos de ondas eletromagnéticas e sua propagação no espaço;
- b) Identificar as limitações na transmissão de sinal de radiofrequência;

- c) Detalhar os equipamentos utilizados na transmissão e recepção de radiofrequência com seu respectivo funcionamento;
- d) Apresentar alternativas eficientes para contornar as limitações encontradas na transmissão de sinal de rádio;
- e) Realizar um estudo de caso com simulações da transmissão de radiofrequência.

1.3 Aplicações

Através do estudo de caso apresentado neste trabalho será possível melhorar substancialmente a qualidade do sinal de radiofrequência gerado através de uma antena transmissora até uma antena receptora para os clientes da empresa Ebert Informática em Correia Pinto/SC.

1.4 Metodologia

O presente trabalho se baseia na pesquisa bibliográfica e no desenvolvimento de um estudo de caso na empresa Ebert Informática, com o objetivo de reunir informações e dados que servirão de base para a construção da investigação proposta a partir do tema abordado. Com o propósito de um estudo explorativo e explicativo, busca-se o aprofundamento sobre o funcionamento da transmissão de sinal de radiofrequência e a identificação dos fatores que contribuem para a interferência do mesmo. A abordagem quanti-qualitativa é utilizada no desenvolvimento deste trabalho, uma vez que a partir dos estudos teóricos, será possível realizar o estudo de caso para análise, comparação e obtenção de resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Serão apresentados os principais aspectos do processo de telecomunicação através de uma revisão bibliográfica, a qual norteará a compreensão dos assuntos abordados no desenvolvimento deste trabalho, enfatizando a comunicação por radiofrequência.

2.1 Sistemas de comunicação

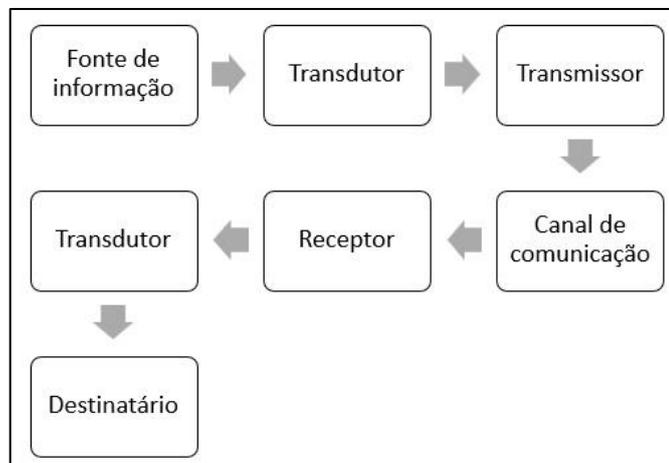
Os modernos sistemas de comunicação são essenciais para o desenvolvimento cultural, econômico e científico da sociedade, visto que a todo tempo são geradas informações que precisam ser transmitidas rapidamente de um ponto a outro do planeta.

Para que haja comunicação entre pelo menos dois pontos é necessária uma cadeia de comunicação, que compreende um arranjo composto basicamente por três elementos: fonte de informação, sistema de comunicação e destino. A fonte de informação é a origem da mensagem a ser transmitida pelo sistema de comunicação até seu destino, onde a informação será utilizada.

No sistema de comunicação a informação de entrada deve ser convertida por um transdutor de transmissão para o tipo de energia que será transportado pelo transmissor (Tx), como um sinal elétrico, através de um canal de comunicação até chegar em seu receptor (Rx) e posteriormente convertida pelo transdutor de recepção que entregará a informação ao seu destinatário, na forma de som, luz, entre outros. Um exemplo de transdutor é o microfone, que converte o som em sinal elétrico.

Esse sistema deve preservar ao máximo as características originais de uma informação e é representado pelo diagrama da Figura 1.

Figura 1 – Diagrama de um sistema de comunicação analógico.



Fonte: Adaptado de CARVALHO; BADINHAN (2011).

2.1.1 Enlace de comunicação

De acordo com Carvalho e Badinhan (2011), a comunicação entre dois pontos ou mais é definida como enlace de comunicação e caracteriza-se pelo número de pontos envolvidos, sentido de transmissão e mobilidade.

a) Quanto ao número de pontos envolvidos o enlace pode ser:

- Ponto a ponto: A transmissão ocorre de um ponto de acesso (transmissor) para outro ponto (receptor);
- Ponto-multiponto: A informação é enviada pelo transmissor e recebida por dois ou mais receptores;
- Multiponto-ponto: Dois ou mais transmissores enviam a informação para um único receptor;
- Multiponto-multiponto: Todos os equipamentos da rede fazem a função de transmissor ou receptor, podendo conversar entre si.

b) Quanto ao sentido de transmissão:

- *Simplex*: ocorre somente em um sentido;
- *Half-duplex*: ocorrendo nos dois sentidos alternadamente;
- *Full-duplex*: quando a troca de informações ocorre nos dois sentidos simultaneamente.

c) Quanto à mobilidade:

- Enlace fixo: Os elementos de rede encontram-se em pontos definidos;
- Enlace móvel: Composto por elementos transmissores e/ou receptores móveis;
- Radio base: Estações de radiofrequência fixas;
- Enlace misto: O enlace utiliza rádios e rede fixa.

2.2 Telecomunicação

O prefixo “tele” tem origem grega e significa distância. Para Loureiro (2005) a telecomunicação apresenta-se como uma forma de ampliar o alcance normal da comunicação através da transmissão, emissão ou recepção, de símbolos, caracteres, sinais, imagens, sons ou informação de qualquer natureza.

De acordo com Carvalho e Badinhan (2011), a telecomunicação pode ser definida como a transmissão de informações entre pontos distantes, por meio de sistemas eletrônicos e meios

físicos.

A telecomunicação supre a necessidade humana de comunicar-se à distância e ocorre através da transmissão de informações por fio, radioeletricidade, meios ópticos ou qualquer outro processo eletromagnético. Televisores, telefonia celular, redes ópticas, GPS, sistemas de rádio, entre outros, são alguns exemplos disso.

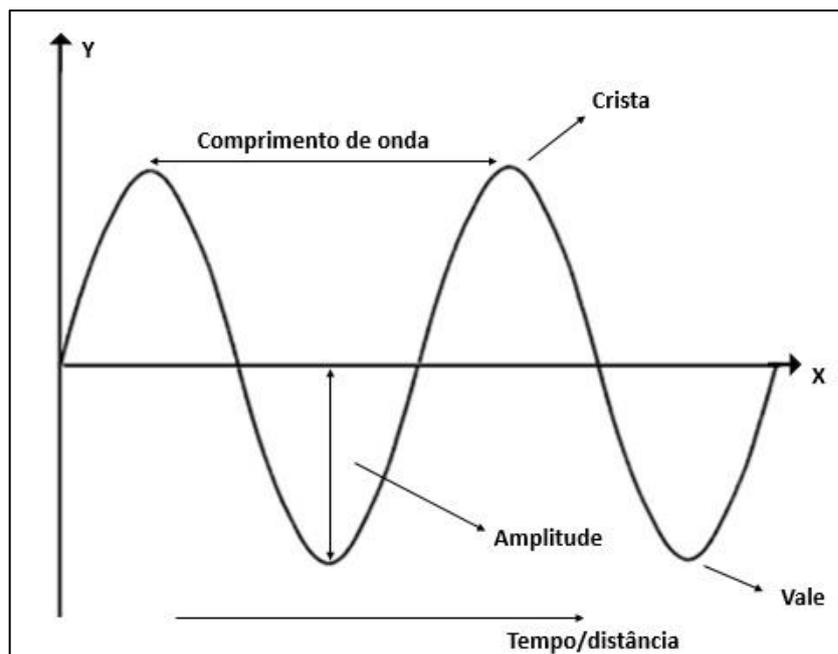
2.3 Ondas eletromagnéticas

“Ondas eletromagnéticas são campos elétricos e campos magnéticos que oscilam em direções perpendiculares à direção de propagação e podem se propagar tanto no vácuo como em meios materiais” (SANTOS, 2007, p. 7). No vácuo as ondas se propagam na velocidade da luz, à aproximadamente 3×10^8 m/s. Em meios materiais, como o cobre ou a fibra óptica, essa velocidade é reduzida, mas ainda muito alta, e varia de acordo com a frequência. Calculada pela Equação 1, a velocidade (c) é o produto do comprimento de onda (λ) com a frequência (f).

$$c = \lambda * f \quad (1)$$

Ao tratar da nomenclatura de ondas eletromagnéticas, tem-se que os pontos mais altos, ou mais baixos, da onda senoidal são denominados picos. O pico positivo é chamado de crista, sendo a parte mais alta da onda, enquanto o pico negativo é chamado de vale conforme ilustra a Figura 2.

Figura 2 – Terminologia de ondas eletromagnéticas.



Fonte: Autor (2019).

As ondas eletromagnéticas ainda são caracterizadas pela sua frequência, amplitude, comprimento de onda, fase e período.

A frequência é o número de oscilações (ciclos) por segundo de uma onda eletromagnética. Na faixa de rádio do espectro magnético, é medida em Hertz (Hz). Se uma onda tem 25 MHz, significa que ocorrem 25 milhões de ciclos por segundo.

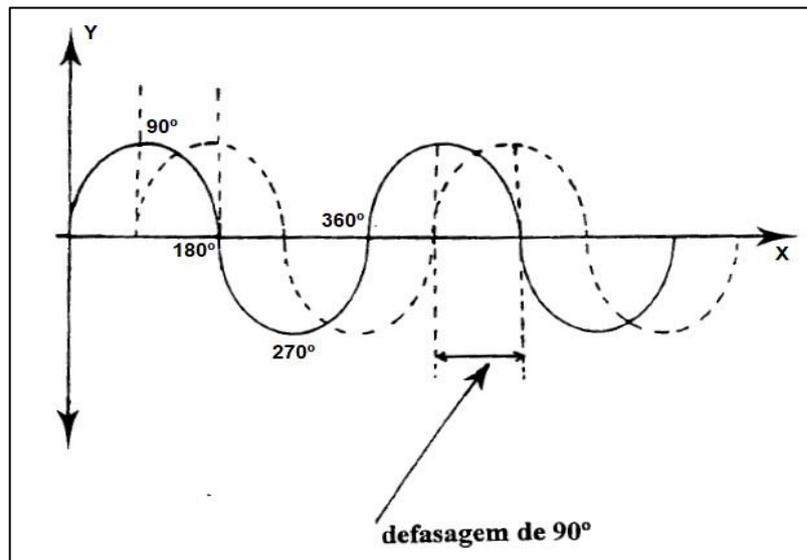
Amplitude é a distância vertical entre um ponto da onda e o ponto zero do eixo Y de um plano cartesiano e, indica sua intensidade em um ponto considerado ou a altura com relação ao início da propagação da onda e o final desta.

Comprimento da onda é a distância horizontal entre dois pontos consecutivos da onda, podendo ser de crista a crista, ou de pico a pico. É medido em metros e seus submúltiplos. Assim, a distância percorrida pela energia durante uma oscilação completa é o comprimento da onda.

“Fase é a quantidade que um ciclo progrediu desde uma origem especificada. A fase também pode ser definida como sendo a situação de um determinado ponto da onda em relação a um ponto-origem” (BRASIL, 1996, p. 1228). A origem de um ciclo é o ponto zero de uma senoide. Ao alcançar sua crista, a fase, expressa em unidades angulares, equivale 90° ; no momento em que a amplitude decaí e atinge o ponto zero novamente, sua fase é 180° ; ao atingir o vale, 270° ; e quando o ciclo é completado, 360° . Na existência de duas ou mais ondas, pode ocorrer o fenômeno de defasagem, ou seja, o ângulo de fase entre ondas com mesma origem é diferente conforme a analogia da Figura 3. Para que estejam em fase é necessário que seus ângulos de fase sejam o mesmo. Se, por exemplo, duas ondas tiverem suas cristas defasadas em meio ciclo, sua defasagem será de 180° .

Por fim, o período da onda diz respeito ao tempo gasto para completar um ciclo.

Figura 3 – Defasagem entre duas ondas.

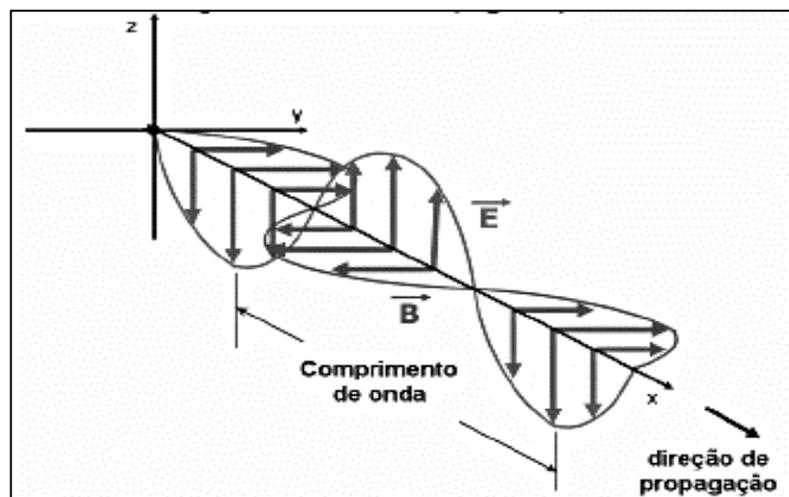


Fonte: Adaptado de BRASIL (1996).

2.3.1 Campo elétrico e campo magnético

As ondas eletromagnéticas estão associadas diretamente aos campos elétrico e magnético, por onde sua energia é transportada. “As variações dos vetores campo magnético e elétrico ocorrem em fase, de tal maneira que os picos e os vales ocorrem ao mesmo tempo nas duas ondas” (SANTOS, 2007, p. 7). Essa condição é apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Onda eletromagnética – Campo elétrico e campo magnético oscilando em fase.

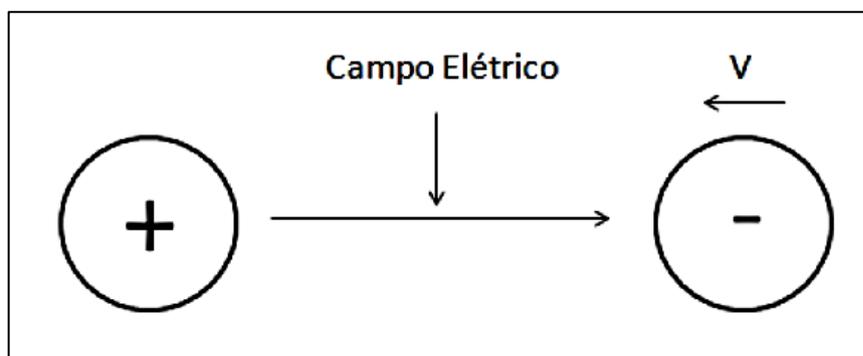


Fonte: SANTOS (2007).

Sabe-se que uma alteração no espaço vizinho a uma carga produz um campo elétrico que surge de uma carga inicialmente em repouso. Assim, quando uma carga de prova é colocada na presença de outras cargas, atuará sobre ela uma força elétrica e conseqüentemente o

aparecimento de um campo elétrico naquela região do espaço. Na Figura 5 é possível observar que o campo elétrico é sentido pela carga negativa, visto que a carga positiva é responsável por esse efeito.

Figura 5 – Noção de campo elétrico



Fonte: PIAU (2013).

Se uma corrente elétrica flui por um condutor, ela alterará as propriedades do espaço, e então, será criado, ao redor do mesmo, um campo magnético. “A circulação da corrente em um transformador primário produzirá um campo magnético e isto influenciará na criação de uma corrente no transformador secundário” (PIAU, 2013, p. 19).

Um transformador elementar é formado basicamente por enrolamentos primário, secundário e um núcleo ferromagnético. Ao alimentar o enrolamento primário através de uma corrente alternada, surge um campo magnético. O fluxo do campo magnético percorre o núcleo e chega no enrolamento secundário por indução eletromagnética.

Assim, “um campo elétrico variável se deslocando em um meio de propagação não pode existir sem a presença de um campo magnético variável a ele associado” (SILVA; BARRADAS, 1978, p. 25). A variação no campo magnético induz um campo elétrico, que por sua vez produz uma corrente de deslocamento e induz um campo magnético, repetindo o ciclo sucessivamente. Esse fenômeno chama-se indução eletromagnética e a combinação de campos denomina-se campo eletromagnético.

2.3.2 Equações de Maxwell

Conforme Brasil (1996), há mais de um século, o físico e matemático britânico James Clerk Maxwell dava forma a teoria moderna do eletromagnetismo. Correlacionando a lei de Ampère para circuitos elétricos, os Teoremas de Gauss para campos elétricos e magnéticos, e a Lei de Faraday sobre a força eletromotriz, surgem as leis de Maxwell, nome dado em sua homenagem, que descrevem a interação elétrica e magnética do campo eletromagnético e sua

relação com a tensão e corrente elétrica. As teorias de Maxwell ainda levaram às descobertas de Heinrich Hertz, que conseguiu produzir e detectar as primeiras ondas eletromagnéticas geradas artificialmente.

Essas leis estão representadas nas Equações 2 a 5:

- Lei de Ampère:

$$\nabla \times \vec{M} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

- Lei de Faraday:

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{M}}{\partial t} \quad (3)$$

- Lei de Gauss para o Campo Elétrico:

$$\nabla \cdot \varepsilon \vec{E} = \rho \quad (4)$$

- Lei de Gauss para o Campo Magnético:

$$\nabla \cdot \varepsilon \vec{M} = 0 \quad (5)$$

onde:

$\nabla \cdot$: Operador divergência;

$\nabla \times$: Operador rotacional;

\vec{M} : Campo magnético;

\vec{E} : Campo elétrico;

μ : Permeabilidade;

ε : Permissividade;

σ : Condutividade.

As Leis de Maxwell são a base do Eletromagnetismo e de suma importância entendê-lá, pois estas descrevem o campo elétrico numa superfície fechada ou gaussiana do qual será nulo, devido ao equilíbrio eletrostático de cargas, que funcionaria como uma gaiola de Faraday. Ainda, a variação da corrente elétrica gera um campo eletromagnético em uma superfície amperiana e o surgimento da força eletromotriz e da corrente induzida devido à oposição do vetor indução campo magnético. Como será descrito posteriormente, a antena, numa linguagem simples e clara, é um circuito de emissão de ondas eletromagnéticas através de outras variáveis que serão descritas, no qual capta e emite ondas eletromagnéticas.

2.3.3 Espectro de ondas

Existe uma enorme gama de frequências sendo utilizadas para os mais variados fins em

todo o mundo. Para prevenir uma desordem na sua utilização instituições especializadas regulamentam o uso do espectro eletromagnético. No Brasil o órgão regulador é a ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações, e em âmbito mundial é uma agência da ITU-R (*International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector*): a WRC (*World Radiocommunications Conference*). Através deles é que acordos e regulamentações são criados para tratar da alocação das frequências e a qual classe pertencerá.

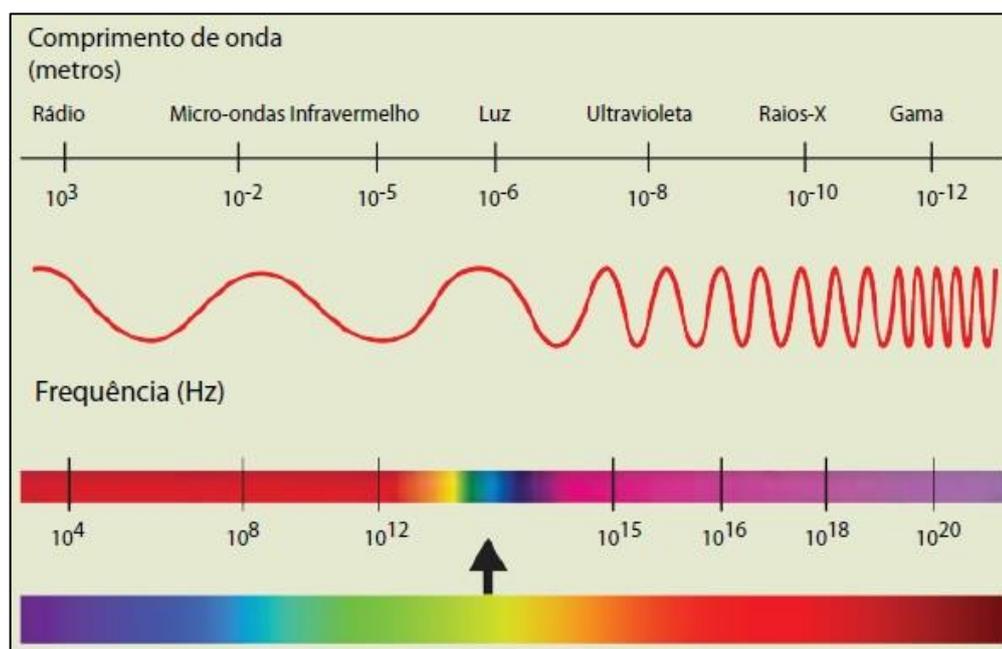
Por questões políticas, na maioria das vezes, nem todos os países seguem as recomendações da ITU-R, então, é possível que equipamentos fabricados em um país não funcionem em outro devido as diferentes especificações locais das agências reguladoras.

Os governos alocam faixas de frequências para uso de rádios AM e FM, televisão, telefonia celular, navegação, governo, uso militar e inúmeras outras classes. Quanto maior for a largura de banda, maior será o interesse naquela faixa de frequências. Dessa forma, os governos e suas respectivas agências realizam leilões, ou analisam qual proposta melhor atende aos interessados.

Existe uma faixa de frequência reservada para uso não licenciado, chamada banda ISM (*Industrial, Scientific, Medical*), utilizada para fins industriais, científicos e médicos, em controles remotos, dispositivos domésticos sem fio, brinquedos e afins. Assim, para minimizar a interferência entre estes dispositivos não coordenados, as agências determinam que todos os equipamentos nas bandas ISM limitem sua potência de transmissão a um determinado valor.

Cada sistema de comunicação opera dentro de uma faixa de frequências predefinida, a qual está incluída no espectro de frequências que engloba todas as faixas de irradiação eletromagnética. Essa classificação é apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Espectro eletromagnético.



Fonte: CARVALHO; BADINHAN (2011).

De acordo com o artigo de Souto (2019), as ondas de rádio são produzidas em circuitos elétricos, caracterizando-se pela sua baixa frequência em relação as demais, grande comprimento de onda e são utilizadas nas emissões de rádio e televisão, radares e pela polícia.

Já as micro-ondas são geradas nos circuitos elétricos e em algumas transições entre níveis energéticos próximos dos átomos. Sua aplicação é dada na comunicação de veículos espaciais, na transmissão de sinais telefônicos e de televisão, na orientação de aviões, no estudo da origem do Universo, em fornos de micro-ondas, etc.

Todos os corpos quentes irradiam ondas eletromagnéticas na frequência do infravermelho, como lâmpadas, aquecedores elétricos e os seres humanos. Essa faixa não pode ser vista a olho nu, mas é possível visualizá-la através de equipamentos de visão noturna e medidores termográficos, por exemplo. Essa radiação também é utilizada em controles remotos, alarmes de carros, entre outros.

A luz visível compreende uma pequena parcela do espectro e é a única onda eletromagnética que o ser humano consegue enxergar. Pode ser emitida por fontes naturais ou artificiais, como o sol e lâmpadas, respectivamente.

Os raios ultravioletas são uma parte da luz solar que chega ao planeta Terra, não podem ser vistos, mas seus efeitos podem ser sentidos. A exposição prolongada da pele a eles pode causar até mesmo o câncer. Além de serem responsáveis pela presença da ionosfera, já que têm energia suficiente para ionizar os átomos da atmosfera, podem ser utilizados para o

bronzear da pele, esterilizações e causar efeitos fluorescentes em algumas substâncias.

Raios-X são ondas eletromagnéticas com energia capaz de ionizar os átomos. Sua emissão dá-se na frenagem brusca de elétrons colocados em movimento em um equipamento acelerador. São amplamente usados na área de medicina diagnóstica, como radiografias, mamografias e exames de densitometria óssea.

Os raios gama, assim como os raios-X, são ionizantes, e formados por ondas eletromagnéticas emitidas por núcleos instáveis que buscam diminuir sua energia. Estão localizados na extremidade do espectro, possuem alta frequência e baixo comprimento de onda. Suas aplicações mais comuns são: esterilização, radioterapia, irradiação de alimentos, construção civil e radiografia industrial.

O rádio, micro-ondas, infravermelhos e porções de luz visível do espectro podem ser usados para transmitir informações modulando a amplitude, frequência ou fase das ondas. A luz ultravioleta, os raios X e os raios gama seriam ainda melhores, devido à sua maior frequência, mas eles são difíceis de produzir e modular, não se propagam bem através dos edifícios, e são perigosos para os seres vivos (TANENBAUM, 2011, p. 107).

Segundo Carvalho e Badinhan (2011), as faixas de frequências em que se concentram os principais serviços de telecomunicações são:

- a) VHF (*Very High Frequency*) – Faixa entre 30 MHz e 300 MHz, na qual estão os serviços de radiodifusão comercial FM e os canais 2 a 13 de TV.
- b) UHF (*Ultra High Frequency*) – Faixa entre 300 MHz e 3 GHz, com destaque para os canais de TV transmitidos por UHF e de telefonia celular.
- c) SHF (*Super High Frequency*) – Faixa entre 3 GHz e 30 GHz, destinada as transmissões via satélite (TV, telefonia e dados), além de frequências para rádio digital, e que será utilizada posteriormente no desenvolvimento do estudo de caso.

2.3.4 Propagação

A energia eletromagnética irradiada por uma antena, mais especificadamente ondas de rádio, se propagam pelo espaço de diferentes modos, dependendo da sua frequência de operação. Existem 2 modos principais para a propagação dessas ondas, sendo eles: propagação terrestre e propagação ionosférica.

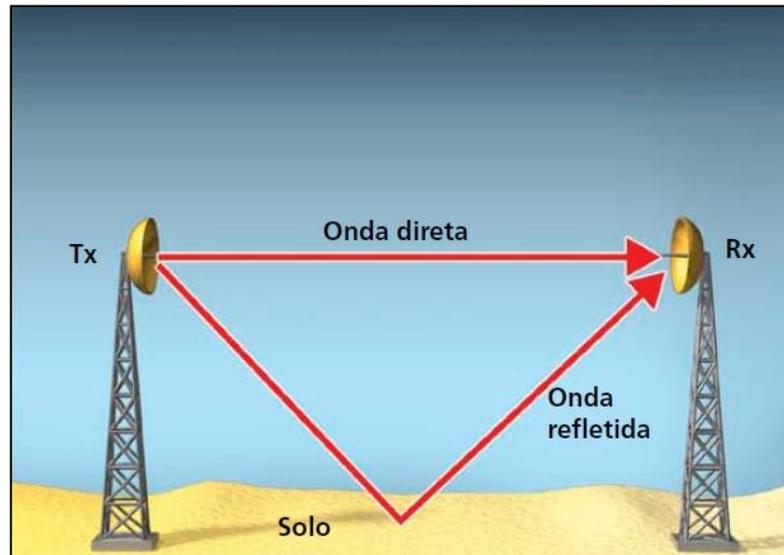
- a) Propagação terrestre: direta e refletida

Na propagação por onda terrestre, as ondas de rádio acompanham a superfície da terra. Esse modo é utilizado em baixas frequências, nas faixas VLF, LF e MF que vão de 10 kHz até

3 MHz. Devido à essa baixa frequência, as ondas possuem grande comprimento e alcançam grandes distâncias.

Nela apresentam-se dois tipos de onda conforme ilustra a Figura 7, sendo elas, a onda direta, e a onda refletida.

Figura 7 – Onda direta e onda refletida.



Fonte: CARVALHO; BADINHAN (2011).

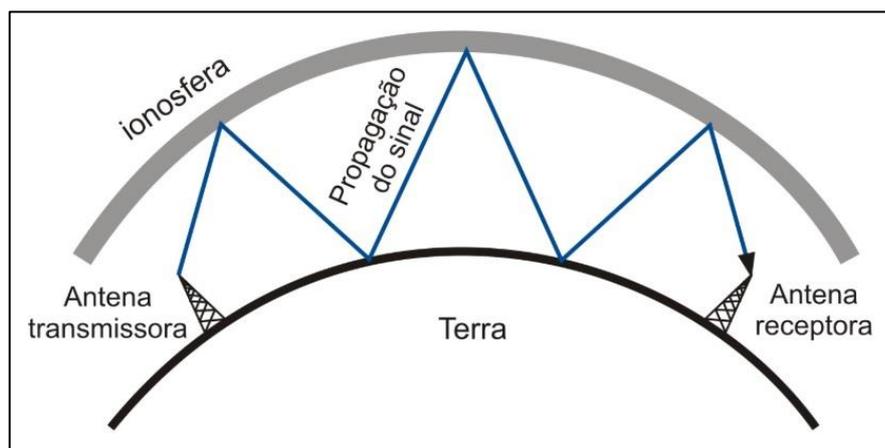
Na propagação por onda terrestre direta, também chamada de propagação troposférica, o enlace está em linha de visada, ou seja, as antenas transmissora e receptora estão visíveis entre si e a onda propaga-se praticamente em linha reta. Essas ondas viajam até a 10 km de altura da superfície, e a 6 km nos polos devido a curvatura sofrida pelas ondas em razão dos gases atmosféricos. É comumente utilizada acima de 30 MHz, como nas faixas VHF, UHF e SHF.

Já na propagação por onda refletida, uma porção de onda terrestre reflete na superfície do solo e alcança a antena receptora, sofrendo grande atenuação por absorção.

b) Propagação ionosférica

A propagação por onda ionosférica, ou propagação por onda celeste, acontece em altitudes acima de 100 km da superfície e faz com que as ondas de radiofrequência sejam refletidas na ionosfera e retornem à Terra conforme ilustra a Figura 8. Ao retornar, ela pode ser refletida na ionosfera novamente, repetindo o ciclo, e possibilitando transmissões a longas distâncias. Contudo, parte da energia pode ser absorvida pela ionosfera ou até mesmo atravessar a camada e se perder no espaço. A principal aplicação desse método de propagação é em transmissões HF, que vão de 3 a 30 MHz.

Figura 8 – Refração da onda de rádio na ionosfera.



Fonte: BERNARDES (2019).

Ainda, alguns fatores devem ser considerados ao se tratar da propagação de radiofrequência. “É necessário conhecer a composição das camadas da atmosfera terrestre e os fatores que a afetam, além das características de relevo e condutividade da região na qual se deseja implantar um enlace” (CARVALHO; BADINHAN, 2011, p. 92).

Cada camada da atmosfera comporta-se de uma maneira diferente e influencia diretamente no desempenho da transmissão da onda de rádio. Na troposfera, por exemplo, ocorrem quase todos os fenômenos climáticos do planeta que contribuem para que a onda sofra atenuações, afetando significativamente no seu desempenho. Já a ionosfera apresenta grande ionização durante o dia devido a intensa radiação dos raios cósmicos que a atingem e da baixa presença de gases, que varia de acordo com a atividade solar.

A variação sazonal é outro aspecto relevante a ser considerado, já que as estações do ano causam alterações nas frequências transmitidas. O ciclo solar se renova aproximadamente a cada 11 anos e quando o número de manchas solares aumenta, a ionosfera apresenta maior densidade de elétrons e conseqüentemente a propagação melhora.

O solo e a água também são capazes de conduzir as ondas de rádio na superfície terrestre, enquanto as florestas as absorvem de maneira considerável. Quanto mais úmido for o solo e mais salina a água, a absorção nesses meios será menor e o alcance da transmissão será maior em razão de suas propriedades condutoras. O relevo da região também contribui significativamente para a dispersão da energia das ondas.

2.3.5 Polarização

A polarização de uma onda eletromagnética é a direção do plano onde oscila o campo

elétrico, sendo por convenção o eixo Y. Se o plano estiver na horizontal, a polarização será horizontal e se o plano estiver na vertical, a polarização será vertical. A polarização horizontal é utilizada para propagações mais curtas, enquanto a polarização vertical, para propagações mais longas. As polarizações horizontal e vertical são chamadas de lineares, pois as ondas estão no mesmo plano (XY).

A onda eletromagnética deslocando-se no espaço pode estar polarizada em qualquer direção, mas ao acompanhar a superfície da Terra com o campo elétrico perpendicular a mesma, é levada sempre a ser polarizada verticalmente. Contudo, a forma com que uma antena irradia o sinal é que determina a polarização da onda eletromagnética.

As polarizações ainda podem ser: circular, quando uma antena utiliza as duas polarizações lineares ao mesmo tempo defasadas em 90° , fazendo com que o vetor gire para direita ou esquerda; elíptica, quando as amplitudes das componentes da polarização circular forem diferentes e ocorre a projeção de uma elipse nos eixos x e y; e ortogonal ou cruzada, quando dois sinais distintos na mesma frequência são transmitidos com polarizações diferentes de modo que ao ocorrer mudança de posição da antena receptora seja possível captar uma ou outra polarização.

Medeiros (2007), evidencia que a maior transferência de energia acontece quando o emissor e o receptor têm a mesma polarização.

2.3.6 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície que limita dois meios de diferentes densidades e retorna ao seu meio de origem, mantendo a mesma velocidade, frequência e comprimento de onda.

Contudo, a reflexão pode acontecer parcialmente, onde uma parte da energia da onda incidida é refletida para o meio de origem, outra parte da energia pode ser absorvida pela superfície refletora ou ainda, refratar-se e se propagar no segundo meio.

2.3.7 Refração

Refração é a característica que uma onda tem de alterar suas propriedades ao se propagar em um meio com diferente densidade do meio em que foi incidida. Ao atravessar a superfície de separação, tem sua velocidade de propagação alterada pela mudança do comprimento de onda. Há também um encurvamento do feixe, causado pela sua passagem por camadas da atmosfera com diferentes densidades e índices de refração.

2.3.8 Difração

A difração pode ser entendida como a capacidade que uma onda tem em contornar obstáculos, ou a dispersão da onda em torno de um obstáculo. Dessa forma, a difração é a mudança da direção da onda ao passar por um obstáculo.

Segundo Carvalho e Badinhan (2011), a difração permite que parte das ondas atinja antenas receptoras fora da linha de visada por meio da utilização de um obstáculo que provoca o desvio em sua direção da propagação. Esse desvio ocasiona o encurvamento no feixe propagado quando a onda passa pela borda da superfície separadora, a qual causa a deflexão da onda na direção do objeto, fazendo com que o feixe se propague além do horizonte de visada.

Entretanto, essa difração acarreta na diminuição da energia recebida, pois parte da onda é bloqueada nessa etapa.

2.4 Ondas de rádio

As ondas de rádio são ondas eletromagnéticas que se propagam no espaço através de uma antena transmissora até uma antena receptora. Essas ondas possuem determinadas frequências, e quando um receptor é sintonizado para uma faixa de frequências, é possível captar seu sinal.

“Sempre que uma tensão é aplicada à antena, um campo elétrico é estabelecido. Ao mesmo tempo, essa tensão faz a corrente percorrer a antena, produzindo um campo magnético” (HAYKIN, 2013, p. 42). Assim, as ondas de rádio são formadas pela interação do campo magnético com o campo elétrico. Esses campos emitem uma onda eletromagnética irradiada pela antena e se propagam através do espaço na velocidade da luz.

As ondas transmitidas pela antena são caracterizadas como ondas não guiadas, pois apesar da antena fornecer uma determinada direção preferencial de irradiação, não exerce influência sobre o trajeto da onda no espaço.

A faixa das frequências apropriadas para utilização em transmissões de rádio é denominada de espectro das ondas de rádio ou faixa de radiofrequências, estendendo-se de 10 kHz a 300 GHz, sendo, também, conhecida como faixa de rádio e de micro-ondas.

Em 1995, na conferência Mundial de Radiocomunicações em Genebra, a ITU (2016) estabeleceu o Regulamento das Radiocomunicações que subdivide o espectro de rádio em 9 bandas, apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Subdivisão das bandas de rádio.

Número da banda	Símbolo	Alcance de frequência
4	VLF	3 a 30 kHz
5	LF	30 a 300 kHz
6	MF	300 a 3000 kHz
7	HF	3 a 30 MHz
8	VHF	30 a 300 MHz
9	UHF	300 a 3000 MHz
10	SHF	3 a 30 GHz
11	EHF	30 a 300 GHz
12	-	300 a 3000 GHz

Fonte: ITU (2016).

No Brasil, a ANATEL (2019), segue a mesma subdivisão de bandas da ITU.

2.5 Distúrbios na radiopropagação

O canal de rádio é o sistema que apresenta menor custo e maior acessibilidade, porém as ondas eletromagnéticas, por se propagarem no espaço livre, encontram problemas de distúrbios e interferências, evidenciando sua fragilidade.

Durante a propagação, as ondas de rádio podem sofrer reflexão, difração ou refração, dependendo de fatores como tipo de enlace, frequência de operação e distância percorrida. Os efeitos desses fenômenos resultam em perda de energia e de atenuação.

2.5.1 Interferência e ruídos

Em todas as frequências, as ondas de rádio estão sujeitas a sofrer interferências em sua recepção. O principal causador é o ruído elétrico, que tem um comportamento aleatório e é resultado da agitação térmica dos elétrons existentes na matéria.

As fontes de ruído podem ser naturais, quando originadas na natureza, ou artificiais, produzidas pelo ser humano. O ruído atmosférico é um exemplo de ruído natural, enquanto a ignição de motores, linhas de transmissão, máquinas e equipamentos elétricos ou outros equipamentos que possam fazer parte do canal de comunicação são as principais causas dos ruídos artificiais. Isso significa que as ondas de rádio podem viajar longas distâncias e a

interferência iminente é um problema.

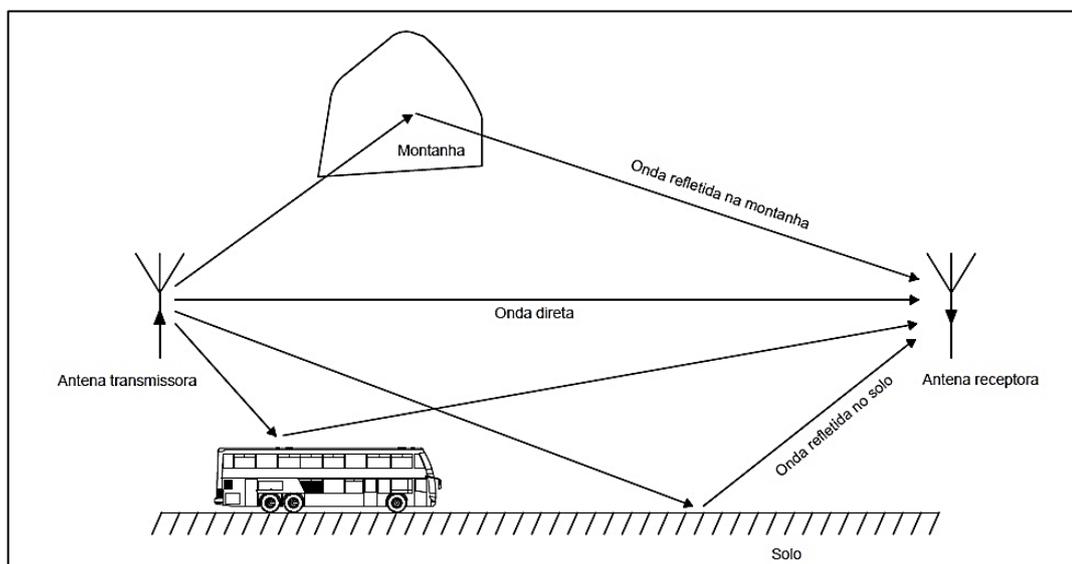
2.5.2 Ondas de multipercurso

A onda quando irradiada através de uma antena se propaga pelo espaço até alcançar seu destino. Neste percurso, parte da energia eletromagnética reflete no solo ou em outros obstáculos físicos, como veículos, montanhas, edifícios, e se dispersa, formando ondas secundárias. A onda principal, também chamada de onda direta, é a que chega na antena receptora sem sofrer nenhuma reflexão. As ondas secundárias refletidas seguem por vários caminhos diferentes em direção a antena receptora, mas algumas se perdem e não alcançam o seu destino.

Uma vez que as ondas secundárias provêm de diferentes percursos, encontram a antena com diferentes intensidades e defasagens entre si e a onda principal. Em dois sinais com a mesma amplitude, essas diferenças de fases causam o cancelamento de parte do sinal, e se a defasagem for de 180° , ocorre o cancelamento completo do mesmo. Assim, o sinal resultante na recepção é a soma vetorial dos sinais captados pela antena.

Apresenta-se na Figura 9 uma ilustração das ondas de multipercurso.

Figura 9 – Ondas de múltiplos percursos.



Fonte: Autor (2019).

2.5.3 Desvanecimento

O desvanecimento (*fading*) é uma flutuação da intensidade do sinal recebido e ocorre devido a problemas na propagação das ondas de radiofrequência.

Frenzel (2013), estabelece que o desvanecimento é causado por quatro fatores: variação

na distância entre transmissor e receptor, características do ambiente no percurso da propagação, ondas de múltiplos percursos, e movimento relativo entre transmissor e receptor.

No que diz respeito à distância, quanto mais afastado o transmissor estiver do receptor, menor será a intensidade do sinal. Os obstáculos ao longo do caminho são outro um fator determinante para a atenuação do sinal, pois fazem com que o sinal sofra reflexão e seja direcionado por caminhos distintos até a antena receptora, resultando no desvanecimento. O terceiro fator agravante do desvanecimento são as ondas de multipercurso, uma vez que provocam a todo instante variações da intensidade do sinal que chega na antena receptora em diferentes tempos. Já o movimento relativo entre transmissor e receptor acontece quando o transmissor está em movimento em relação ao receptor, causando uma mudança de frequência, conhecida como efeito Doppler.

Para superar o desvanecimento, a maioria dos sistemas de comunicação possuem alta potência de transmissão e sensibilidade nos receptores, proporcionando uma margem de segurança. Assim, é possível assegurar que os sinais refletidos mais fracos não degradem substancialmente o sinal principal. Em cenários que o transmissor e o receptor se encontram em pontos fixos, podem ser utilizadas antenas altamente diretivas, onde feixes estreitos de energia eletromagnética são transmitidos, eliminando grande parte dos múltiplos percursos e do desvanecimento relacionado.

Outra técnica utilizada para amenizar os efeitos desse fenômeno é o sistema de diversidade. Nele, múltiplos transmissores, receptores e antenas são combinados mutuamente para obter a melhor recepção possível, minimizando assim os problemas de multipercurso. Os dois tipos mais comuns de diversidade são de frequência e espacial.

a) Diversidade de frequência

Na diversidade de frequência, dois conjuntos de transmissores e receptores em diferentes locais e com diferentes frequências espaçadas uma da outra são usados para transmitir a mesma informação ao mesmo tempo, garantindo que pelo menos um dos sinais tenha melhor desempenho sobre o desvanecimento e seja recebido de forma confiável. Contudo, uma vez que o custo com equipamentos é dobrado e o espectro de frequências é escasso, essa técnica é raramente usada, com exceção de casos onde a confiabilidade deve ser garantida ao extremo.

b) Diversidade espacial

No sistema de diversidade espacial, utiliza-se duas antenas receptoras espaçadas entre

si, horizontalmente ou verticalmente. O objetivo desta técnica é que as antenas recebam sinais com diferentes variações, onde uma será melhor que a outra. Em geral, quanto maior o espaçamento entre as antenas, menor será a probabilidade de o sinal transmitido encontrar os mesmos problemas de propagação nos diferentes caminhos e melhor o sistema será. Os sinais recebidos pelas antenas serão somados linearmente através de um sistema combinador. Assim, o sinal resultante será maior e diminuirá o desvanecimento.

Quando a frequência de operação do sistema é baixa, tem-se uma onda longa, fato esse que torna inviável utilizar o espaçamento vertical, pois a distância entre as antenas é geralmente de 10 a 20 vezes o comprimento da onda, atingindo centenas ou até milhares de metros. Dessa forma, utiliza-se o espaçamento horizontal para satisfazer essa condição.

“Muitos sistemas utilizam a relação $h/d = 11$ para determinar um espaçamento ideal mínimo entre as antenas” (FRENZEL, 2013, p. 84). A Equação 6 transcreve essa afirmação.

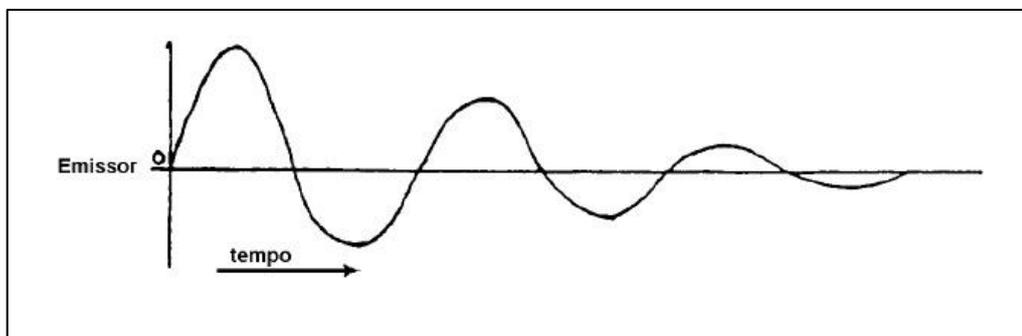
$$d = 11 * h \quad (6)$$

Tendo como exemplo uma antena presa no alto de uma torre de transmissão a 100m de altura (h) do chão, sabe-se através dessa relação que a distância (d) mínima de espaçamento entre as duas antenas iguais utilizadas no sistema de diversidade espacial deve ser de 1100 m.

2.5.4 Atenuação

A diminuição gradual da intensidade da potência à medida que a onda se propaga no espaço é chamada de atenuação. Ocorre pelo aumento da distância entre o campo eletromagnético e a fonte emissora, através de condições atmosféricas e/ou presença de obstáculos. A Figura 10 demonstra a perda de potência de uma onda ao longo do tempo, conforme a distância aumenta.

Figura 10 – Atenuação de uma onda eletromagnética.



Fonte: BRASIL (1996).

A atenuação causada por condições atmosféricas concerne principalmente a ação de

gases e da água. Na troposfera existe uma alta concentração de gases e é nela onde ocorrem a maioria dos fenômenos climáticos como a formação de nuvens, a chuva e a neve. Esses fenômenos aumentam a densidade de umidade do ar e assim a propagação se dá por meio de atenuações.

A chuva apresenta-se como um obstáculo na recepção das ondas de radiofrequência, pois causa a degradação do sinal, enfraquecendo e despolarizando a onda. Seu comportamento assemelha-se a um dielétrico, no qual absorve energia e a dissipa em forma de aquecimento ou espalhamento. Em altas frequências, quando os comprimentos de onda estão na mesma faixa de tamanho que as gotas de chuva ou flocos de neve, acontece o espalhamento do sinal por reflexão. Assim, as áreas com maiores taxas pluviométricas são as mais afetadas pela atenuação.

Miyoshu e Sanchez (2010), descrevem que a atenuação é mais crítica para enlaces que utilizam a frequência acima de 10 GHz, o que acaba limitando o projeto para enlaces mais longos.

A atenuação também pode ocorrer através da absorção de energia no meio, dado que a presença de obstáculos na atmosfera com dimensões semelhantes aos comprimentos de onda acarreta em difração.

2.5.5 Absorção

As ondas eletromagnéticas, ao se propagarem na atmosfera, são afetadas pela ocorrência de absorção. “O vapor da água e as moléculas de oxigênio existentes na atmosfera são os principais responsáveis pela absorção de energia. Os efeitos dessa absorção crescem com o aumento da frequência” (BRASIL, 1996, p. 1236). As ondas de baixa frequência atravessam melhor os obstáculos, enquanto as ondas curtas e de frequência superior são absorvidas mais facilmente por objetos sólidos.

As ondas terrestres podem perder energia para o ar e também para a superfície. Quando a onda é refratada por um obstáculo, segue para baixo e parte de sua energia é absorvida pelo solo, condição que se repete sucessivamente após a primeira absorção.

O nível de absorção é inverso à condutividade da superfície. Quanto maior for a condutividade do meio, menor será a absorção. Por exemplo, transmissões sobre o mar têm alcance significativamente maior que transmissões sobre o solo, pois o coeficiente de condutividade da água salgada é melhor.

2.5.6 Efeito Doppler

O efeito Doppler é a alteração da frequência ou do comprimento de uma onda em razão do movimento de aproximação ou afastamento entre transmissor e receptor. No caso de aproximação, a frequência da onda recebida fica maior que a frequência original e, no caso de afastamento, a frequência diminui.

Esse fenômeno acontece porque a velocidade de propagação de uma onda no espaço não muda, mesmo que a fonte ou o observador se mova. Dessa forma, ocorre a variação no comprimento de onda ou na frequência da onda captada pelo receptor.

Um exemplo do efeito Doppler nas comunicações sem fio, é a perda da comunicação, pois o sinal chega ao receptor em uma frequência diferente, caso o efeito seja acentuado.

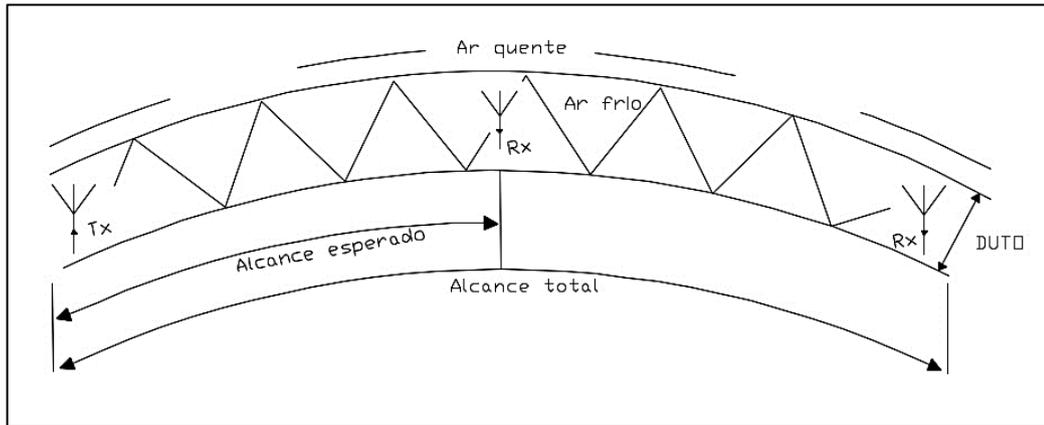
2.5.7 Dutos

Os dutos, representados na ilustração da Figura 11, são regiões no espaço que atuam como um túnel onde a energia é confinada e concentrada. Nessas zonas o sinal sofre sucessivas refrações, provocando o desvio da direção principal de propagação da onda. Segundo Oliveira Júnior, Kwon e Oliveira (2005), as condições necessárias para a formação de dutos atmosféricos são a temperatura crescente e a umidade relativa decrescente.

Isto ocorre quando massas de ar frio entram em contato com massas de ar mais aquecidas, determinando a inversão de temperatura. Como a taxa de refração é diferente em cada massa de ar, forma-se uma superfície de separação entre dois meios. Essas perturbações térmicas que acontecem nas camadas de ar da atmosfera podem criar dutos de superfície ou dutos elevados.

Os dutos de superfície são formados sob condições atmosféricas raras que ocorrem entre a parte inferior de uma camada de ar e a superfície terrestre. Um duto de superfície perdura horas ou até mesmo dias. Os dutos elevados são muito semelhantes ao de superfície, mas ocorrem entre superfícies separadoras acima da superfície terrestre. As ondas transmitidas de um avião, por exemplo, não alcançam a antena receptora que está abaixo dele.

Os dutos são capazes de provocar o desvanecimento do sinal ou fazer com que as ondas alcancem regiões além dos limites normais de recepção, possibilitando temporariamente um maior alcance de transmissão. O principal problema disso é que se a antena receptora não estiver dentro do duto, o sinal não será recebido. Assim, os dutos causam a diminuição da eficiência dos sistemas de comunicação, prejudicando principalmente propagações mais longas.

Figura 11 – Duto atmosférico.

Fonte: Autor (2019).

3 TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE RADIOFREQUÊNCIA

Um enlace de radiofrequência é formado por equipamentos capazes de transmitir e receber sinais eletromagnéticos, interligando um sistema de comunicação. Dentre eles encontram-se as antenas, as linhas de transmissão, os transmissores e os receptores.

3.1 Antenas

A antena é um elemento essencial nas comunicações de radiofrequência onde é utilizada para irradiar e/ou captar ondas eletromagnéticas.

Durante a transmissão, a antena converte a corrente de RF gerada pelo transmissor em ondas eletromagnéticas. Inversamente, na recepção, converte a onda eletromagnética em corrente elétrica de RF, a ser processada pelo receptor, visando a obtenção da informação na forma como foi transmitida (MEDEIROS, 2007, p. 181).

Seu princípio de funcionamento consiste em um transmissor que gera o sinal da informação na forma de corrente alternada. Ao percorrer a antena de transmissão, essa corrente produz uma onda eletromagnética a seu redor que se propaga pelo espaço. Quando alcança a antena receptora com menor intensidade, a onda induz uma pequena corrente elétrica, que é então ampliada no receptor.

O dimensionamento de uma antena é feito com base no comprimento de onda, definido através da frequência de operação do sistema. A irradiação é mais eficaz quando o tamanho da antena está diretamente relacionado ao comprimento de onda do sinal transmitido. Geralmente o tamanho da maioria das antenas é uma fração do comprimento de onda, correspondendo a metade ou até um quarto desse tamanho.

As antenas também apresentam reciprocidade, isto é, as propriedades válidas para transmissão e recepção são as mesmas. No entanto, Frenzel (2013), afirma que uma antena usada para transmissão de alta potência deve empregar materiais mais resistentes de modo a suportar elevadas correntes e tensões que venham a ser aplicadas nela.

A eficiência de uma antena está diretamente relacionada com sua ressonância, sendo que os principais componentes constituintes do sistema devem apresentar valores próximos de impedância para que essa condição seja satisfeita.

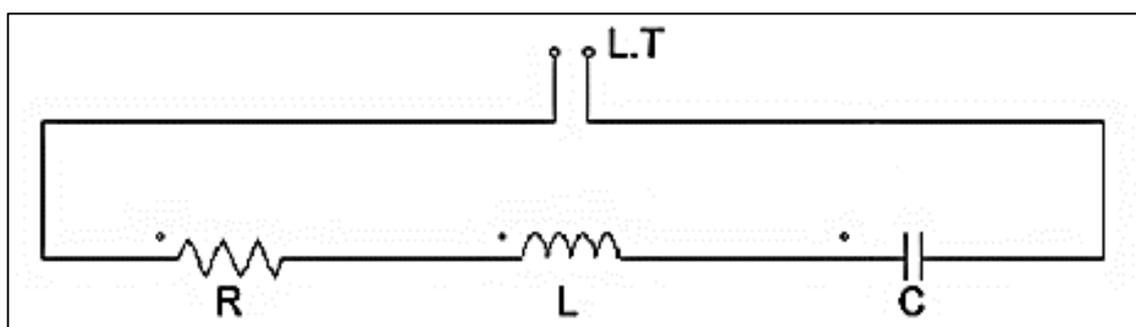
Para o transmissor, a antena age como um circuito ressonante em série pelo fato de seus condutores possuir indutância e capacitância quando percorridos por corrente elétrica. De acordo com Braga (2012), os circuitos ressonantes são responsáveis pela frequência do sinal que deve ser transmitido ou recebido, pela separação de sinais em filtros, pela rejeição de interferências e ruídos, entre outros.

Esse circuito é constituído por um indutor, um capacitor e um resistor em série, onde a indutância (L) representa o campo magnético, a capacitância (C) representa o campo elétrico e a resistência (R) é a resistência de radiação, que varia de acordo com o diâmetro do condutor e altura.

O indutor nada mais é do que uma bobina que ao ser percorrida por uma corrente elétrica, é capaz de armazenar energia em forma de campo magnético. A indutância é a grandeza relacionada ao indutor, medida em *Henry* (H). O capacitor é um componente que armazena energia em um campo elétrico, formando por dois materiais condutores separados por um dielétrico. Sua unidade de grandeza é a capacitância, dada em *Farad* (F). O resistor converte energia elétrica em energia térmica e é utilizado quando se quer reduzir a quantidade de corrente que passa em um circuito. Denomina-se resistência a grandeza relacionada ao resistor, em *Ohm* (Ω).

A Figura 12 apresenta o circuito básico de um circuito ressoante.

Figura 12 – Circuito básico de uma antena.



Fonte: Adaptado de MARTINS (2016).

3.1.1 Tipos de antena

As antenas são empregadas em diferentes aplicações, variando em formato, tamanho, frequência, potência e ganho. De acordo com Carvalho e Badinhan (2011), os principais tipos de antenas lineares, antenas com refletores e antenas de micro-ondas são: dipolo, dipolo de meia onda, dipolo dobrado, dipolo de quarto de onda, *Yagi-Uda*, helicoidal e parabólica.

Um outro tipo que será somente citado nesta ocasião são as antenas de arranjo acionado. Contendo dois ou mais elementos acionados, recebem individualmente energia de radiofrequência a partir da linha de transmissão em arranjos diferentes e produzem diferentes graus de diretividade e ganho. Organizam-se basicamente em: colineares, transversais, longitudinais e log-periódicas.

Relaciona-se a seguir os principais tipos de antenas:

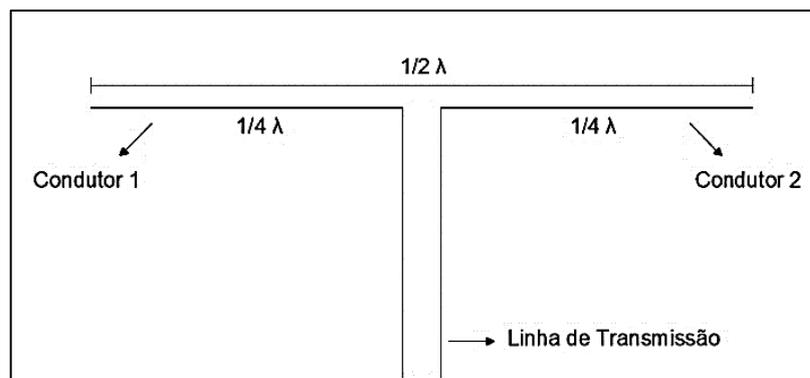
a) Antena dipolo

A antena dipolo é formada basicamente por duas hastes condutoras, alimentadas por um gerador de corrente de radiofrequência através de uma linha de transmissão. O comprimento das hastes é igual ao comprimento de onda da radiação a ser emitida ou recebida.

b) Antena dipolo de meia onda

De acordo com Frenzel (2013), um dos tipos de antena mais utilizados é o dipolo de meia onda. Formada por dois condutores medindo um quarto do comprimento de onda, a antena de Hertz, como também é conhecida, tem comprimento total igual à metade do comprimento de onda transmitida. O esquema de uma antena dipolo de meia onda é apresentado na Figura 13.

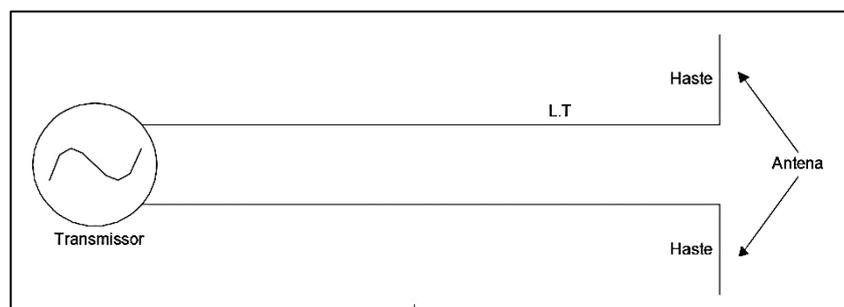
Figura 13 – Esquema de uma antena dipolo.



Fonte: Adaptado de FRENZEL (2013).

O conjunto de transmissão de dipolo de meia onda ilustrado na Figura 14, “é formado por um transmissor ou gerador da RF, linha de transmissão (LT) e pela antena composta de dois elementos metálicos que formam o dipolo” (MEDEIROS, 2007, p. 187).

Figura 14 – Conjunto de transmissão de RF.

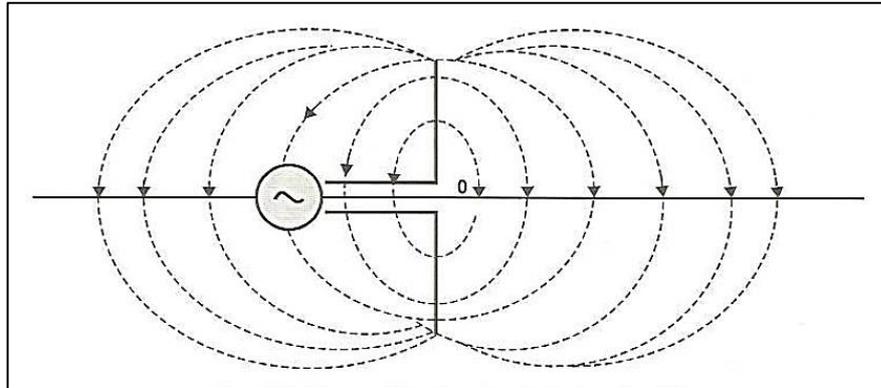


Fonte: Adaptado de MEDEIROS (2007).

Em uma antena de meia onda, as linhas de campo são formadas pelo movimento das

cargas elétricas ao longo dela em uma sequência de tempo. Simultaneamente, o campo magnético dá origem à linha de campo elétrico, que se desprende da antena e se propaga no espaço. O campo elétrico formado pelo dipolo meia onda é apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Campo elétrico formado pelo dipolo meia onda.

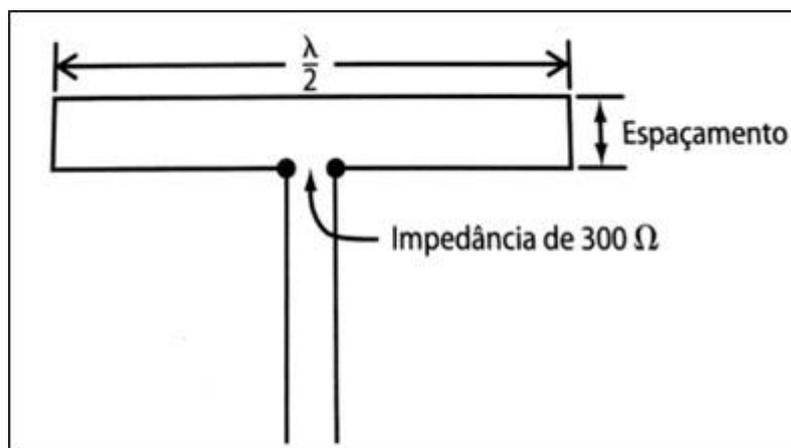


Fonte: MEDEIROS (2007).

c) Antena dipolo dobrado

A antena dipolo dobrado, mostrada na Figura 16, é formada por dois dipolos de meia onda em paralelo, espaçados entre si em 1 polegada para alta frequência ou de 2 a 3 polegadas para baixa frequência. Por possuir um valor de impedância próximo a 300 ohms, é indicada para transmissão de sinais VHF. Seu esquema construtivo e características são muito semelhantes às antenas de dipolo de meia onda, com exceção do aumento da impedância e das extremidades dos condutores paralelos que se encontram conectadas.

Figura 16 – Antena dipolo dobrado.



Fonte: MARTINS (2016).

d) Antena dipolo de quarto de onda

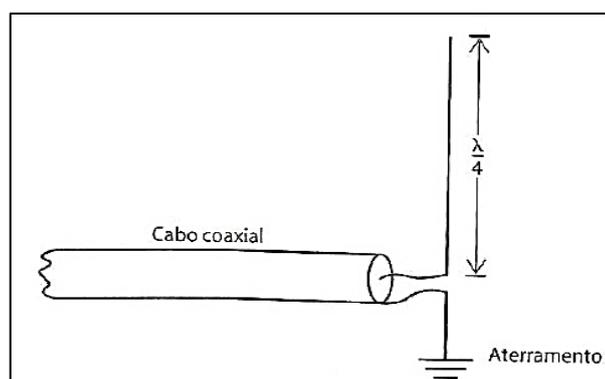
Conhecida também como antena de monopolo curto, antena vertical plano-terra ou

antena de Marconi, possui funcionamento omnidirecional no plano horizontal. É formada por um condutor com comprimento de um quarto do comprimento de onda, posicionado na vertical e ligado ao condutor central da linha de transmissão. Sua eficácia depende do contato com a terra, ou em altas frequências, uma superfície metálica pode servir como plano-terra.

Para Gomes (2007), a parte descoberta da haste vertical permite utilizar a terra como um condutor eficiente, no qual o monopolo tem sua imagem refletida no solo e passa a se comportar como um dipolo. Assim, para transmissões de baixa frequência e grande comprimento de onda, onde as antenas são muito grandes, a utilização das antenas de dipolo um quarto de onda é mais vantajosa do que as antenas de dipolo de meia onda, visto que tem as mesmas características de irradiação com a metade do comprimento.

A representação gráfica deste tipo de antena é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Esquema de uma antena vertical plano-terra.

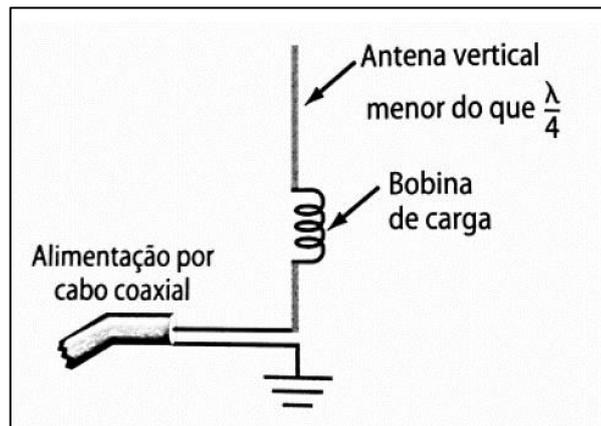


Fonte: FRENZEL (2013).

A antena vertical pode ainda assumir valores maiores que um quarto do comprimento de onda, sendo comuns cinco oitavos ou três quartos do comprimento de onda. Dessa forma, sua característica de irradiação se altera, apresentando ganhos de pelo menos 2 dBi. De acordo com Martins (2016), o dBi é uma unidade usada para expressar o ganho de uma antena real em relação uma antena de referência isotrópica que irradia uniformemente em todas as direções, explanado no item ‘e’ da seção 3.1.2.

Ainda é possível encurtar a antena através de componentes elétricos concentrados, como um indutor em série, ou bobina de carga, o qual compensará a alteração da ressonância que a antena sofre em virtude da diminuição de indutância provocada por esse encurtamento, trazendo a antena novamente à sua ressonância na frequência desejada. Esse método é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Haste vertical encurtada com bobina de carga.

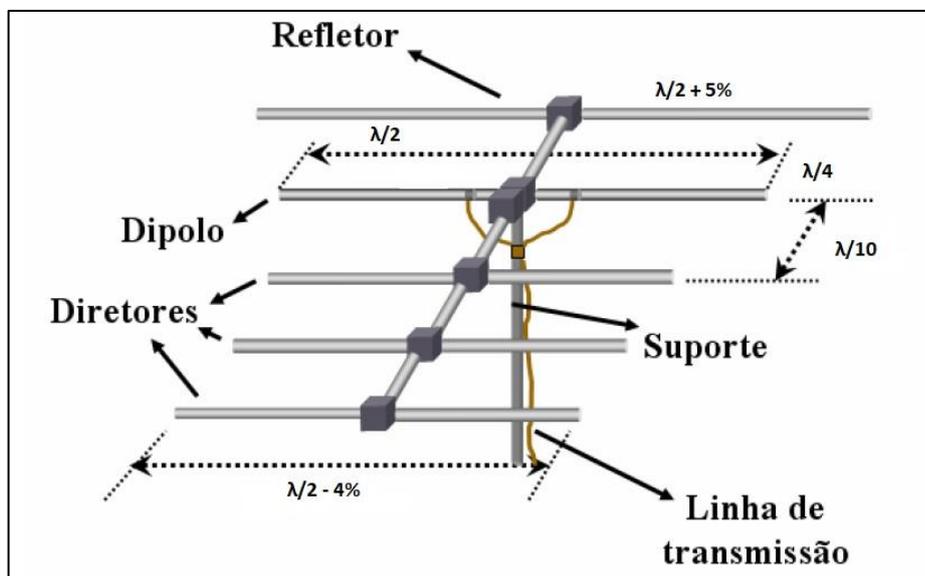


Fonte: FRENZEL (2013).

e) Antena *Yagi-Uda*

A antena *Yagi* é formada por dipolos em paralelo, sendo o principal deles um dipolo de meia onda chamado de excitador, e elementos parasitas passivos, denominados refletores e diretores apoiados sobre um suporte comum conforme a Figura 19. Para Gomes (2007, p. 369), a função dos elementos parasitas é elevar o ganho da antena e sua relação frente-costas, diminuindo a largura do feixe.

Figura 19 – Antena *Yagi-Uda*.



Fonte: Adaptado de SANTOS (2007).

Os refletores ficam localizados atrás do dipolo excitador, atenuando ondas incidentes pelas costas. Os diretores ficam na frente do dipolo excitador, aumentando a diretividade da antena. O dimensionamento e o espaçamento entre esses elementos é que determinam as características de irradiação e impedância de entrada da antena.

Seu funcionamento consiste na alimentação do dipolo principal que excita os dipolos refletores e diretores. Quando o sinal irradiado a partir do dipolo atinge o refletor, induz uma tensão que produz uma radiação própria no refletor. As radiações no refletor e no dipolo ficam em fase, somando-se. No diretor, uma tensão é provocada através do dipolo principal e o sinal irradiado pelo diretor soma-se em fase com o elemento acionado. Assim, à medida que irradiação acontece, ocorre a superposição do campo elétrico no elemento ativo, provocando o aumento de ganho na antena.

Vale ressaltar que conforme o número de diretores aumenta, maior será a diretividade da antena e menor será a largura de banda, o que implica na diminuição da faixa de frequências. Por este motivo não se recomenda utilizar uma antena *Yagi-Uda* com mais de sete elementos constituintes.

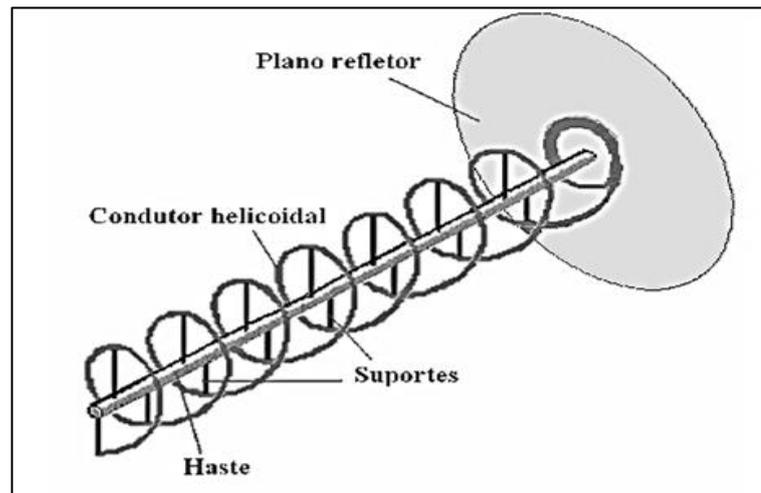
As antenas *Yagi-Uda* ainda podem ser combinadas de forma a aumentar os ganhos e a diretividade do arranjo. Essa associação pode ser através do empilhamento das antenas ou colocando-as lado a lado.

f) Antena helicoidal

Consiste em um condutor cônico ou cilíndrico e um plano terra. É particularmente usada para transmissões na faixa de UHF e possui diâmetro de aproximadamente um terço do comprimento de onda e comprimento de um a dois comprimentos de onda. A radiação emitida por essa antena tem polarização circular, pois os campos elétrico e magnético tem sua direção variando circularmente com o avanço da hélice.

Para Santos (2007), a antena helicoidal apresentada na Figura 20, pode captar ondas de polarização circular em um determinado sentido, mas não é capaz de captar no sentido oposto, tendo a vantagem de evitar interferências e rejeitar sinais que invertem seu sentido de rotação após a reflexão.

Figura 20 – Representação da antena helicoidal.



Fonte: SANTOS (2007).

g) Antena parabólica

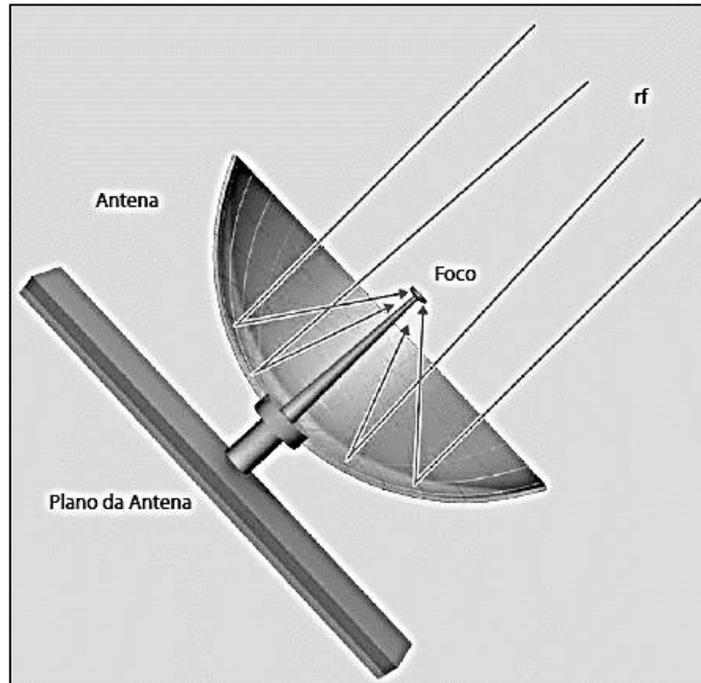
Sabe-se que conforme a frequência aumenta, o comprimento de onda e o tamanho da antena diminuem, fazendo com que seja necessário um elemento capaz de melhorar a concentração dos feixes de onda. Para isso, as antenas que operam na faixa de micro-ondas possuem um refletor parabólico de modo a aumentar sua diretividade e ganho.

As antenas parabólicas, ou, antenas de abertura, classificam-se basicamente em *focal-point* e *Cassegrain*.

No sistema *focal-point*, um alimentador é posicionado no centro do refletor, em um ponto chamado foco. “Os raios provenientes do alimentador, que atingem o refletor, são refletidos seguindo trajetos paralelos ao eixo de simetria do parabolóide” (SANTOS, 2007, p. 63). Isso permite uma grande concentração de energia irradiada em torno desse eixo.

A Figura 21 ilustra o esquema de uma antena parabólica e oferece uma noção básica de como acontece o direcionamento dos feixes de onda no refletor, seja para transmissão ou recepção do sinal de radiofrequência.

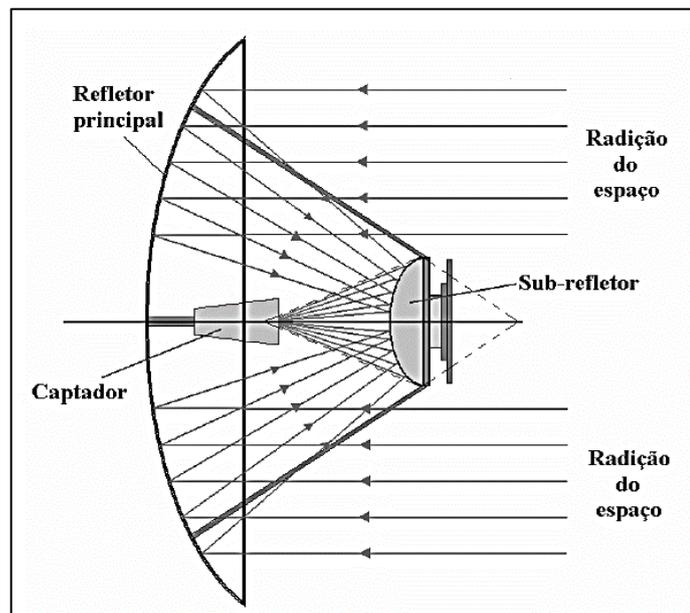
Figura 21 – Sinais perpendiculares incidindo no refletor parabólico.



Fonte: CARVALHO; BADINHAN (2011).

Uma antena parabólica do tipo *Cassegrain* possui refletor duplo, no qual o sinal é refletido duas vezes. A primeira ocorre no refletor principal e a segunda no sub-refletor localizado na região focal da parábola que direciona o sinal para o captador conforme demonstra a Figura 22.

Figura 22 – Captação do sinal em uma antena Cassegrain.



Fonte: SANTOS (2007).

É importante salientar que o ângulo de elevação e o azimute – posicionamento do refletor em relação ao Norte – devem ser considerados no posicionamento de uma antena, pois se estiverem fora de posição podem causar a perda de recepção de um sinal.

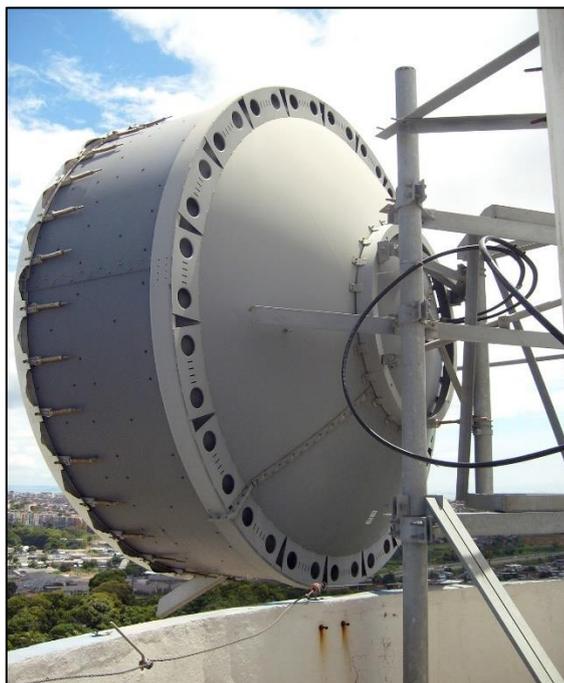
h) Antenas de micro-ondas de alto desempenho

São antenas parabólicas de alto desempenho empregadas para obter grande diretividade. São capazes de concentrar um feixe estreito de radiação e o transmitir na direção da antena receptora, minimizando interferências provocadas por outras antenas próximas.

Nessas antenas de alto desempenho é comum a utilização de radomes e colares. Os radomes são blindagens utilizadas para aumentar a diretividade da antena ao mesmo tempo que realiza sua proteção contra fatores ambientais. Os colares são utilizados para aumentar o desempenho do sistema, reduzindo transbordamento de radiação.

A Figura 23 apresenta uma antena de micro-ondas de alto desempenho. Na parte frontal do cilindro se localiza os radomes, enquanto nas laterais pode-se visualizar os colares.

Figura 23 – Antena de micro-ondas.



Fonte: BLOGSPOT (2013).

i) Antenas inteligentes

As antenas inteligentes são muito utilizadas em sistemas celulares e possuem grande tecnologia empregada. “As antenas inteligentes são uma combinação de um conjunto de antenas associado a uma unidade de processamento de sinais que otimiza a transmissão e a recepção

em resposta a um sinal recebido” (SANTOS, 2007, p. 68).

O sistema de antenas inteligentes é constituído por 4 a 12 elementos, capazes de enviar e receber sinais na mesma direção, além de rejeitar possíveis interferências.

As principais tecnologias empregadas são: lóbulos comutados e lóbulos adaptativos.

Os lóbulos comutados são compostos por múltiplos feixes de radiação fixos para cada direção, abrangendo o plano de 360°. Ao detectar o sinal recebido de uma direção, o sistema determina que o feixe que se encontra em linha de visada com o usuário seja utilizado, e à medida que o usuário se desloca, o feixe seguinte é utilizado.

Os lóbulos adaptativos tornam o diagrama de irradiação dinâmico. Um lóbulo principal aponta para o usuário, enquanto lóbulos secundários apontam para múltiplas direções, enquanto os mínimos e nulos de radiação apontam para as fontes de interferências.

A Figura 24 mostra uma estação transmissora composta por inúmeras antenas inteligentes.

Figura 24 – Estação transmissora com o sistema de antenas inteligentes.



Fonte: BLOGSPOT (2013).

3.1.2 Características das antenas

Os parâmetros que definem uma antena são essenciais para a escolha e aplicação da mesma em um sistema de transmissão ou recepção. Além das características de polarização e do comprimento elétrico de uma antena, vistas anteriormente, outros parâmetros fundamentais são enumerados nos subtópicos que sucedem.

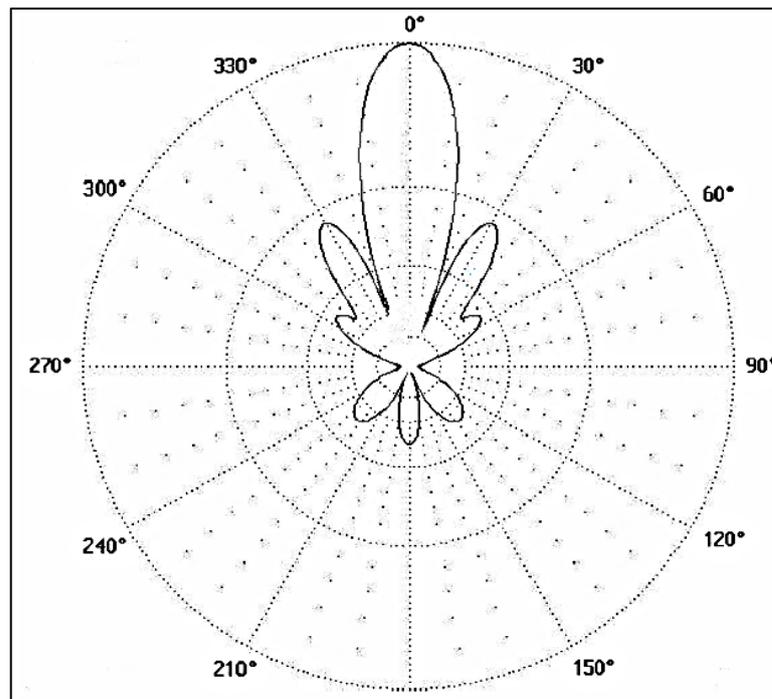
a) Diagrama de irradiação

O diagrama de irradiação “é a representação em coordenadas polares da intensidade do campo irradiada ou recebida por uma antena para todas as regiões do espaço” (GOMES, 2005, p. 363), ou seja, a forma como a energia irradiada por uma antena se distribui pelo espaço.

É comum que cada tipo de antena irradie a energia eletromagnética mais intensamente em uma direção do que na outra. Assim, é possível analisar o diagrama de irradiação característico de cada uma e determinar a melhor aplicação para cenários específicos.

A Figura 25 a seguir é um diagrama de irradiação de uma antena *Yagi-Uda* em um plano de 360°. A antena fica localizada no centro do diagrama com sua frente voltada para a direção 0°. Nota-se nesta mesma direção a presença de um lóbulo principal, e nas outras direções a presença de lóbulos secundários.

Figura 25 – Diagrama de radiação de uma antena *Yagi-Uda*.



Fonte: SANTOS (2007).

O lóbulo principal concentra o maior volume de energia e deve sempre ser direcionado para o local da recepção.

b) Largura de banda

A largura de banda (BW – *Bandwidth*) é uma característica básica das antenas e diz respeito à faixa de frequências que a antena consegue operar sem causar prejuízos na transmissão ou recepção do sinal. A antena opera como um filtro passa-baixas, que funciona

dependendo das características de indutância, capacitância e resistência de seu projeto construtivo, sendo seletiva para algumas frequências. O filtro passa-baixas é um circuito formado por um resistor e um capacitor que permite a passagem de baixas frequências e atenua a amplitude das frequências maiores que a frequência de corte.

c) Diretividade

A diretividade de uma antena é a capacidade que ela tem em irradiar energia mais fortemente em uma determinada região do espaço do que em outras. É definida pela relação entre o campo irradiado por essa antena em determinada direção e o campo irradiado pela antena isotrópica em determinada potência.

Em um radiador isotrópico – antena ideal que recebe e transmite energia eletromagnética igualmente em todas as direções, sem perdas – a diretividade (D) é igual a 1 e o volume de energia irradiado tem o formato de uma esfera. Outra antena não apresentará os mesmos resultados, pois o volume de energia irradiado terá outra forma e determinadas regiões da superfície da esfera apresentarão maior densidade de potência que outras. Dessa forma, a diretividade de uma antena é calculada pela Equação 7.

$$D = \frac{P_{(max)}}{P_{(iso)}} \quad (7)$$

onde:

D – Diretividade;

$P_{(max)}$ – Potência máxima irradiada pela antena;

$P_{(iso)}$ – Potência irradiada por uma antena isotrópica.

Quanto mais próxima a diretividade for de 1, mais diretiva será a antena.

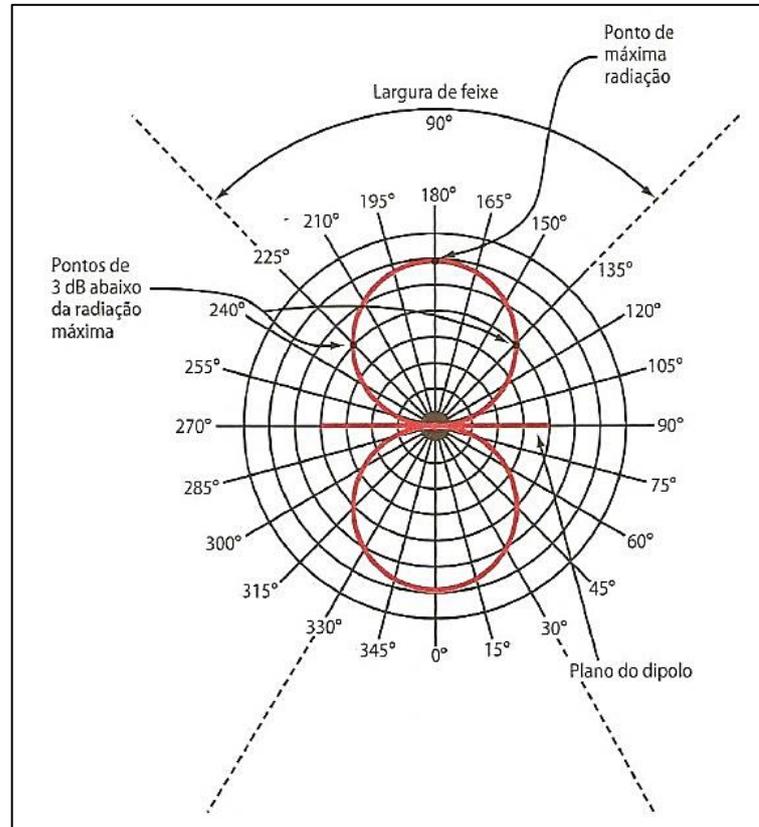
Uma antena direcional transmissora focaliza a potência a ser transmitida em um feixe estreito de energia e o direciona para a antena receptora. A antena direcional receptora deve estar apontada diretamente para a transmissora, eliminando a interferência de outros sinais recebidos a partir de todas as outras direções que não seja a direção do sinal desejado e proporcionando maior eficiência na transmissão da potência.

d) Largura do feixe

É o ângulo formado por dois pontos que mede a diretividade de uma antena. A largura do feixe é medida entre os pontos que se estendem do centro da curva de radiação até os pontos que estão 3 dB abaixo da radiação máxima, conforme a Figura 26. Os pontos de 3 dB abaixo

do máximo, reduzem seu valor para 70,7% do máximo devido a frequência de corte.

Figura 26 – Padrão de radiação horizontal e largura do feixe de um dipolo de meia-onda.



Fonte: FRENZEL (2013).

O ângulo define a abertura da antena. Quando menor ele for, mais estreito o feixe será, aumentando a diretividade da antena.

A eficiência do feixe, definida pela Equação 8, é a relação entre a energia do lóbulo principal e toda a energia irradiada pela antena.

$$z = \frac{P_{(feixe)}}{P_{(irrad)}} * 100 \quad (8)$$

onde:

z – Eficiência do feixe (%);

$P_{(feixe)}$ – Potência do lóbulo principal;

$P_{(irrad)}$ – Potência total irradiada pela antena.

e) Ganho

O ganho é o produto da eficiência pela diretividade da antena conforme a Equação 9. Leva em conta a eficiência da antena como um todo, considerando perdas relacionadas com a

resistência elétrica e diferenças entre impedâncias. Em antenas altamente diretivas, com potência concentrada em uma direção, o ganho de potência é maior.

$$G = \eta * D \quad (9)$$

onde:

G – Ganho da antena (dBi);

η – Rendimento;

D – Diretividade.

De acordo com Frenzel (2013), o ganho também pode ser definido como a saída de um circuito eletrônico dividido pela entrada do mesmo. No entanto, uma antena não consegue ter ganho nesse sentido, visto que a potência irradiada não pode ser maior que a potência de entrada. Assim, o ganho da antena é entendido como a capacidade em irradiar mais potência em uma direção do que outra antena. Essa propriedade é característica em antenas direcionais, e quanto mais direcional ela for, maior será o ganho na transmissão.

Então, a expressão do ganho de uma antena é a razão entre a potência efetivamente radiada e a potência de entrada, expresso em decibéis, conforme a Equação 10.

$$G = 10 * \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (10)$$

onde:

G – Ganho da antena (dBi);

P_{out} – Potência de radiada;

P_{in} – Potência de entrada.

A expressão $10 * \log$ é utilizada para transformar o valor obtido para a grandeza em decibéis em relação a uma antena isotrópica (dBi).

A Tabela 2, apresenta o levantamento do ganho em algumas antenas vistas anteriormente, baseando-se nas referências bibliográficas mencionadas na mesma.

Tabela 2 – Ganhos.

Tipo de antena	GOMES (2007)	MEDEIROS (2007)	CARVALHO; BADINHAN (2011)	MARTINS (2016)
Dipolo meia onda	-	2,3 dBi	2,15 dBi	-
Parabólica	2,55 a 9,54 dBi	-	9,4 a 12,7 dBi	3 a 15 dBi
Yagi-Uda	-	-	20 a 35 dBi	-

Fonte: Autor (2019).

f) EIRP (*Effective Isotropic Radiation Power*)

A potência isotrópica efetiva de radiação é a referência normalmente utilizada para expressar a potência de irradiação de uma antena isotrópica com diretividade. Vale ressaltar que os cálculos para uma antena isotrópica proporcionam o mesmo resultado para uma antena direcional, por se tratar de um padrão de referência para todas as antenas.

A expressão que rege o EIRP é dada pela Equação 11.

$$EIRP = P_t + G \quad (11)$$

onde:

$EIRP$ – Potência isotrópica efetiva radiada (dBW);

P_t – Potência de transmissão;

G – Ganho da antena.

A potência efetiva radiada em dBW tem como referência a potência de 1 W (*watt*). Para convertê-la na unidade comumente utilizada, o dBm, com referência de 1 mW, basta adicionar o valor 30 ao resultado obtido pela expressão. O valor adicionado não é proporcional à relação 1W/1000W como se conhece devido à função exponencial que abrange a grandeza.

Ainda, de acordo com a Rapidtables (2019), para encontrar a potência (P) em watts (W), utiliza-se a Equação 12.

$$P = 10^{0,1 \cdot EIRP} \quad (12)$$

g) Eficiência

É a razão entre a potência irradiada por uma antena e a potência entregue pelo transmissor. A eficiência de uma antena é calculada através da Equação 13.

$$\eta = \frac{P_{ir}}{P_{ent}} * 100 \quad (13)$$

onde:

η – Rendimento da antena (%);

Pir – Potência irradiada;

Pent – Potência entregue;

h) Impedância

A impedância pode ser entendida como a dificuldade oferecida à variação de corrente em um elemento elétrico.

Do ponto de vista elétrico, a antena pode ser vista como impedância, com componentes resistivos, capacitivos e indutivos. A impedância da antena na faixa de operação deve ter o mesmo valor apresentado pela linha de transmissão à qual a antena está ligada. Caso contrário, ocorrerá descasamento de impedâncias entre a linha de transmissão e a antena, provocando perdas de energia, devido a reflexões. Essa energia refletida, somada com a energia incidente, gera na linha de transmissão uma onda estacionária, prejudicando a comunicação (CARVALHO; BADINHAN, 2011, p. 111).

A transferência de energia entre o transmissor, a linha de transmissão e a antena só é eficiente se a impedância deles for a mesma.

A Tabela 3, apresenta o levantamento de impedâncias características em algumas antenas estudadas neste capítulo, baseando-se em referências bibliográficas mencionadas na mesma.

Tabela 3 – Impedâncias.

Tipo de antena	GOMES (2007)	MEDEIROS (2007)	CARVALHO; BADINHAN (2011)	FRENZEL (2013)	MARTINS (2016)
Dipolo meia onda	73 Ω	-	-	73 Ω	73 Ω
Dipolo λ	200 Ω	-	-	-	-
Dipolo $3/2 \lambda$	100 Ω	-	-	-	-
Dipolo dobrado	292 Ω	-	300 Ω	300 Ω	300 Ω
Helicoidal	150 Ω	-	-	-	-
Vertical	-	36,5 Ω	36 Ω	36,5 Ω	-

Fonte: Autor (2019).

i) Relação frente-costas

É a relação entre a potência irradiada no lóbulo principal e a potência irradiada no lóbulo de sentido contrário. Essa relação é expressa pela Equação 14.

$$R_{(fc)} = \frac{P_{(f)}}{P_{(c)}} \quad (14)$$

onde:

$R_{(fc)}$ – Relação frentes-costas;

$P_{(f)}$ – Potência frente;

$P_{(c)}$ – Potência costas.

O resultado da relação pode ser multiplicado por $10 \cdot \log$, transformando sua grandeza para dBi.

Apesar de alguns tipos de antenas usarem refletores que minimizam a perda de potência para as costas, uma quantidade de energia acaba sendo perdida.

3.2 Linhas de transmissão

Carvalho e Badinhan (2011), descrevem que a linha de transmissão é um par de condutores destinados a transportar uma corrente de radiofrequência gerada entre o transmissor e a antena. Suas características elétricas são críticas e devem ser compatíveis com o equipamento para que a comunicação seja bem-sucedida. Em frequências muito altas, em que os comprimentos de onda são curtos, as linhas de transmissão funcionam como circuitos ressonantes.

No caso de recepção, as linhas transportam o sinal captado pela antena até o receptor, recebendo o nome de linhas de recepção. Contudo, por normalmente envolver potências maiores, a abordagem é voltada às linhas de transmissão.

Dá-se que uma linha de transmissão finita é curta quando seu comprimento é menor ou igual ao comprimento de onda, e longa quando seu comprimento é maior que o comprimento de onda existente no sistema.

3.2.1 Tipos de linhas de transmissão

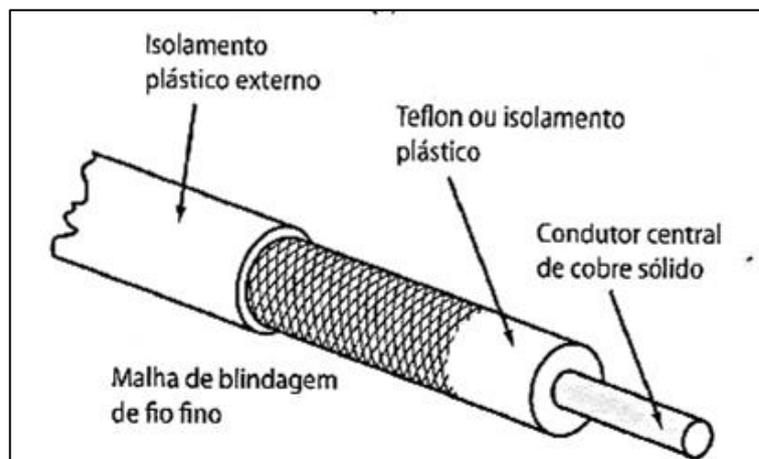
As linhas de transmissão apresentam-se na forma de cabos coaxiais, linhas bifilares, linhas *microstrips*, guias de onda, e cabos de par trançado. Cada uma tem aplicação específica dependendo da faixa de frequência, potência de operação, custo, ou características elétricas. Os principais tipos são relacionados na sequência.

a) Cabo coaxial

É um dos mais utilizados, senão o mais, como linha de transmissão não balanceada.

Consiste em dois condutores, onde um deles é normalmente aterrado e serve como blindagem do outro de modo que o ruído tenha o mínimo de efeito sobre a linha. O condutor central é envolto por um material dielétrico, e o segundo condutor normalmente sob forma trançada ou de malha fica sobre esse isolador, sendo este conjunto disposto em um revestimento externo conforme representado na Figura 27.

Figura 27 – Estrutura de um cabo coaxial.

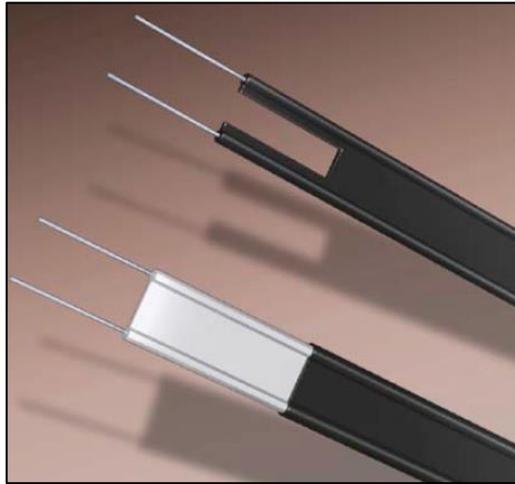


Fonte: FRENZEL (2013).

Os cabos coaxiais apresentam impedância de 50 e 75 Ω , podendo ser aplicados conforme as especificações técnicas do projeto. Sua aplicação mais comum é em sistemas de radiofrequência nas faixas VHF e UHF até 3 GHz.

b) Linha bifilar

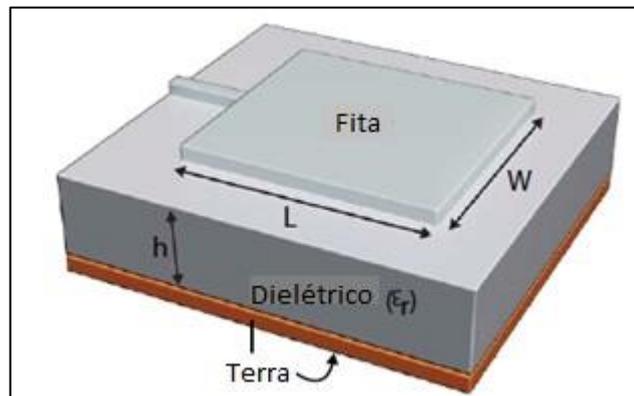
Classificada como linha balanceada, em virtude de apresentar características idênticas nos condutores, é composta por um par de condutores isolados entre si por uma camada plástica achatada e que não são conectados à terra. Comumente utilizada em ligações entre antenas VHF de até 216 MHz e aparelhos receptores de televisão, caíram em desuso, pois apesar de oferecer proteção significativa contra ruídos, ainda apresentam grande incidência de ruído e irradiação do sinal conduzido. Sua impedância característica é de 300 Ω . Apresenta-se na Figura 28 um exemplo de linha bifilar.

Figura 28 – Linha bifilar.

Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

c) Linha *microstrip*

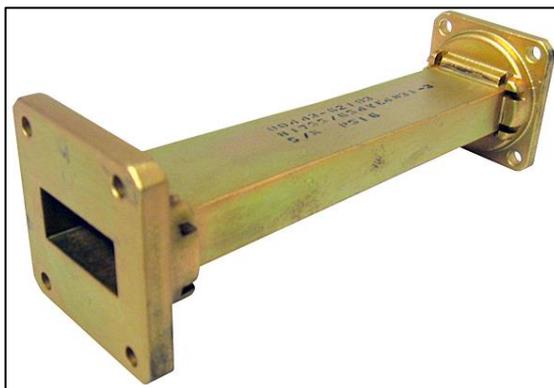
Ilustrada na Figura 29, é constituída por uma fita condutora sobre um dielétrico, e tem a outra face ligada à terra. É projetada para frequências acima de 300 MHz, nas faixas de micro-ondas e ondas milimétricas.

Figura 29 – Linha microstrip.

Fonte: Adaptado de CARVALHO e BADINHAN (2011).

d) Guias de onda

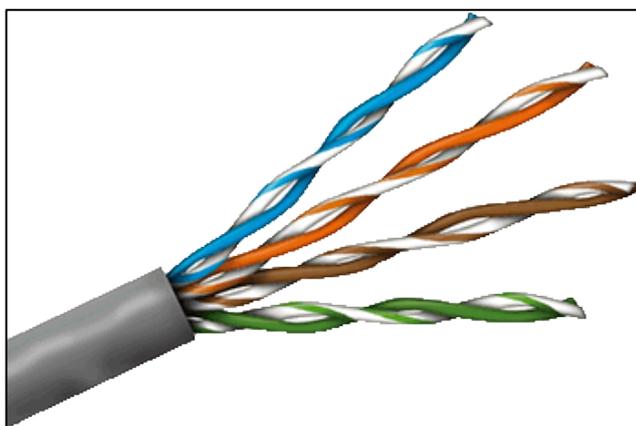
Os guias de onda são tubos metálicos ocios ou preenchidos com material dielétrico utilizados em sistemas de micro-ondas nas faixas de SHF para transmitir energia em alta frequência. Possuem baixa atenuação e funcionam como um sistema de alimentação das antenas utilizadas nessas faixas. A Figura 30 apresenta um exemplo de guia de onda.

Figura 30 – Guia de onda.

Fonte: STROSKI (2018).

e) Cabos de par trançado

Compreende a um par de fios de cobre isolados e trançados juntos. Sua aplicação mais comum dá-se em telefones, sistemas de segurança e redes locais de internet (LANs). Frequentemente se apresenta na forma de cabo UTP (*Unshielded Twisted Pair*), ou, quando blindado, na forme de cabo STP (*Shielded Twisted Pair*). Em sua versão mais comum, é composto por um conjunto de quatro pares dentro de um tubo isolado conforme mostra a Figura 31.

Figura 31 – Conjunto de cabos de par trançado do tipo UTP

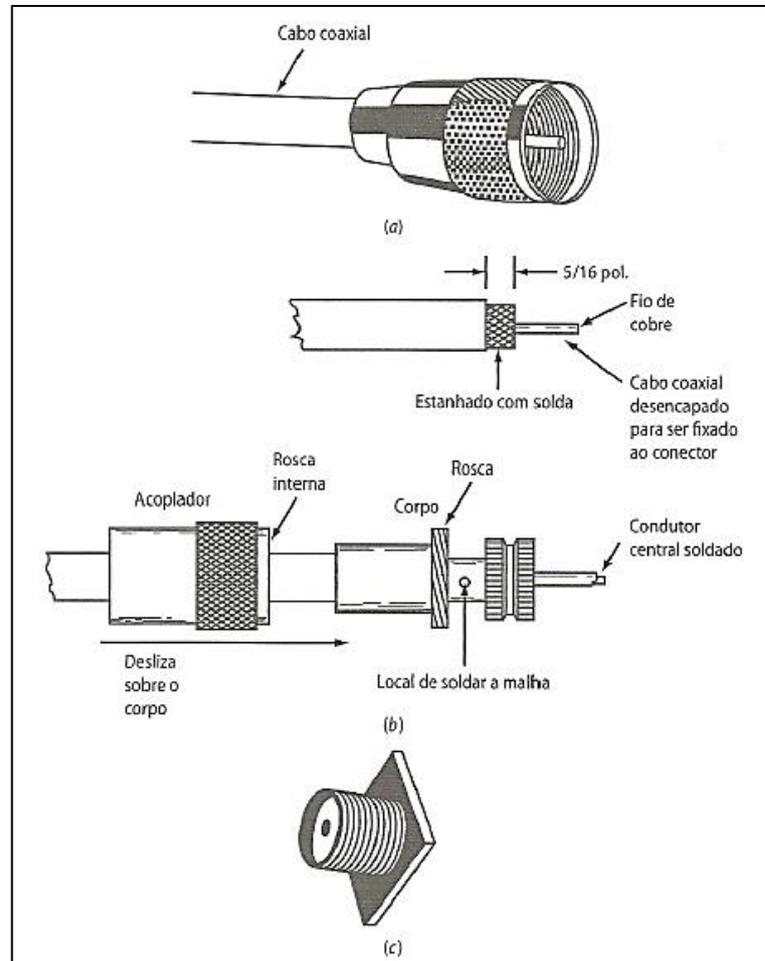
Fonte: ALMEIDA (2016).

3.2.2 Conectores

Os conectores são dispositivos que conectam o cabo a um equipamento ou a outro cabo, muito úteis para facilitar a conexão e desconexão de uma antena com o transmissor ou receptor, além de garantir os atributos elétricos do cabo e a qualidade no transporte de energia, evitando perdas por atenuações, distorções ou outros problemas. Os conectores machos são geralmente fixados nas pontas da linha de transmissão, enquanto conectores fêmeas ficam fixos nos painéis

dos equipamentos de transmissão ou recepção. A Figura 32 apresenta um conector macho PL-259 (a), sua construção interna e conexões (b), e um conector fêmea SO-239 (c).

Figura 32 – Conectores macho e conector fêmea.



Fonte: FRENZEL (2013).

3.2.3 Fator velocidade

A velocidade de propagação do sinal em uma linha de transmissão é menor que a velocidade no espaço livre, caracterizando o fator velocidade. Assim, a linha irá diminuir a velocidade ou atrasar qualquer sinal aplicado a ela, sendo este fenômeno caracterizado como atraso no tempo.

O atraso no tempo não traz consequências significativas em aplicações de radiofrequência, sendo insignificante nessa faixa e podendo ser ignorado sem maiores implicações. Contudo, em sistemas de alta frequência que dependem de uma temporização exata, o atraso é significativo.

O fator de velocidade em uma linha pode ser calculado através da Equação 12.

$$VF = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (12)$$

onde:

VF – Fator de velocidade;

ε – Constante dielétrica do material isolante.

Se uma linha sem perdas for considerada, isto é, com resistência zero, a velocidade de propagação pode ser calculada através da Equação 13.

$$VP = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (13)$$

onde:

VP – Velocidade de propagação (pés/s);

L – Indutância na linha (H);

C – Capacitância na linha (F).

Conhecendo a velocidade de propagação da onda na linha e a velocidade constante da luz no vácuo, é possível determinar o fator velocidade conforme Equação 14.

$$VF = \frac{VP}{VC} \quad (14)$$

onde:

VF – Fator de velocidade;

VP – Velocidade de propagação (m/s);

VC – Velocidade da luz no vácuo (m/s).

O fator de velocidade em linhas de transmissão varia na maioria das vezes entre 0,5 e 0,9, enquanto em um cabo coaxial varia entre 0,6 a 0,8. Uma linha aberta pode alcançar o fator de 0,9.

3.2.4 Comprimento das linhas de transmissão

Para definir o comprimento de uma linha de transmissão leva-se em consideração o fator de velocidade abordado anteriormente. Vimos que a partir da equação 1 pode-se calcular o comprimento de onda no vácuo. Adaptando a equação ao fator de velocidade em uma linha de transmissão, tem-se a Equação 15.

$$\lambda = \frac{c * VF}{f} \quad (15)$$

onde:

λ – Comprimento de onda (m);

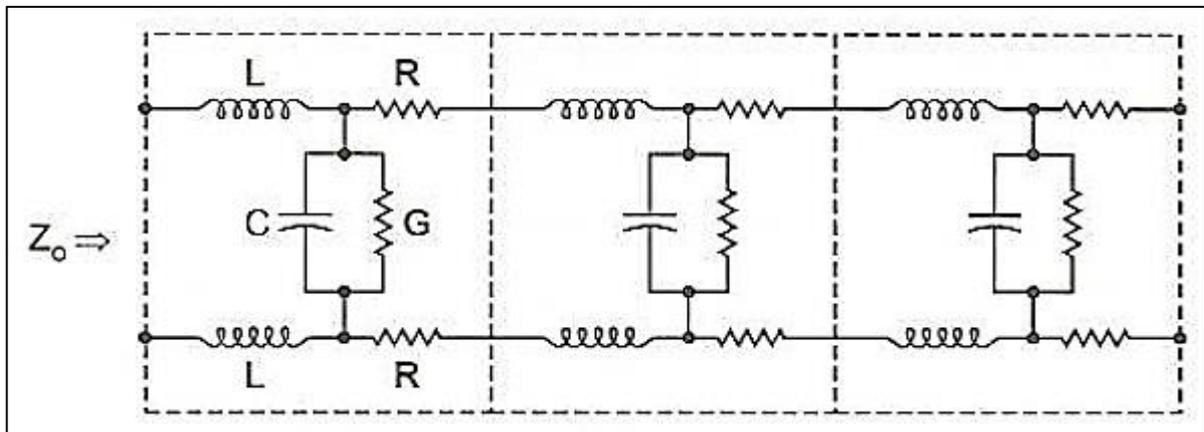
VF – Fator de velocidade;

f – Frequência de operação.

3.2.5 Circuito equivalente, Impedância, Atenuação e Frequência de corte

O circuito elétrico equivalente a uma linha de transmissão é apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Circuito equivalente.



Fonte: MEDEIROS (2007).

Cada segmento desse circuito é formado por elementos passivos R, L, C e condutância G, que determinam os valores de resistência, indutância e capacitância ao longo da linha. Nele, a resistência encontra-se em série com a indutância do fio. Os condutores em paralelo formam uma capacitância atuando como dielétrico. Ainda há uma condutância através do cabo devido as imperfeições no isolamento entre os condutores. Assim, quando sujeito a altas frequências, atua como um filtro passa-baixas.

Os efeitos da indutância e da capacitância determinam as características da linha. Quando o comprimento de uma linha de transmissão é maior que algumas vezes o comprimento de onda, os condutores da linha de transmissão aparecem como uma impedância complexa. A impedância característica de uma linha de transmissão é dada pela Equação 16.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega L + R}{j\omega C + G}} \quad (16)$$

onde:

Z_0 – Impedância;

R – Resistência;

C – Capacitância;

L – Indutância;

G – Condutância;

$j\omega L$ – Reatância indutiva;

$j\omega C$ – Reatância capacitiva.

Em linhas de transmissão com perdas desprezíveis, os valores de resistência e condutância são muito pequenos em relação às reatâncias indutiva e capacitiva da linha. Desse modo, a Equação 17 é empregada para determinação da impedância na linha.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (17)$$

Impedância pode ser entendida como a parte resistiva que oferece dificuldade à variação de corrente elétrica em um circuito, enquanto a reatância é a oposição de indutores ou capacitores à essa passagem de corrente, e está associada a indutância e a capacitância. Condutância diz respeito a propriedade de um condutor permitir a passagem da corrente elétrica.

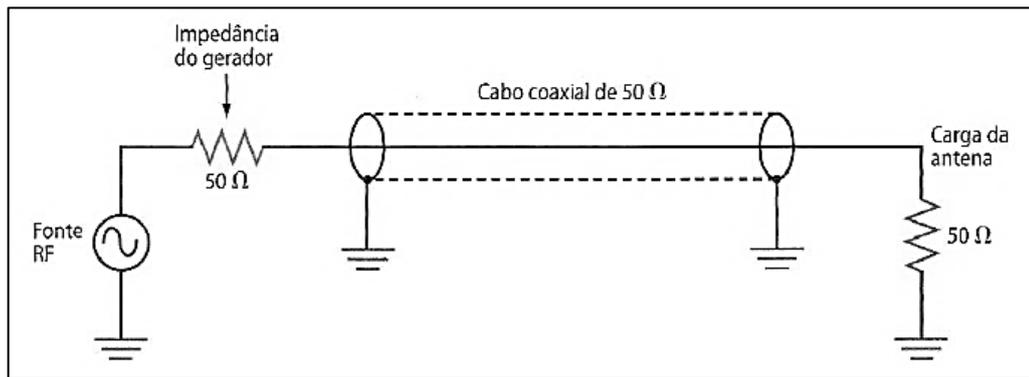
A atenuação é uma característica responsável pela perda de energia ao longo do cabo, calculada mediante a comparação das amplitudes da corrente na entrada e na saída da linha.

A frequência de corte é o valor máximo de frequência admitido por uma linha de transmissão. Valores acima disso resultarão em perdas através de correntes de fuga entre os condutores. Quanto maior for a linha, menor será a frequência de corte.

3.2.6 Casamento de impedância

O casamento de impedância é imprescindível para que a máxima transferência de potência seja obtida. Ocorre quando a impedância de uma linha de transmissão é igual à impedância de uma carga a ela conectada, fazendo com que a energia seja dissipada em sua totalidade na carga terminal. Assim, o perfeito casamento de impedâncias entre transmissor, linha de transmissão e antena, permite que toda a potência de radiofrequência fornecida seja convertida em energia radiante. A Figura 34 apresenta um circuito com essa característica, onde as impedâncias são iguais em todos os elementos.

Figura 34 – Circuito com linhas casadas.

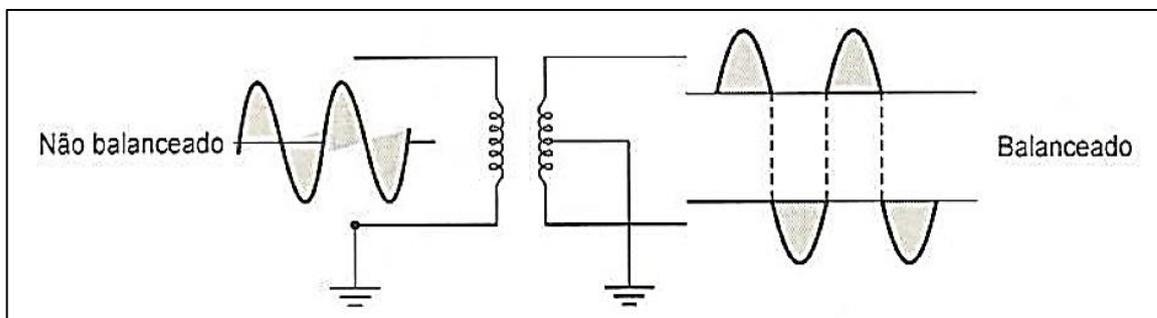


Fonte: FRENZEL (2013).

Contudo, sempre ocorre algum tipo de descasamento de impedância, fator que provoca o surgimento de ondas refletidas incidentes na carga, dissipação de potência sobre o transmissor e perdas. Essas ondas refletidas na antena e através da linha de transmissão são chamadas de ondas estacionárias e provocam consequências no produto final do sinal.

Para casar diferentes impedâncias, pode-se inserir no circuito equivalente um transformador casador de impedâncias, representado na Figura 35.

Figura 35 – Transformador casador de impedâncias.



Fonte: MEDEIROS (2007).

O transformador casa as impedâncias e eleva a tensão da onda portadora. Assim, a corrente de radiofrequência diminui e a potência dissipada na linha é reduzida.

3.3 Transmissor

O transmissor é um aparelho eletrônico que gera uma onda senoidal em determinada frequência que alimenta a antena através da linha de transmissão. Portanto, a onda de rádio é gerada por uma corrente de radiofrequência proveniente do transmissor, na frequência de operação do sistema. Santos (2007), define que o transmissor é um dispositivo capaz de fazer o sentido do fluxo de elétrons mudar milhões de vezes por segundo.

Uma onda originada no transmissor em sua forma original, sem modulação, recebe o nome de onda portadora, ou onda *carrier*. De acordo com Medeiros (2007), um transmissor típico, sem modulador, representado pelo circuito elétrico da Figura 37, é composto basicamente por quatro estágios. São eles: oscilador, separador, amplificador de potência e fonte de alimentação, descritos a seguir.

a) Oscilador

O oscilador é um circuito eletrônico projetado para provocar rápidas expansões e contrações de um campo magnético, originando a onda eletromagnética. Esse fenômeno de expansão e contração do campo magnético ocorre através da energização e desenergização do circuito.

O circuito oscilador de radiofrequência mais comum é o realimentador senoidal que utiliza filtros LC, formados por indutor e capacitor, para fornecer a realimentação positiva entre a entrada e a saída de um amplificador e para controlar a frequência de operação.

b) Separador

O separador é um estágio do circuito transmissor que impede que possíveis variações na carga, ligada à saída do transmissor, afetem o funcionamento do oscilador.

c) Amplificador

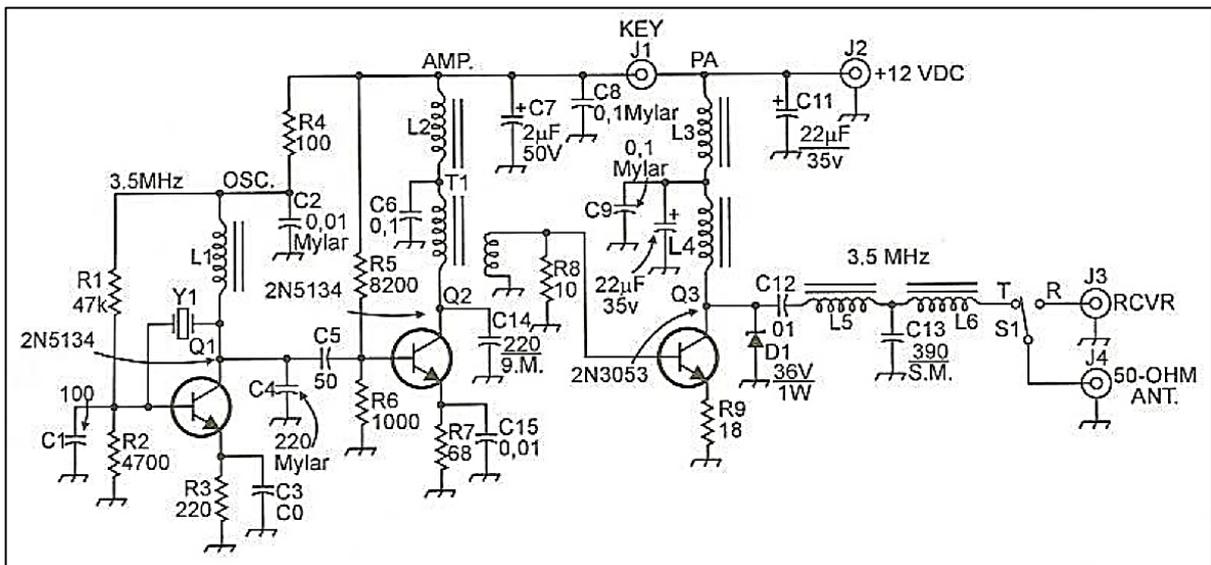
O amplificador é um componente usado para fortalecer a potência de saída de um oscilador através da amplificação de corrente.

d) Fonte de alimentação

A fonte de alimentação supre o equipamento com a tensão elétrica necessária para seu funcionamento. A fonte pode ser do tipo contínua (DC – *Direct current*) ou alternada (AC – *alternating current*).

A Figura 36 demonstra os estágios mencionados:

Figura 36 – Circuito elétrico de um transmissor típico, sem modulador.



Fonte: MEDEIROS (2007).

O transmissor é formado por um circuito oscilador composto de um cristal de quartzo Y1 que proporciona maior estabilidade da frequência, e do transistor oscilador Q1 com componentes de polarização R1, R2, R3, L1, C1, C2, C3 e C4, utilizado como interruptor para oscilar a passagem de corrente elétrica no circuito. O sinal de Q1 é então retirado por C5 e entregue para o separador.

O separador é composto pelo transistor Q2 com componentes de polarização R5, R6, R7, C15 e um transformador de radiofrequência, T1, que acopla indutivamente o separador ao amplificador.

No amplificador, o transistor Q3 é excitado pelo separador, por meio do transformador T1, fazendo a amplificação da corrente de radiofrequência. Os componentes de excitação de Q3 são R8, R9, L3 e L4, ligados em série.

A saída do transmissor apresenta um filtro do tipo passa-faixas, passivo, sintonizado na frequência de operação do transmissor, composto por L5, L6 e C13. O filtro é necessário para atenuar os harmônicos e as sobras de frequência fora da banda específica de transmissão.

A entrada J1 destina-se ao manipulador para comunicações em código *Morse*, visto que esse transmissor opera em CW – *carrier wave* (onda portadora), para comunicações em telegrafia manual, chaveadas em código Morse. A entrada J2 é empregada na fonte de alimentação.

L3 e L4 são indutores com núcleo de ferrite. J4 é o conector de saída da radiofrequência e J5 é o conector do receptor. Os transistores Q1, Q2 e Q3 são transistores bipolares, do tipo NPN.

3.3.1 Modulação

Como já mencionado anteriormente, a onda eletromagnética é gerada em um oscilador. No caso das ondas de rádio, a saída do oscilador é reforçada em potência por um amplificador. Contudo, os transmissores também são responsáveis pelos processos de modulação do sinal.

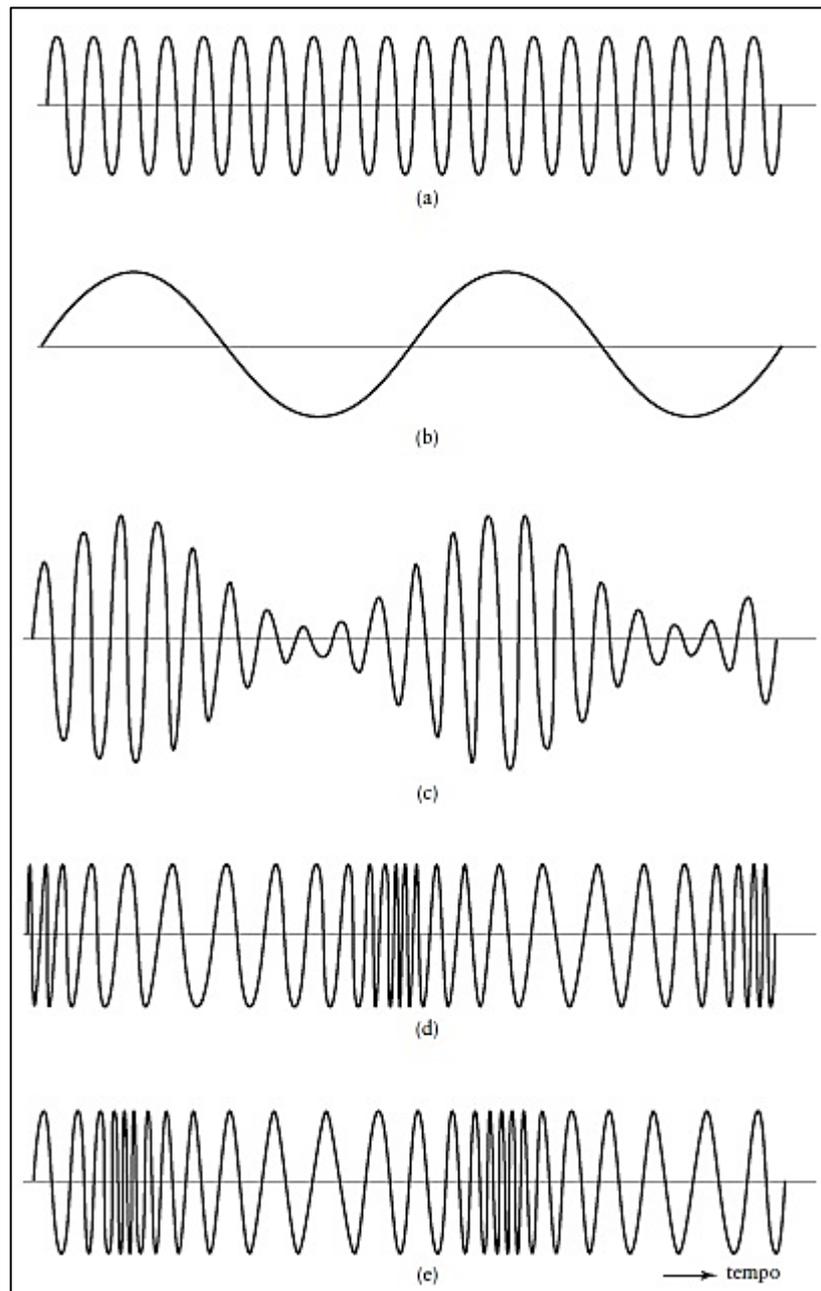
Quando uma onda portadora de radiofrequência é modulada, no transmissor, torna-se possível transportar os sinais elétricos da informação, tais como: som, imagem e dados de comunicações digitais.

MEDEIROS (2007), descreve modulador como sendo o circuito eletrônico encarregado de modular a onda; sinal modulante, o sinal que modula a onda portadora; e onda modulada, a onda resultante.

A “modulação é uma prática que tem como intuito adicionar informações a uma onda portadora. Isto é possível alterando as características da onda, como fase, frequência e amplitude” (BLACK et al, 2008, p. 226). Além disso, a modulação permite reduzir o tamanho das antenas para transmissões que utilizam baixas frequências.

A modulação pode ser analógica ou digital. No primeiro caso, utiliza-se um sinal senoidal como onda portadora. A modulação analógica consiste em alterar a frequência (FM), amplitude (AM), ou fase (PM) conforme ilustra a Figura 37.

Figura 37 – Formas de onda para modulação em amplitude, frequência e fase.



Fonte: HAYKIN (2008).

A ilustração da Figura 37 apresenta a onda portadora (a), o sinal modulante senoidal (b), o sinal modulado em amplitude (c), o sinal modulado em fase (d) e o sinal modulado em frequência (e).

3.3.1.1 Modulação em amplitude

Na modulação em amplitude (AM – *amplitude modulation*), a amplitude da onda portadora de radiofrequência é modificada pela amplitude da onda moduladora. A modulação

em amplitude subdivide-se em quatro principais categorias: AM-DSB, AM-DSB/SC, AM-SSB e AM-VSB.

O estudo matemático da modulação consiste, inicialmente, na determinação das expressões matemáticas da portadora e do sinal modulante, para se chegar à expressão da onda modulada. Assim, a expressão genérica que define as tensões cossenoidais no tempo para a onda portadora e para o sinal modulador é dada respectivamente pelas Equações 18 e 19.

$$e_0(t) = E_0 * \cos(\omega_0)t \quad (18)$$

$$e_m(t) = E_m * \cos(\omega_m)t \quad (19)$$

onde:

$e(t)$ – Tensão cossenoidal no tempo (V);

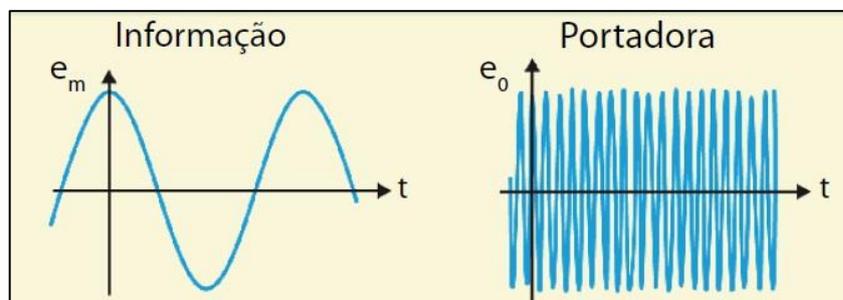
E – Amplitude ou valor de pico;

ω – Velocidade angular;

a) AM-DSB (*Amplitude Modulation – Double Side Band*)

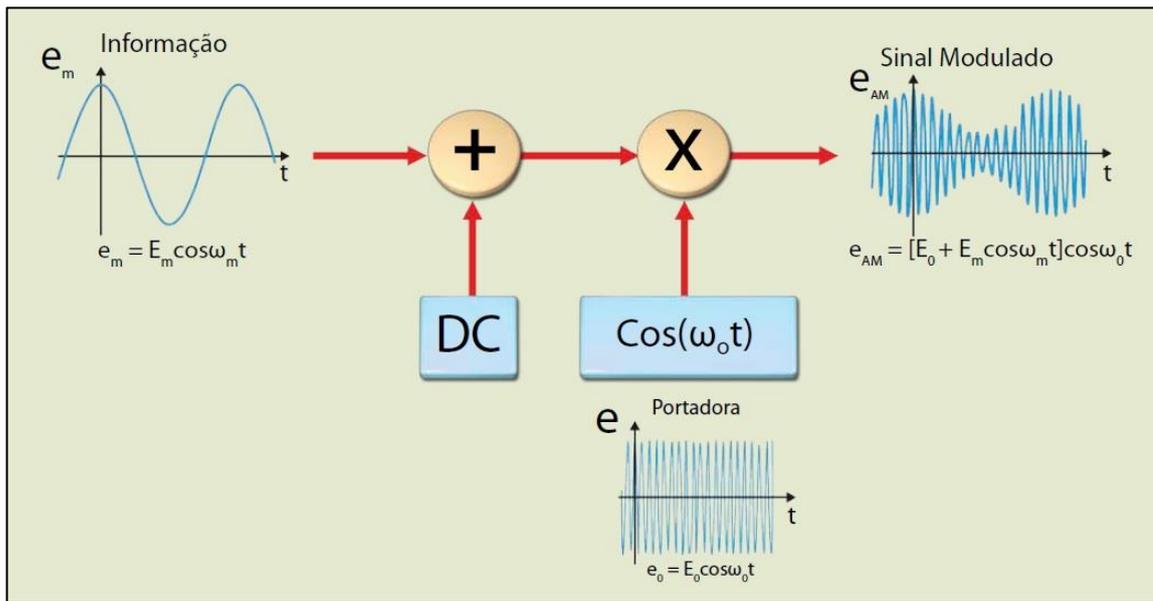
A modulação em amplitude com banda lateral dupla apresenta as formas de onda características da Figura 38 e um diagrama de blocos apresentado na Figura 39.

Figura 38 – Formas de onda do AM-DSB.



Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

Figura 39 – Diagrama de blocos de um modulador AM-DSB.



Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

A modulação AM-DSB consiste no fato de que o sinal modulante interfere diretamente no sinal da portadora. Assim, o sinal modulado é dado por:

$$e(t) = [E_0 + E_m(t)] * \cos \omega_0 t \quad (20)$$

- Substituindo a Equação 19 na Equação 20, tem-se:

$$e(t) = [E_0 + E_m * \cos \omega_m t] * \cos \omega_0 t$$

$$e(t) = E_0 * \left[1 + \frac{E_m}{E_0} * \cos \omega_m t \right] * \cos \omega_0 t$$

- A relação E_m/E_0 é chamada de índice de modulação e simbolizada por m . Assim:

$$e(t) = E_0 * (1 + m * \cos \omega_m t) * \cos \omega_0 t$$

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t + m * E_0 * \cos \omega_m t * \cos \omega_0 t$$

- A relação trigonométrica conhecida da Equação 21, indica que:

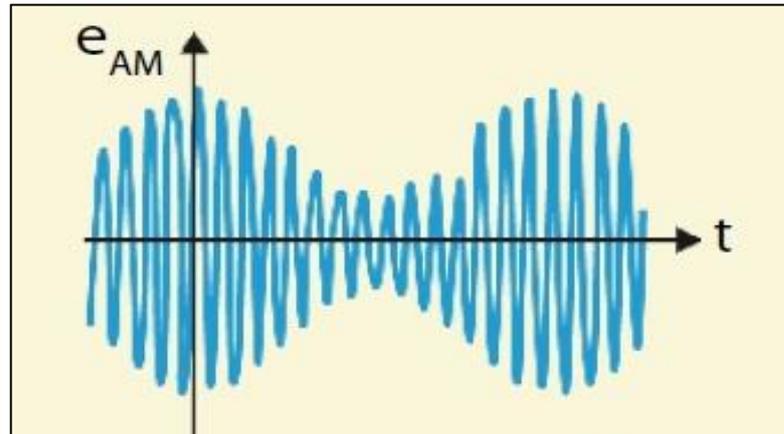
$$\cos A * \cos B = \frac{1}{2} * \cos(A + B) + \frac{1}{2} * \cos(A - B) \quad (21)$$

- Assim, obtém-se na Equação 22, a primeira análise sobre um sistema AM-DSB:

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t \quad (22)$$

A forma de onda do sinal modulado pode ser obtida mediante análise da Equação 20. À medida que o tempo vai passando, o valor instantâneo da amplitude vai mudando com a frequência moduladora e o valor instantâneo da função varia com a frequência da portadora. Assim, a forma de onda do sinal modulado é apresentada na Figura 40.

Figura 40 – Forma de onda do sinal AM-DSB modulado.

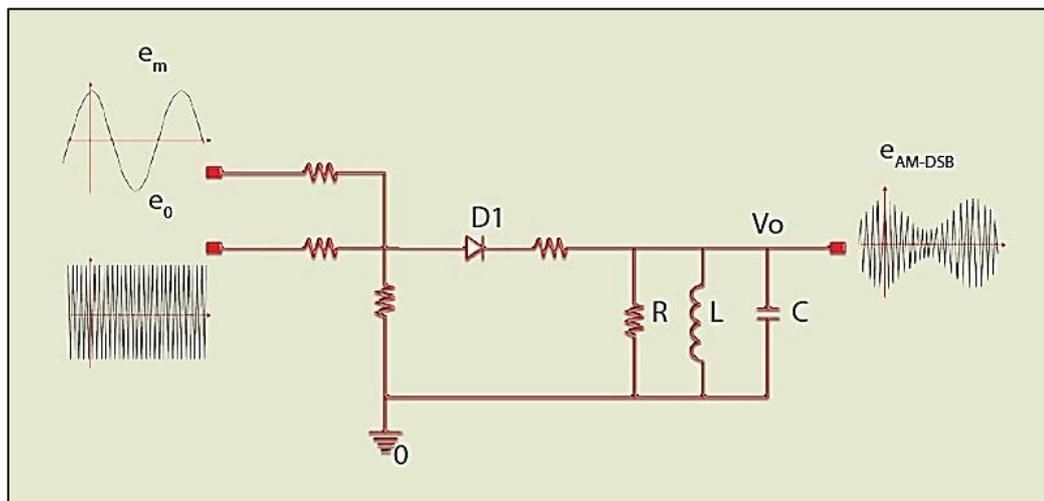


Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

Em um circuito modulador AM-DSB, o sinal modulante (informação) é somado ao sinal da portadora (frequência alta capaz de ser transmitida no ar) e ligado ao circuito tanque (LC), o qual gera uma segunda banda de sinal modulante a ser transmitido. Esse sinal, então, é adequado e transmitido via antena, por meio de um casamento de impedâncias. (CARVALHO; BADINHAN, 2011, p. 53).

Na etapa de transmissão o circuito modulador AM-DSB envia para o espaço livre uma onda portadora e duas bandas laterais, as quais contêm a informação. Esse circuito modulador enunciado acima é ilustrado na Figura 41.

Figura 41 – Circuito modulador AM-DSB.



Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

b) AM-DSB/SC (*Amplitude Modulation – Double Side Band/Supressed Carrier*)

A modulação em amplitude com banda lateral dupla e portadora suprimida é usada com a finalidade de melhorar a eficiência da transmissão e surge da necessidade de economizar a

potência utilizada pela onda portadora que não contém nenhuma informação. Assim, a potência do sinal modulado é direcionada para as bandas laterais onde se encontra a informação. Contudo, essas bandas conterão a mesma informação.

De acordo com Gomes (2007), a obtenção do sinal AM-DSB/SC se baseia na propriedade trigonométrica de que um produto entre duas cossenóides gera outro par de cossenóides, com frequência da soma e da diferença entre as frequências das cossenóides originais. Assim:

$$e(t) = K * E_m(t) * E_0(t) \quad (23)$$

K é a constante do circuito modulador, que permite a multiplicação de duas tensões resultar em uma nova tensão.

- Substituindo as Equações 18 e 19 na Equação 23, têm-se:

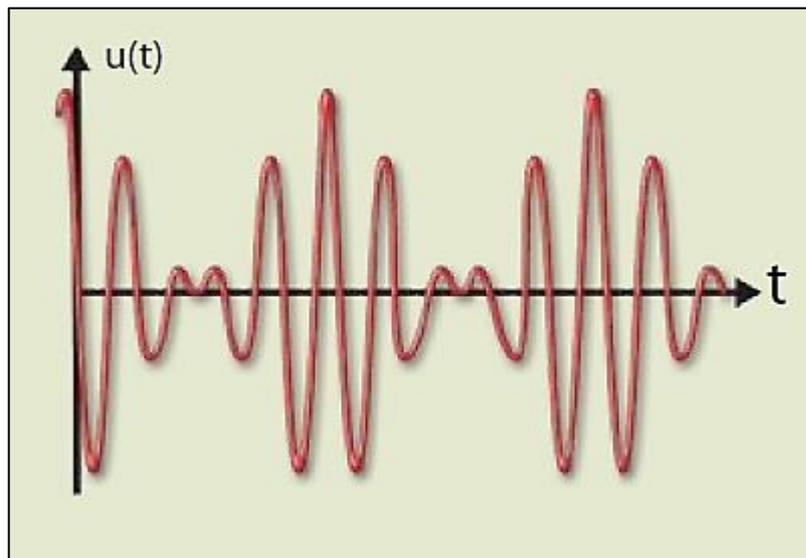
$$e(t) = K * E_m * \cos\omega_m t * E_0 * \cos\omega_0 t$$

$$e(t) = K * E_m * E_0 * \left[\frac{1}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m)t + \frac{1}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m)t \right]$$

$$e(t) = \frac{K * E_m * E_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m)t + \frac{K * E_m * E_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m)t \quad (24)$$

A expressão obtida na Equação 24 determina a expressão do sinal modulado AM-DSB/SC. A partir dela obtém-se as formas de onda do sinal modulado conforme a Figura 42.

Figura 42 – Forma de onda do sinal AM-DSB/SC modulado.



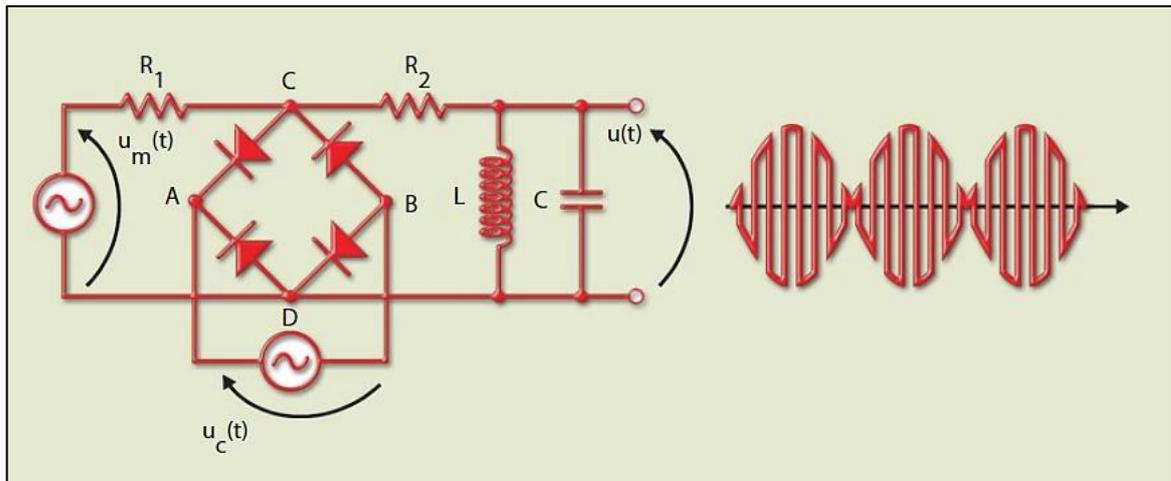
Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

O circuito modulador AM-DSB/SC da Figura 43, apresenta-se de duas formas: em ponte ou balanceado. No modulador em ponte, a portadora chaveia uma ponte de diodos, responsáveis

por permitir ou não a passagem do sinal modulante, que vai excitar o circuito LC. Se $E_0 > 0$, os diodos permanecem reversamente polarizados (corte) e, assim, na saída se obtém a informação. Se $E_0 < 0$, os diodos permanecem diretamente polarizados (condução) e, portanto, na saída se obtém sinal zero.

O princípio de funcionamento de um diodo consiste em permitir a passagem da corrente elétrica somente em um sentido.

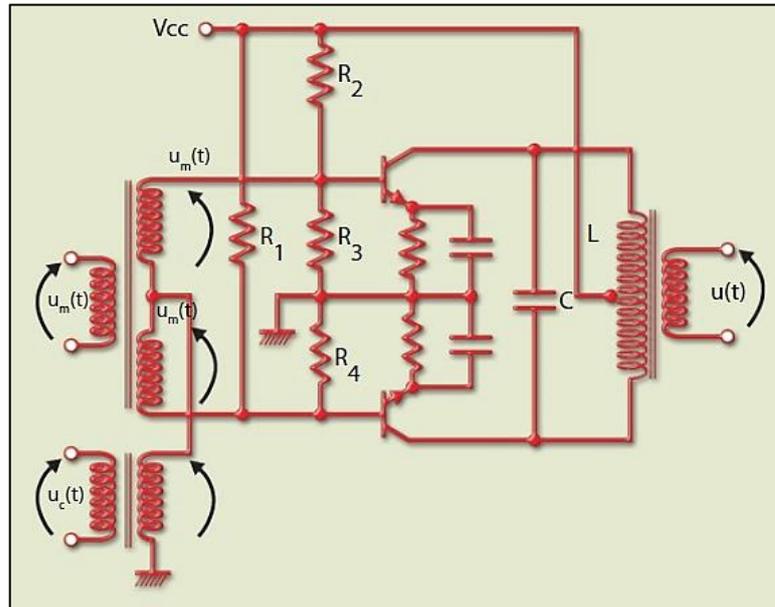
Figura 43 – Circuito modulador em ponte AM-DSB/SC.



Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

O modulador balanceado da Figura 44 utiliza dois moduladores quadráticos, sendo que o primeiro contém a soma dos sinais da informação e da portadora e o segundo contém a diferença desses sinais. Os transistores geram harmônicas de várias frequências, anulando os sinais em torno da frequência portadora. Então o filtro LC, retira as demais harmônicas e deixa passar somente as bandas laterais.

Figura 44 – Circuito modulador balanceado AM-DSB/SC.



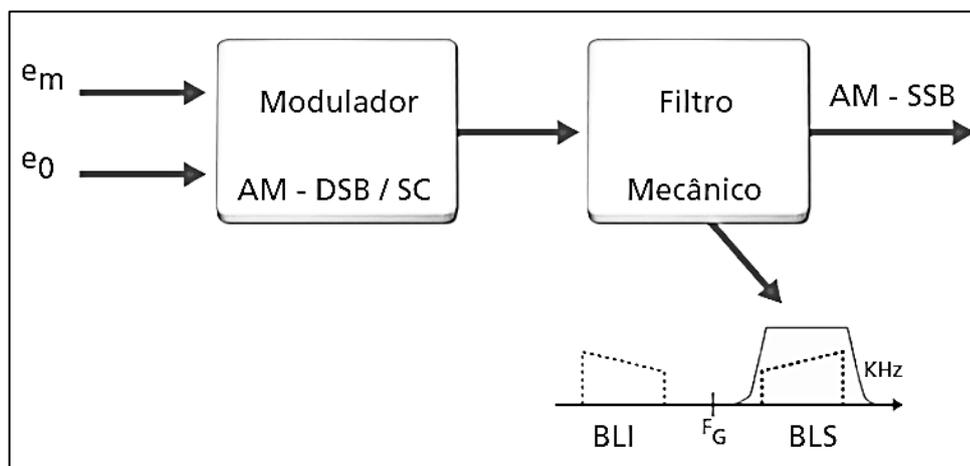
Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

c) AM-SSB (*Amplitude Modulation – Single Side Band*)

A modulação em amplitude com banda lateral simples desponta da necessidade em separar as bandas laterais entregues pela modulação AM-DSB/SC, visto que somente uma dessas bandas já contém a informação necessária. Sua aplicação também visa que o sinal ocupe a menor faixa possível do espectro ao mesmo tempo que aproveita a potência de transmissão da melhor forma.

Uma vez obtido o sinal AM-DSB/SC, ele passa por um filtro mecânico que separa somente a banda a ser transmitida, conforme o esquema da Figura 45.

Figura 45 – Esquema de um modulador com filtro mecânico.



Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

d) AM-VSB (*Amplitude Modulation – Vestigial Side Band*)

A modulação em amplitude com banda lateral em vestígio transmite a banda lateral simples da modulação AM-SSB, mais um vestígio da outra banda lateral. Verifica-se que em troca de um pequeno acréscimo de faixa ocupada no espectro, têm-se um sistema mais barato em função do custo do filtro de corte, antes empregado um filtro mais agudo e agora um filtro mais suave, e com o conteúdo de potência idêntico ao AM-SSB. O conteúdo perdido na banda transmitida, provocado pela troca do filtro, é compensado pelo conteúdo que se transmite da banda rejeitada.

3.3.1.2 Modulação angular

As modulações FM (*Frequency Modulation*) e PM (*Phase Modulation*), por terem características muito semelhantes, são definidas de forma genérica como modulação angular.

De acordo com Carvalho e Badinhan (2011), um modulador FM é um circuito muito simples, formado por um oscilador e um amplificador de alta potência para a transmissão do sinal recebido.

As expressões matemáticas comuns utilizadas na modulação angular são descritas nas Equações 25 e 26, respectivamente, modulação em frequência e modulação em fase.

$$e_{FM} = E_0 * \cos[(\omega_0 + K_\omega * e_m) * t] \quad (25)$$

$$e_{PM} = E_0 * \cos[(\omega_0 + K_p * e_m) * t] \quad (26)$$

onde:

K_ω ou K_p – Constante de modulação (rad/s/V).

Com base na Equação (18) geral da onda portadora, têm-se que a expressão genérica do sinal modulado em ângulo, dada pela Equação 27.

$$e(t) = E_0 * \cos\varphi i(t) \quad (27)$$

onde:

$\cos\varphi i(t)$ – Fase instantânea de $e(t)$.

A velocidade angular instantânea e a fase instantânea da onda portadora estão diretamente relacionadas. Assim, quando ω é constante, a velocidade angular não varia com o tempo. Dessa forma, a fase instantânea é obtida pela área formada entre uma reta e o eixo do tempo, obtendo-se a Equação 28.

$$\varphi i(t) = \omega * t \quad (28)$$

Por outro lado, se a velocidade angular instantânea variar constantemente com o tempo, a fase instantânea deve ser calculada integrando a função da velocidade angular instantânea em relação ao tempo, para determinar sua área, conforme Equação 29.

$$\varphi_i(t) = \int \omega_i(t) dt \quad (29)$$

A função $\omega_i(t)$ pode ser determinada em relação a $\varphi_i(t)$ pela derivada:

$$\omega_i(t) = \frac{d * \varphi_i(t)}{dt} \quad (30)$$

Dado o sinal modulante $e_m(t)$, haverá modulação em fase se o sinal modulante interferir diretamente no valor da fase instantânea do sinal modulado:

$$\varphi_i(t) = \omega_0 t + K_p * e_m(t) \quad (31)$$

onde:

$\varphi_i(t)$ – Variações de fase;

$\omega_0 t$ – Fase instantânea da onda portadora;

K_p – Constante de modulação em fase;

$E_m(t)$ – Variações de tensão do sinal modulante.

- Substituindo a Equação 31 na Equação 27, obtém-se a Equação 32, que rege a modulação PM.

$$e(t) = E_0 * \cos[\omega_0 t + K_p * e_m(t)] \quad (32)$$

- Dado o sinal modulante $e_m(t)$, haverá modulação FM se este sinal modulante interferir diretamente no valor da velocidade angular instantânea do sinal modulado:

$$\omega_i(t) = \omega_0 + K_F * e_m(t) \quad (33)$$

A constante de modulação em frequência K_F , converte as variações de tensão do sinal modulante $e_m(t)$, em variações da velocidade angular instantânea $\omega_i(t)$.

- Substituindo a Equação 33 na Equação 29, tem-se:

$$\begin{aligned} \varphi_i(t) &= \int [\omega_0 + K_F * e_m(t)] \\ \varphi_i(t) &= \int \omega_0 dt + \int K_F * e_m(t) dt \\ \varphi_i(t) &= \omega_0 t + K_F * \int e_m(t) dt \end{aligned} \quad (34)$$

- Substituindo a Equação 34 na Equação 27, tem-se a expressão genérica da modulação FM:

$$e(t) = E_0 * \cos[\omega_0 t + K_F * \int e_m(t) dt]$$

$$e(t) = E_0 * \cos[\omega_0 t + K_F * \int E_m * \cos \omega_m t dt]$$

$$e(t) = E_0 * \cos[\omega_0 t + K_F * E_m * \int \cos \omega_m t dt]$$

- O produto $K_F * E_m$ é chamado desvio de frequência, simbolizado por $\Delta\omega$.

$$e(t) = E_0 * \cos[\omega_0 t + \Delta\omega * \int \cos \omega_m t dt]$$

- Resolvendo a integral, têm-se:

$$e(t) = E_0 * \cos[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\omega_m} * \text{sen} \omega_m t]$$

A relação $\Delta\omega/\omega_m$ é chamada índice de modulação FM, simbolizado por β e expressa o desvio máximo de fase que sofre o sinal modulado.

$$e(t) = E_0 * \cos(\omega_0 t + \beta * \text{sen} \omega_m t) \quad (35)$$

Finalmente, a Equação 35 expressa de forma geral um sinal modulado em FM, através de um sinal modulante cossenoidal. Conforme for o valor do índice de modulação, a modulação pode ser classificada como FM de faixa estreita e FM de faixa larga.

a) FM de faixa estreita

A modulação FM de faixa estreita é “bastante utilizada quando se deseja agrupar vários sinais modulados em FM em uma faixa restrita de frequências” (GOMES, 2007, p.140). Essa técnica consiste em limitar o índice de modulação para restringir a largura de faixa ocupada.

Devido a fragilidade que a modulação em amplitude apresenta, em razão de ruídos e distorções não lineares, fez-se necessário um estudo para sistemas com modulação angular, os quais se tornaram imunes a esses problemas.

Analisando esse sistema, percebe-se que os valores do índice de modulação FM de faixa estreita são muito pequenos. Assim, dá-se continuidade no desenvolvimento da Equação 35.

$$e(t) = E_0 * \cos(\omega_0 t + \beta * \text{sen} \omega_m t)$$

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t * \cos(\beta * \text{sen} \omega_m t) - E_0 * \text{sen} \omega_0 t * \text{sen}(\beta * \text{sen} \omega_m t)$$

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t - E_0 * \text{sen} \omega_0 t * \beta * \text{sen} \omega_m t$$

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t - \beta E_0 * \text{sen} \omega_0 t * \text{sen} \omega_m t$$

- Resolvendo o produto entre dois senos:

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t - \frac{\beta E_0}{2} * [\cos(\omega_0 - \omega_m)t - \cos(\omega_0 + \omega_m)t]$$

$$e(t) = E_0 * \cos\omega_0 t - \frac{\beta E_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m)t + \frac{\beta E_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m)t \quad (36)$$

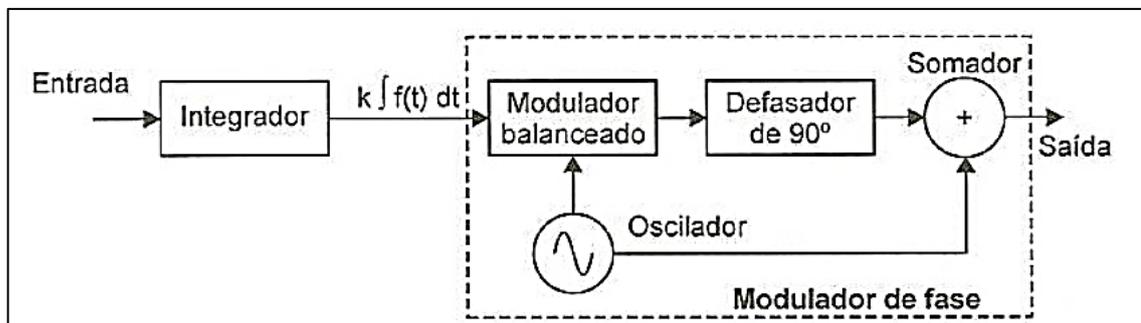
A Equação 36 obtida, rege o comportamento de um sinal modulado em FM de faixa estreita, com sinal modulante cossenoidal.

b) FM de faixa larga

Na modulação em frequência de faixa larga (FMFL), o sinal modulante altera a frequência da onda portadora para mais e para menos, ficando inalterada sua amplitude.

O modulador analógico de FM pode realizar dois tipos de modulação: direta ou indireta. Na modulação direta, aplica-se um sinal modulante sobre um circuito capacitivo ligado ao oscilador gerador da portadora. Esse sinal faz a capacitância do circuito variar e altera a frequência da portadora. Esse processo pode ser realizado por um diodo *varactor* ou *varicap*, em diodo de capacitância variável. A modulação indireta, possui um circuito integrador, aplicado a um modulador balanceado, seguido de um defasador de 90° e de um somador, conforme Figura 46.

Figura 46 – Diagrama de blocos do modulador de FM pelo processo indireto.



Fonte: MEDEIROS (2007).

Resumidamente, o sinal de entrada entra em um circuito que integra a variação dos sinais recebidos e entrega ao modulador. Após o sinal ser modulado, passa por estágios amplificadores e então sofre uma defasagem de 90°. Por fim, é somado com o sinal gerado no oscilador para chegar ao valor final da frequência de transmissão.

3.3.1.3 Modulação digital

A modulação digital trata da transmissão de sinais em sequência de bits. Para Black *et al* (2008), atualmente a modulação digital é a técnica mais utilizada em sistemas de transmissão.

Existem basicamente duas formas de transmitir dados através da modulação digital. A primeira é sem a onda portadora e a segunda com a utilização da onda portadora. Os sinais

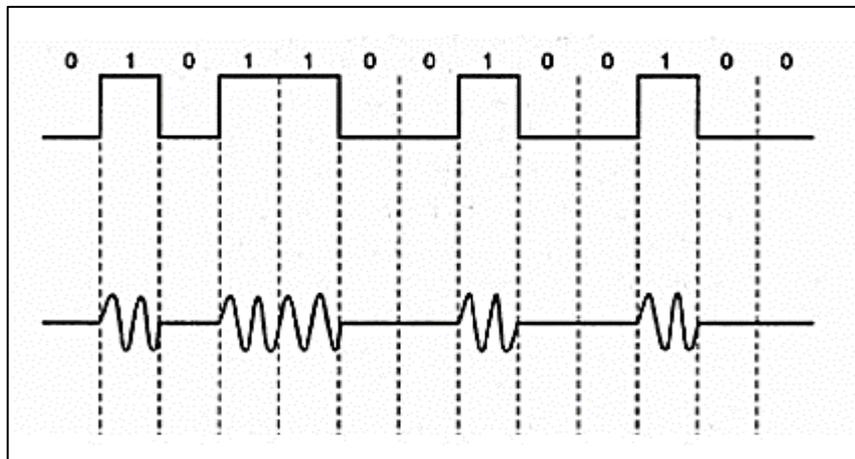
modulados por portadoras de alta frequência são: ASK, FSK, PSK e QAM.

A segunda forma aproveita a característica binária dos pulsos e faz uma modulação por codificação digital desses pulsos, conhecida como Modulação por Codificação de Pulsos – PCM (*Pulse Code Modulation*). Os sinais digitais podem ser formados por pulsos retangulares com duração igual à duração de um bit, fazendo com que não haja interferência com pulsos subsequentes.

a) ASK (*Amplitude Shift Keying*)

No sistema de chaveamento de amplitudes, a transmissão de bits ocorre por meio de um trem de pulsos, o qual é introduzido no modulador que modifica o sinal a ser transmitido através de uma onda portadora. Quando o nível lógico for igual a 1, a frequência cossenoidal da portadora será transmitida. Quando o nível lógico for igual a 0, um sinal de amplitude zero será transmitido. Resumidamente, o sistema ASK, libera ou interrompe a passagem da portadora. Assim, um sinal modulante discreto provoca a modulação ASK. A Figura 47 demonstra as formas de onda do trem de bits e do sinal ASK modulado.

Figura 47 – Formas de onda para modulação ASK.



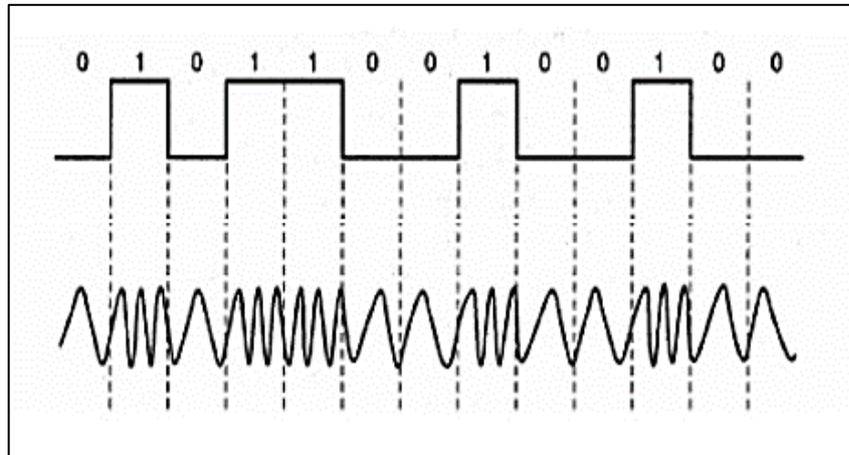
Fonte: Adaptado de FAGUNDES (2019).

b) FSK (*Frequency Shift Keying*)

O chaveamento de frequência é caracterizado por modificar a frequência do sinal modulado. Sua finalidade é inserir no meio de transmissão um sinal cossenoidal de frequência finita, a fim de garantir uma banda passante finita. Para isso realiza-se a variação da frequência do sinal da portadora. Quando o nível lógico for igual a 1, a frequência cossenoidal da portadora é alterada. Quando o nível lógico for igual a 0 a frequência cossenoidal da portadora é transmitida em sua forma original. A Figura 48 demonstra as formas de onda do trem de bits e

do sinal FSK modulado.

Figura 48 – Formas de onda para modulação FSK.

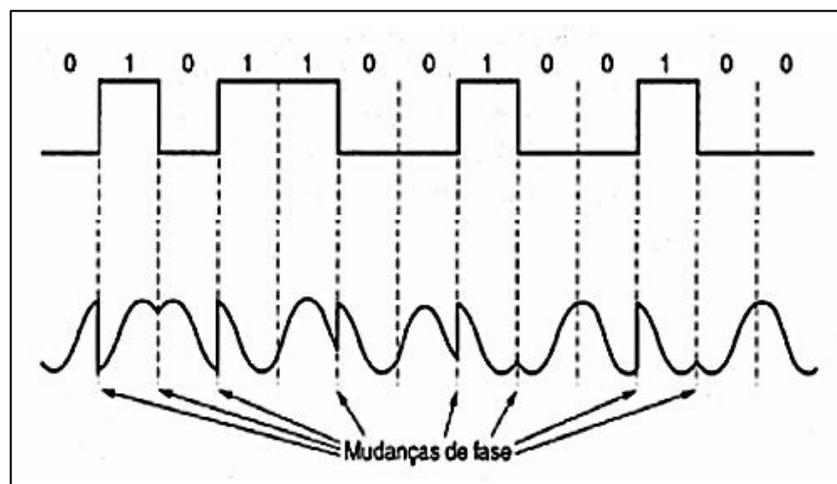


Fonte: Adaptado de FAGUNDES (2019).

c) PSK (*Phase Shift Keying*)

A modulação por chaveamento de fase também transmite um sinal cossenoidal da portadora em função do trem de pulsos da informação. A diferença é que a portadora sofre uma alteração na fase do sinal de acordo com o nível lógico do trem de bits. Quando ocorre uma mudança de nível lógico do sinal a ser transmitido há uma mudança na fase da onda portadora. Por exemplo, quando o nível lógico for igual a 1, a fase da portadora representa 180° . Quando o nível lógico for igual a 0 a fase da portadora representa 0° . A Figura 49 demonstra as formas de onda do trem de bits e do sinal PSK modulado.

Figura 49 – Formas de onda para modulação PSK.



Fonte: Adaptado de FAGUNDES (2019).

d) QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*)

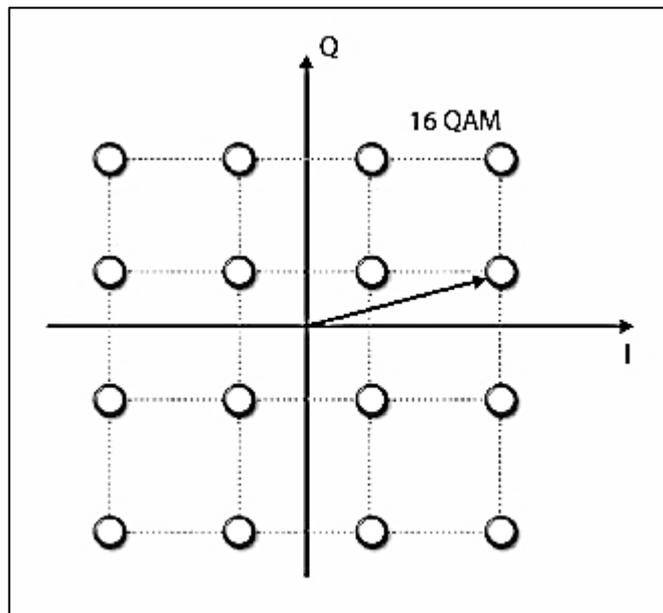
De acordo com Ribeiro (2019), a modulação de amplitude em quadratura caracteriza-se pela superposição de duas portadoras em quadratura moduladas em amplitude. Essa modulação sofre alterações na sua amplitude e fase, permitindo uma relação satisfatória entre a qualidade e o nível do sinal de recepção. Dessa forma, é possível aumentar o número de estados possíveis do sinal modulado, fazendo com que haja uma moderação na utilização da faixa de transmissão, visto que, o sinal digital utiliza uma faixa de transmissão maior que a do sinal analógico.

O número de estados possíveis mais comuns em uma modulação QAM são: 16, 64, 128 e 256, sendo que, quanto maior a quantidade de estados, maior será a eficiência espectral.

Para analisar os estados mencionados da modulação QAM, define-se um diagrama com uma constelação composta de símbolos. Os símbolos representam valores de fases diferentes.

A título de exemplo, a modulação 16 QAM possui 16 estados diferentes, sendo 4 em cada quadrante, e proporciona 4 bits de informação para cada símbolo transmitido, conforme demonstra a Figura 50.

Figura 50 – Constelação para a modulação 16 QAM.



Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

Os símbolos são mapeados em um diagrama de fase e quadratura, sendo que cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.

De acordo com Nascimento (2000), graças a modulação 16 QAM apresentar quatro bits

por símbolo, a velocidade de transmissão é quatro vezes maior que a velocidade de modulação. Contudo, o sinal 16 QAM possui uma constelação mais densa e fica mais suscetível a ruídos em relação aos outros sinais como o PSK.

3.4 Receptor

Medeiros (2007), define que o receptor é o aparelho encarregado de receber e processar a corrente elétrica de fraca intensidade que surge, por indução, na antena receptora, quando esta é envolvida pelo campo magnético da onda transmitida.

O receptor consiste em um conjunto de equipamentos que tem a função de receber, selecionar, amplificar e demodular o sinal de radiofrequência recebido da antena, restaurando a informação original transmitida com o mínimo de distorção.

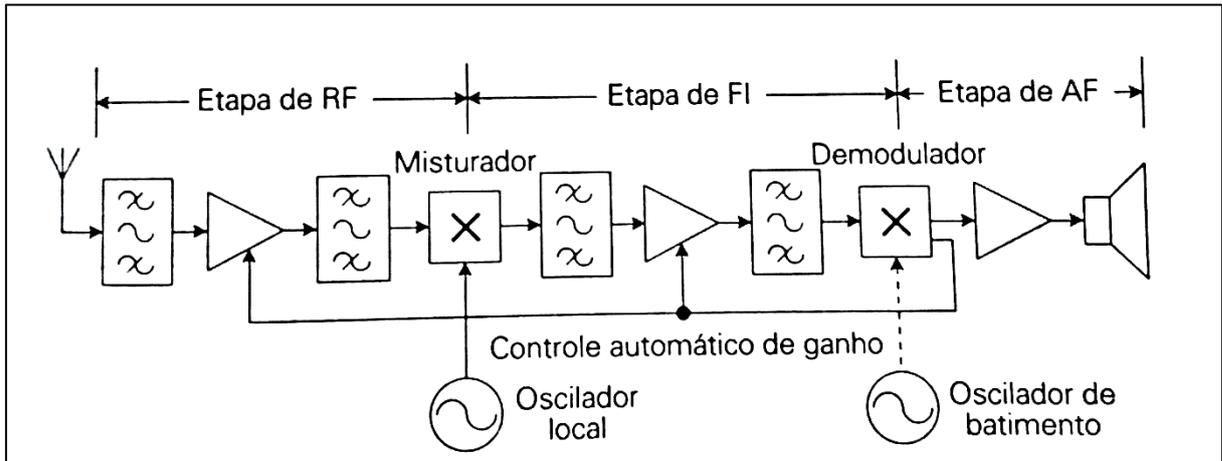
Para BRASIL (1996), um receptor deve conter as seguintes qualidades para que desempenhe eficientemente sua função:

- A faixa de frequências deve estar ajustada de acordo com a das ondas eletromagnéticas que vai receber;
- Seletividade: separar sinais da frequência desejada de outros sinais com frequências aproximadas;
- Sensibilidade: detectar um sinal fraco e amplificá-lo;
- Estabilidade: permanecer na frequência em que foi ajustado;
- Fidelidade: reproduzir a informação de forma idêntica à gerada na transmissão.

Um receptor de rádio muito utilizado é o do tipo super-heteródino, sendo o modelo com melhor desempenho em sensibilidade e seletividade. Receptores de micro-ondas, assim como receptores de baixa frequência, também são do tipo super-heteródino.

De acordo com Nascimento (2000), os circuitos essenciais para um receptor super-heteródino de AM são: Amplificadores de radiofrequência e frequência intermediária, osciladores, misturadores e conversores; e demoduladores, conforme representado pelo diagrama de blocos da Figura 51.

Figura 51 – Diagrama em blocos de um receptor super-heteródino para recepção de AM, telegrafia ou SSB.



Fonte: NASCIMENTO (2000).

Cada etapa desse diagrama de blocos é explicada a seguir.

a) Amplificadores de radiofrequência (RF) e frequência intermediária (FI)

São amplificadores que operam em uma faixa estreita de frequências e amplificam somente o sinal desejado.

Os amplificadores de RF têm como propósito aumentar a sensibilidade e o ganho de receptores de alto desempenho. A sensibilidade é aumentada porque o amplificador de RF tem um fator de ruído menor que o do conversor, enquanto o ganho é aumentado para compensar o uso de filtros passa-faixa a ele associados.

Os amplificadores de FI possuem características de ganho e seletividade. Em razão de serem responsáveis pela maior parte da amplificação do sinal de alta frequência antes da demodulação, e a necessidade do emprego de filtros de FI para prevenir a sobrecarga por sinais intensos próximos do canal de FI, o ganho desse amplificador faz-se indispensável neste cenário. A seletividade tem a finalidade de eliminar a interferência por sinais de frequências próximas às do sinal desejado.

b) Osciladores

São circuitos que apresentam um sinal periódico em sua saída e que deve apresentar boa estabilidade na frequência. O oscilador local aproveita a corrente do transistor do misturador para realimentá-la naquele mesmo transistor. A onda gerada no oscilador local deve ser na forma de uma senoide pura, na frequência do canal de comunicação escolhido, e igual a frequência de operação do amplificador de FI.

c) Misturadores e conversores

O misturador é geralmente um transistor responsável pela soma ou diferença dos sinais de entrada, sendo eles o sinal sintonizado pelo receptor e o sinal gerado no oscilador local. O sinal resultante dessa mistura é idêntico ao sinal sintonizado, mas difere na frequência.

Os conversores de frequência assemelham-se aos moduladores e tem a finalidade de transferir a informação contida em uma certa faixa de frequências para outra faixa de frequências. O filtro passa-faixas, geralmente colocado à sua saída, é responsável por selecionar uma das frequências ali presentes.

Um conversor desbalanceado apresentará em sua saída as frequências de entrada, enquanto os conversores balanceados eliminam na saída um dos sinais presentes em sua entrada. O conversor duplamente balanceado elimina de sua saída ambos os sinais de entrada.

A maioria dos receptores utiliza conversão dupla, onde na primeira conversão o sinal é recebido e processado pelos métodos padrões, e na segunda conversão a frequência intermediária é reduzida.

d) Demoduladores

Os demoduladores são circuitos que recuperam o sinal modulante original, presente no último estágio de FI e serão estudados especialmente na seção 3.4.1.

e) Limitadores

Os receptores de FM possuem a mesma estrutura apresentada no diagrama da Figura 52, a exceção de um limitador presente na etapa de FI e devem apresentar características que permitam a transformação das variações de frequência em variações de amplitude para que seja possível recuperar o sinal modulante.

Os limitadores têm a função de eliminar os ruídos e variações de amplitude do sinal FM recebido. Nada mais é do que um amplificador que opera em regime de sobrecarga.

f) CAG – Controle automático de ganho

Devido às variações na intensidade dos sinais recebidos de diferentes transmissores o receptor deve possuir recursos que mantenham constante o nível do sinal demodulado. Nos receptores AM, o ganho dos estágios amplificadores de RF e FI são controlados eletronicamente, através do CAG. Nos receptores FM são utilizados os estágios limitadores.

O CAG encontra-se após o demodulador e é realimentado por uma tensão contínua obtida do próprio sinal de saída. Atua de modo a diminuir o sinal o ganho de amplificação

quando o sinal recebido é forte e a aumentar a amplificação quando o sinal recebido é fraco.

A realimentação do sistema do CAG é evidenciada na afirmação a seguir:

Fazendo-se a corrente do transistor inversamente proporcional à amplitude do sinal demodulado, através da aplicação da tensão retificada pelo diodo detector ao circuito de polarização de base do transistor controlado, é possível eliminar-se a maior parte das variações de amplitude do sinal demodulado. (NASCIMENTO, 2000, p. 43).

3.4.1 Demodulação

O sinal captado pela antena receptora, ao chegar no receptor deve ser demodulado para que as informações sejam separadas e então reproduzidas por um transdutor apropriado, como um monitor de vídeo.

a) Demodulação AM-DSB

Assim como nos circuitos moduladores, a demodulação pode ser feita de forma quadrática ou síncrona.

Para a forma quadrática, relembra-se a Equação 22:

$$e(t) = E_0 * \cos \omega_0 t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t$$

- Define-se a função exponencial para decomposição em série de Taylor que comprova o funcionamento do circuito demodulador na Equação 37.

$$e_1(t) = a + b * e(t) + c * e^2(t) \quad (37)$$

- Assim, substituindo a Equação 22 na Equação 37:

$$\begin{aligned} e_1(t) &= a + b * \left(E_0 * \cos \omega_0 t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t \right) + c \\ &\quad * \left(E_0 * \cos \omega_0 t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t + \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t \right)^2 \\ &= a + b * E_0 * \cos \omega_0 t + b * \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t + b * \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t + c \\ &\quad * E_0^2 * \cos^2 \omega_0 t + c * \frac{m^2 E_0^2}{4} * \cos^2(\omega_0 + \omega_m) t + c * \frac{m^2 E_0^2}{4} \\ &\quad * \cos^2(\omega_0 - \omega_m) t + c * E_0^2 * m * \cos \omega_0 t * (\omega_0 + \omega_m) t + c * E_0^2 * m \\ &\quad * \cos \omega_0 t * \cos(\omega_0 - \omega_m) t + c * \frac{m^2 E_0^2}{4} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t \\ &\quad * \cos(\omega_0 - \omega_m) t \end{aligned}$$

- Resolvendo as identidades trigonométricas obtém-se a Equação 38:

$$\begin{aligned}
 e_1(t) = & a + b * E_0 * \cos \omega_0 t + b * \frac{mE_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t + b * \frac{mE_0}{2} \\
 & * \cos(\omega_0 - \omega_m) t + c * \frac{E_0^2}{2} + c * \frac{E_0^2}{2} * \cos 2 \omega_0 t + c * \frac{m^2 E_0^2}{8} + c \\
 & * \frac{m^2 E_0^2}{8} * \cos(2\omega_0 + 2\omega_m) t + c * \frac{m^2 E_0^2}{8} + c * \frac{m^2 E_0^2}{8} \\
 & * \cos(2\omega_0 - 2\omega_m) t + c * \frac{mE_0^2}{2} * \cos(2\omega_0 + 2\omega_m) t + c * \frac{mE_0^2}{2} \\
 & * \cos \omega_m t + c * \frac{mE_0^2}{2} * \cos(2\omega_0 - 2\omega_m) t + c * \frac{mE_0^2}{2} * \cos \omega_m t \\
 & + c * \frac{m^2 E_0^2}{8} * \cos 2 \omega_0 t + c * \frac{m^2 E_0^2}{8} * \cos 2 \omega_m t
 \end{aligned} \tag{38}$$

- Após a passagem pelo filtro passa-baixas com velocidade angular de corte ω_m , tem-se o sinal recuperado:

$$e_{rec}(t) = a + c * \frac{e_0^2}{2} + c * \frac{m^2 * e_0^2}{4} + c * m * e_0^2 * \cos \omega_m t \tag{39}$$

- A demodulação síncrona é muito semelhante a quadrática, e o sinal $e_I(t)$ será o resultado do chaveamento síncrono de $e(t)$:

$$e_1(t) = C(t) * e(t) \tag{40}$$

- Recorrendo a decomposição em série de Fourier para determinar a função chave na Equação 41.

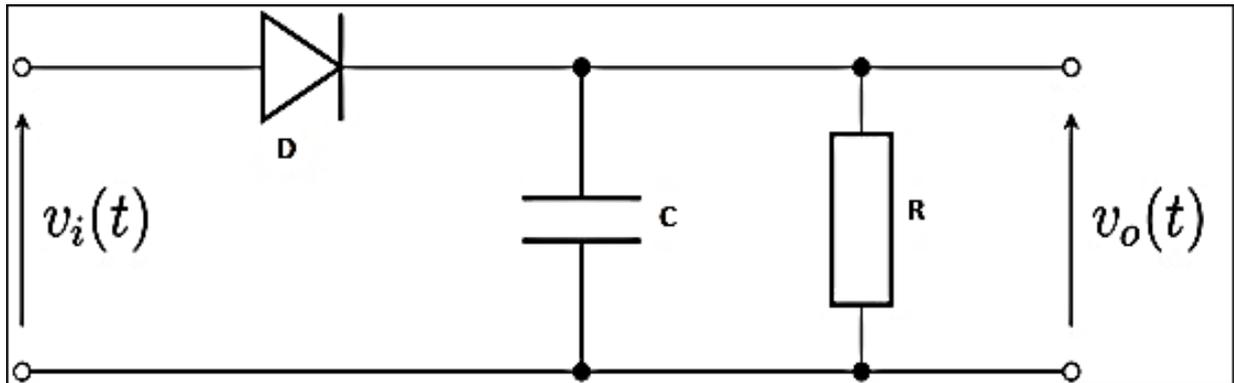
$$C(t) = C_0 + C_1 * \cos \omega_0 t + C_2 * \cos 2\omega_0 t + C_3 * \cos 3\omega_0 t + \dots \tag{41}$$

- Após a passagem do sinal pelo filtro passa-baixas com velocidade angular de corte ω_m , obtém-se na Equação 42 a expressão do sinal AM-DSB recuperado $e_{REC}(t)$.

$$e_{rec}(t) = C_1 * \frac{E_0}{2} + C_1 * \frac{m * e_0}{2} * \cos \omega_m t \tag{42}$$

Outra forma de demodulação muito utilizada é através do detector síncrono a diodo, conhecido como detector de envoltória. Gomes (2007), afirma que esse circuito demodulador possui enorme simplicidade, custo reduzido e operação comprovadamente eficiente. Seu circuito é apresentado na Figura 52.

Figura 52 – Circuito modulador detector de envoltória.

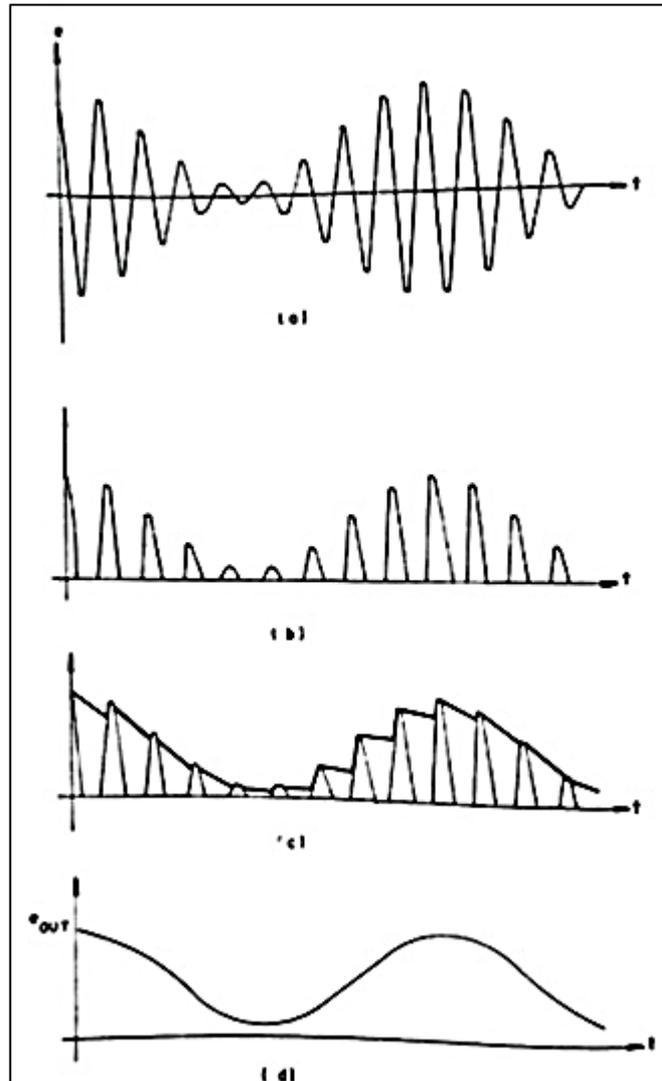


Fonte: Autor (2019).

Nesse circuito a chave síncrona é substituída pelo diodo detector e o circuito RC faz a função do filtro passa-baixas.

A Figura 53 (a), (b), (c), e (d), apresenta respectivamente: um sinal AM-DSB modulado; o sinal retificado ao passar pelo diodo, sem o capacitor; a tensão nos terminais de saída com o emprego do capacitor de filtro; e o sinal de saída idealizado.

Figura 53 – Análise de funcionamento do circuito detector de envoltória.



Fonte: GOMES (2007).

b) Demodulação AM-DSB/SC

Para a demodulação do sinal em que a onda portadora foi suprimida na modulação, é necessário recolocar uma portadora na recepção do demodulador, mantendo a mesma fase e a mesma frequência da portadora suprimida.

Dessa forma, o sinal no misturador $e_1(t)$ será o produto do sinal modulado $e(t)$ com o sinal da nova portadora gerada pelo oscilador local $e_{OL}(t)$, conforme a Equação 43.

$$e_1(t) = e(t) * e_{OL}(t) \quad (43)$$

- Sendo que, o sinal no oscilador local é dado pela expressão da Equação 44:

$$e_{OL}(t) = E_{OL} * \cos \omega_0 t \quad (44)$$

- Substituindo a Equação 24, da expressão do sinal modulado em AM-DSB/SC e a Equação 44, do sinal no oscilador local, na Equação 43, tem-se:

$$e_1(t) = \left[\frac{K * E_m * E_0}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t + \frac{K * E_m * E_0}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t \right] * E_{OL} * \cos \omega_0 t$$

$$= \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{2} * \cos(\omega_0 - \omega_m) t * \cos \omega_0 t + \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{2} * \cos(\omega_0 + \omega_m) t * \cos \omega_0 t$$

- Resolvendo as identidades trigonométricas obtém-se a Equação 45:

$$e_1(t) = \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{4} * \cos(2\omega_0 - \omega_m) t + \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{4} * \cos \omega_m t + \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{4} * \cos(2\omega_0 + \omega_m) t + \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{4} * \cos \omega_m t$$

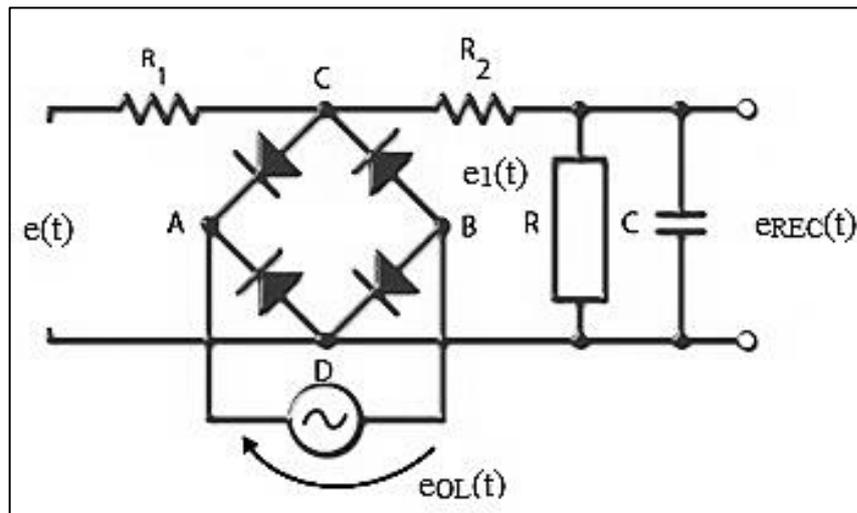
$$e_1(t) = \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{2} * \cos \omega_m t + \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{4} * \cos(2\omega_0 - \omega_m) t + \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{4} * \cos(2\omega_0 + \omega_m) t \quad (45)$$

- Após a passagem do sinal pelo filtro passa-baixas com velocidade angular de corte ω_m , obtém-se na Equação 46 a expressão do sinal AM-DSB/SC recuperado $e_{REC}(t)$.

$$e_{REC}(t) = \frac{K * E_m * E_0 * E_{OL}}{2} * \cos \omega_m t \quad (46)$$

A Figura 54, apresenta o esquema de um demodulador AM-DSC/SC usando diodos em ponte, com um filtro passa-baixas RC na saída.

Figura 54 – Demodulador síncrono AM-DSB/SC com diodos em ponte.



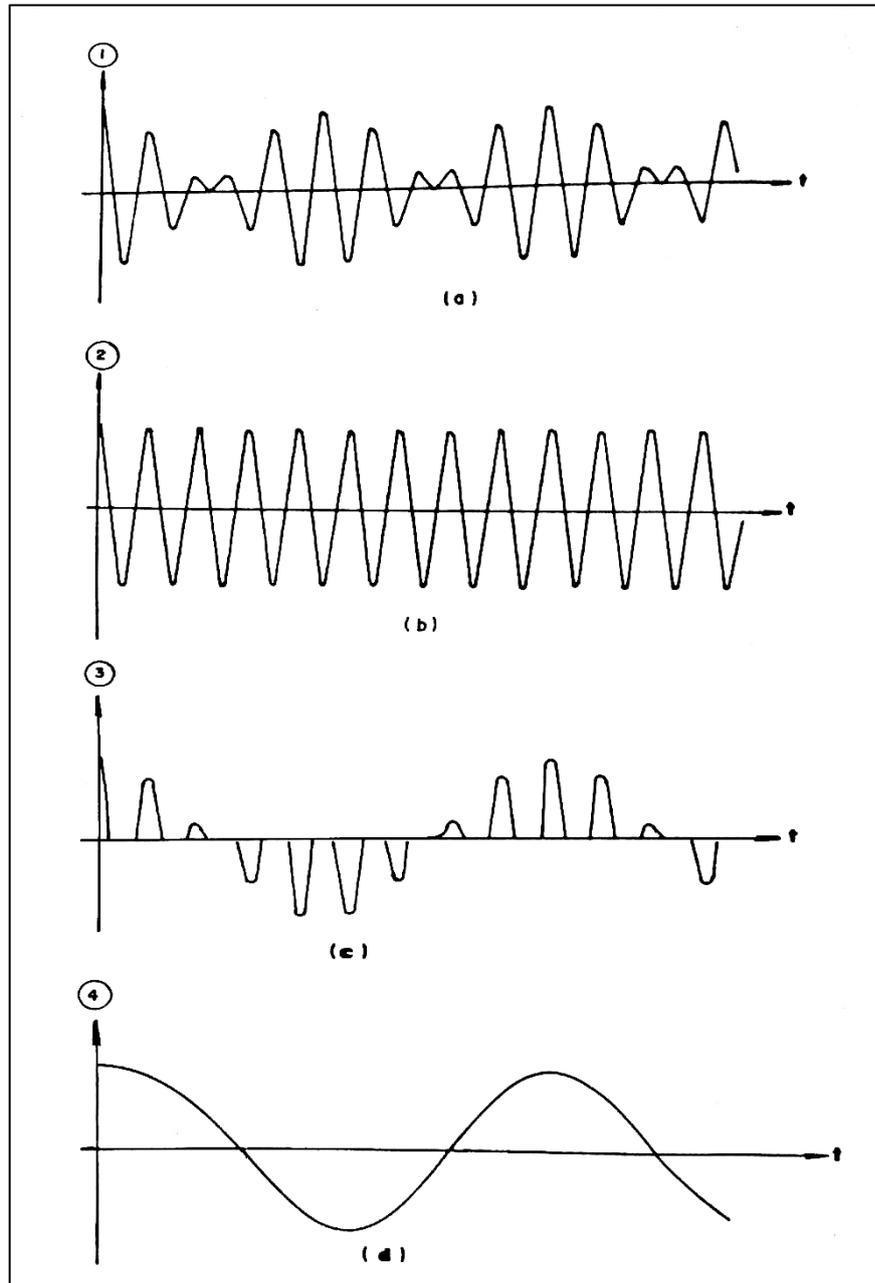
Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

Nota-se que os circuitos utilizados na demodulação AM-DSB/SC são muito semelhantes aos circuitos moduladores AM-DSB/SC, diferindo apenas na filtragem realizada.

Dessa forma, é possível utilizar na recepção o mesmo circuito de modulação, substituindo apenas o filtro passa-faixas pelo filtro passa-baixas.

A Figura 55 (a), (b), (c), e (d), apresenta respectivamente: o sinal AM-DSB/SC modulado; o sinal reinjetado pelo oscilador local; o sinal modulado chaveado; e o sinal recuperado.

Figura 55 – Formas de onda no circuito AM-DSB/SC.



Fonte: GOMES (2007).

Atenta-se novamente a necessidade de que o oscilador local esteja em perfeito sincronismo com a onda portadora inicialmente utilizada na modulação. Caso haja divergência

entre a frequência ou a fase da onda portadora inicial suprimida e da portadora reinjetada pelo oscilador local, o sinal da informação recuperado se encontrará distorcido.

c) Demodulação AM-SSB

Semelhantemente à demodulação AM-DSB/SC, na demodulação AM-SSB é reinjetada uma portadora ao sinal recebido. Desse modo, o sinal de saída do misturador é o produto dos sinais recebidos por ele.

- Define-se a Equação 47, como resultante da modulação do sinal AM-SSB:

$$e(t) = K * E_m * \cos(\omega_0 + \omega_s + \omega_m) t \quad (47)$$

- Mantendo como base a Equação 43 que determina o sinal da saída do misturador, e conhecendo a expressão do sinal gerado pelo oscilador local, tem-se:

$$e_1(t) = e(t) * e_{OL}(t)$$

$$e_1(t) = [K * E_m * \cos(\omega_0 + \omega_s + \omega_m) t] * [E_{OL} * \cos(\omega_0 + \omega_s) t]$$

$$e_1(t) = K * E_m * E_{OL} * \cos(\omega_0 + \omega_s + \omega_m) t * \cos(\omega_0 + \omega_s) t]$$

- Resolvendo as identidades trigonométricas obtém-se a Equação 48:

$$e_1(t) = \frac{K * E_m * E_{OL}}{2} * \cos(2\omega_0 + 2\omega_s + \omega_m) t + \frac{K * E_m * E_{OL}}{2} * \cos \omega_m t \quad (48)$$

- Após a passagem do sinal pelo filtro passa-baixas com velocidade angular de corte ω_m , obtém-se na Equação 49 a expressão do sinal AM-SSB recuperado $e_{REC}(t)$.

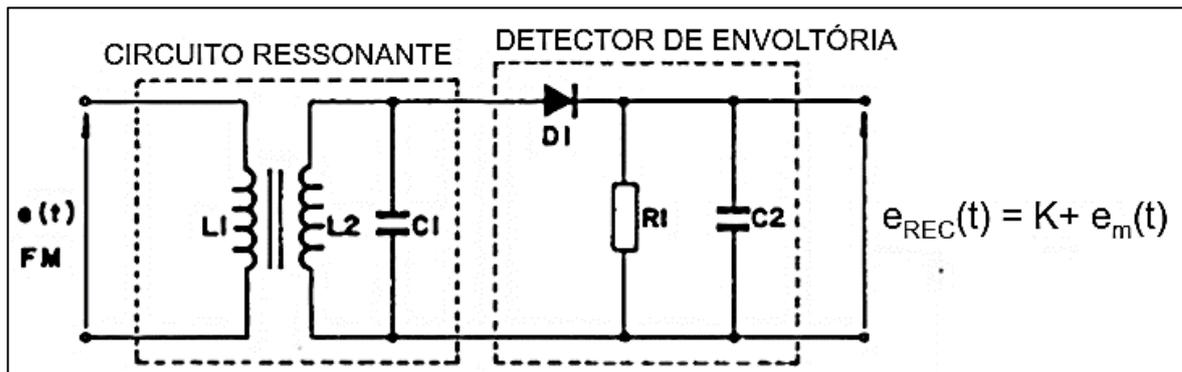
$$e_{REC}(t) = \frac{K * E_m * E_{OL}}{2} * \cos \omega_m t \quad (49)$$

A demodulação do sinal modulado em AM-VSB é a mesma utilizada na demodulação do sinal em AM-DSB/SC.

d) Demodulação FM

O método mais simples de demodulação de um sinal modulado em frequência “é o aproveitamento da inclinação praticamente linear da região não-ressonante de um circuito sintonizado” (GOMES, 2017, p.168). Para isso são utilizados os circuitos detectores de inclinação da Figura 56, que tem a função de converter linearmente variações de frequência (FM) em variações de amplitude (AM), recuperando a envoltória convencional, como ocorre na AM. Desse modo, é possível utilizar um detector de envoltória para a demodulação do sinal.

Figura 56 – Circuito do detector de inclinação.

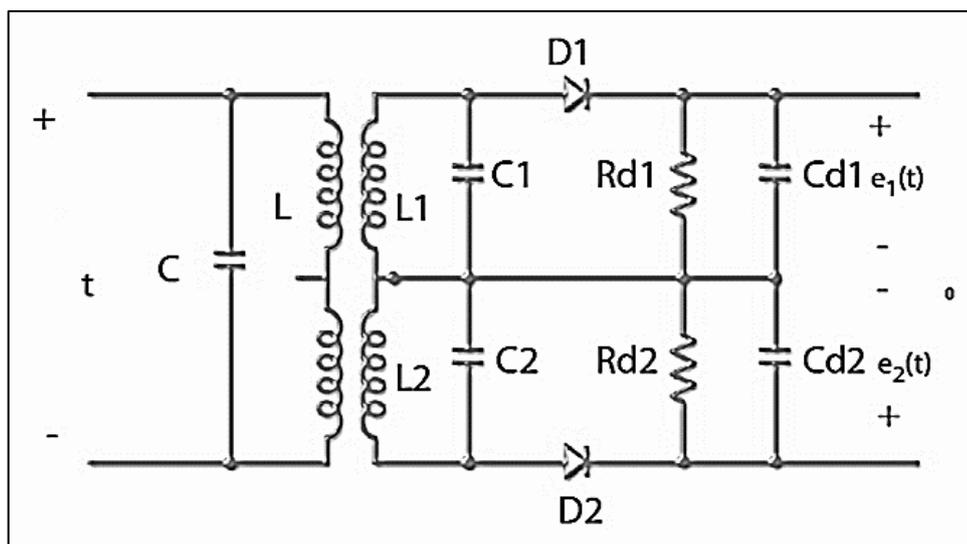


Fonte: GOMES (2007).

Esse circuito básico da Figura 56 é composto de um circuito sintonizado, formado por L_1 , L_2 e C_1 ; e de um detector de envoltória, formado por D_1 , R_1 e C_2 . Assim, o sinal modulado FM que chega ao modulador é convertido para um sinal que mistura FM com AM, passa pelo detector de envoltória e resulta no sinal recuperado.

Outra forma de demodular um sinal FM é através de um detector de inclinação balanceado, a fim de expandir a região linear e proporcionar melhor qualidade de detecção do sinal. Este demodulador é apresentado na Figura 57, sendo composto por dois detectores de inclinação montados de forma simétrica e alimentados por um transformador com derivação central, de maneira que se obtenha na saída a diferença entre as tensões dos detectores de envoltória.

Figura 57 – Detector de inclinação balanceado.



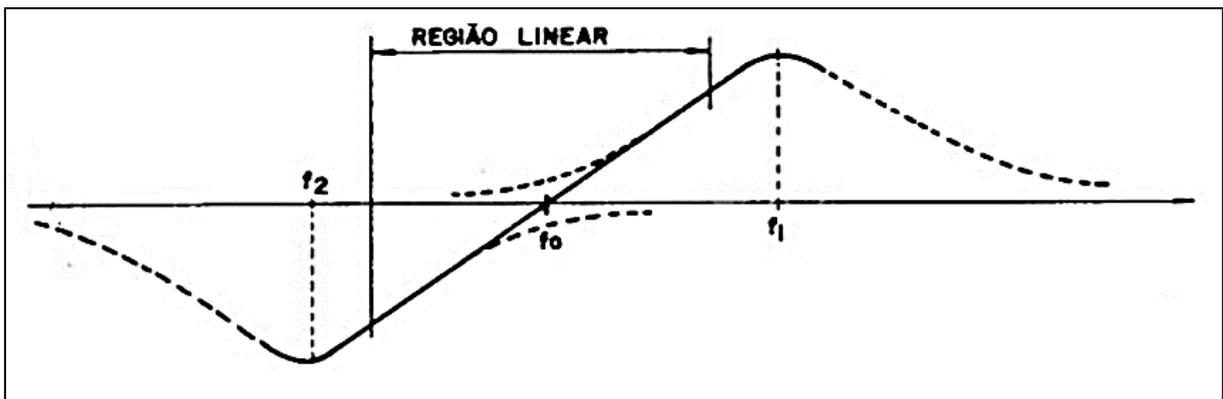
Fonte: CARVALHO e BADINHAN (2011).

Tem-se que o circuito LC é sintonizado na frequência da portadora, enquanto o circuito

L1C1 é sintonizado em uma frequência maior que a da portadora e o circuito L2C2 é sintonizado em uma frequência menor que a da portadora, de modo que o detector de envoltória superior D1, Rd1 e Cd1 carrega-se positivamente pelo enrolamento superior do secundário, enquanto o detector de envoltória inferior, alimentado por um sinal defasado em 180°, carrega o capacitor Cd2 com uma tensão negativa em relação à saída.

A curva de resposta em frequência dos dois circuitos sintonizados somada graficamente é dada na Figura 58.

Figura 58 – Curva “S” do detector balanceado.



Fonte: GOMES (2007).

O formato dessa curva de resposta em frequência resultante assemelha-se a um “S”, motivo pela qual é conhecida como curva “S”. Quanto mais linear for a curva “S”, melhor é o fator de qualidade do filtro LC no desempenho do demodulador.

e) Demodulação PAM (*Pulse Amplitude Modulation*)

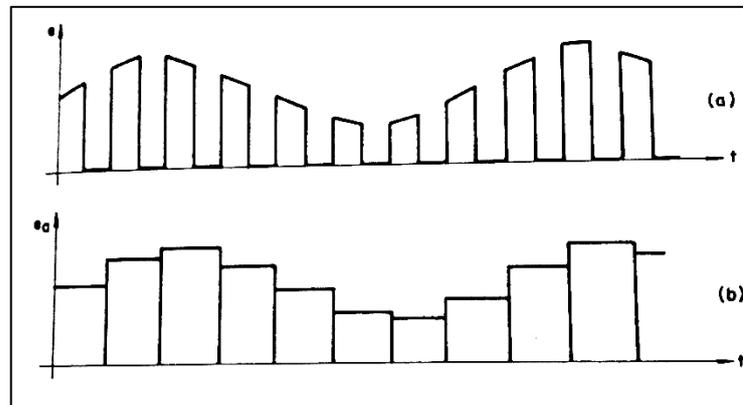
A demodulação do sinal modulado em amplitude de pulso pode ocorrer basicamente de três formas. Na primeira, e mais simples, o sinal modulado é submetido a uma filtragem passa-baixas, com frequência de corte f_m para recuperar o sinal da informação, visto que o sinal modulante permanece inalterado na sua própria faixa de frequências.

A segunda forma, descrita por Gomes (2007), consiste em centrar um filtro passa-faixas, ou circuito LC sintonizado, na frequência fundamental da portadora trem-de-pulsos e fazer a demodulação do sinal AM-DSB resultante da filtragem.

E a terceira forma ocorre através do aumento do valor médio do sinal recuperado depois da filtragem passa-baixas. Como a filtragem simples poderia resultar num baixo valor médio, este processo foi desenvolvido para aumentar o valor médio do sinal recuperado fazendo uma retenção do sinal amostrado.

A Figura 59 apresenta o sinal modulado (a), e o sinal amostrado com retenção (b).

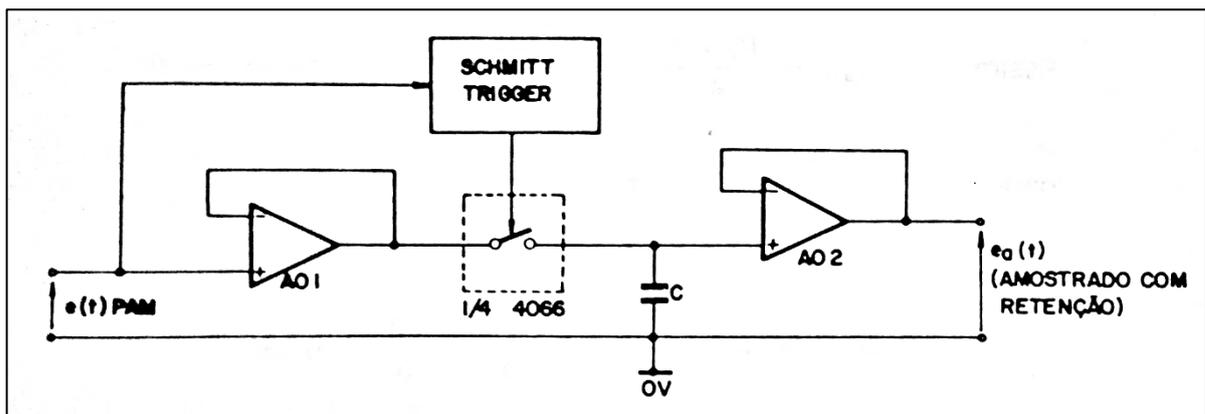
Figura 59 – Sinal PAM e sinal amostrado com retenção.



Fonte: GOMES (2007).

A onda PAM serve como sincronismo para o circuito amostrador, cujo elemento de retenção é normalmente um capacitor, como mostra a Figura 60.

Figura 60 – Circuito amostrador com retenção.



Fonte: GOMES (2007).

Verifica-se no circuito em análise a utilização de amplificadores operacionais, que apresentam baixa impedância de saída e alta impedância de entrada, fazendo com que ocorra a carga e descarga quase instantânea do capacitor por A01 e impedindo a descarga do capacitor em A02 quando 4066 estiver aberto, respectivamente.

3.5 Zona de Fresnel

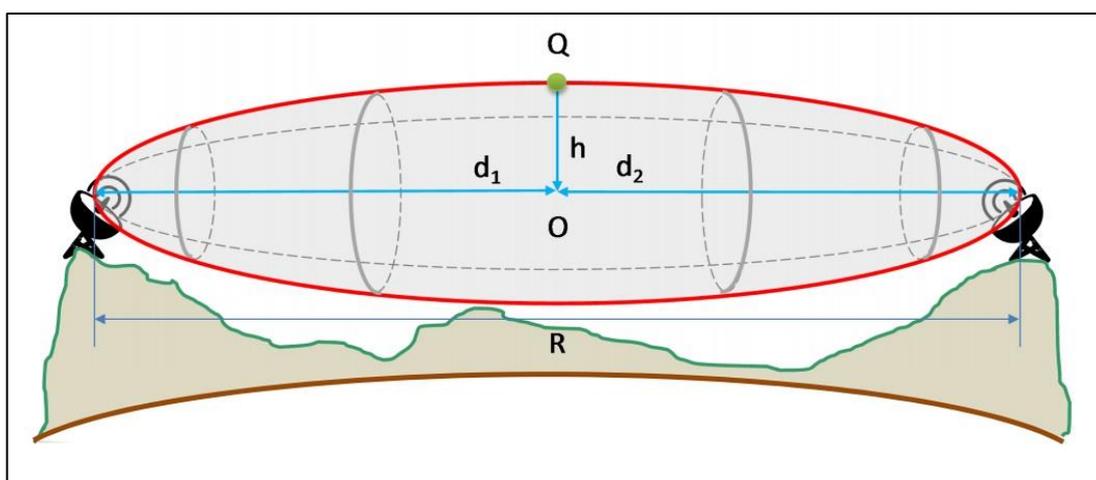
Como visto na seção 2.5 que tratou dos distúrbios presentes na radiopropagação, sabe-se que a energia eletromagnética irradiada por uma antena transmissora sofre perdas no decorrer trajeto até alcançar a antena receptora. Por mais diretiva que seja a antena, ainda existe

irradiação da energia em várias direções. Entretanto, apesar das ondas que se dispersaram seguirem percursos diferentes, grande parte delas chegam na antena receptora após sofrer múltiplas refrações na atmosfera. Assim, esse conjunto de ondas originam zonas no espaço que se assemelham ao formato de uma elipse, formada por áreas de luz e sombra, denominadas zonas de Fresnel.

As áreas de sombra são regiões do espaço que apresentam a ausência do sinal de radiofrequência, devido à existência de superfícies de refração, deixando de ser iluminadas pela transmissão eletromagnética.

A determinação da Zona de Fresnel, ilustrada na Figura 61, é fundamental para o estudo da viabilidade de um enlace de radiofrequência. Através dela é possível verificar possíveis obstruções capazes de causar a degradação ou perda do sinal.

Figura 61 – Zona de Fresnel.



Fonte: CÉSAR (2014).

Ao avaliar a Zona de Fresnel, deve-se tomar cuidado com possíveis obstáculos não previstos pela análise via *software*, como a presença de edifícios no trajeto, vegetação, entre outros, e buscar a boa visada para implementação do enlace, particularmente no enlace de radiofrequência que ocorre através da propagação por onda terrestre direta.

4 ESTUDO DE CASO

O correto planejamento de um enlace de radiofrequência é imprescindível para garantir o bom desempenho do sistema de comunicação sem fio. Esse desempenho depende fundamentalmente do projeto, dos equipamentos e das técnicas empregadas no enlace.

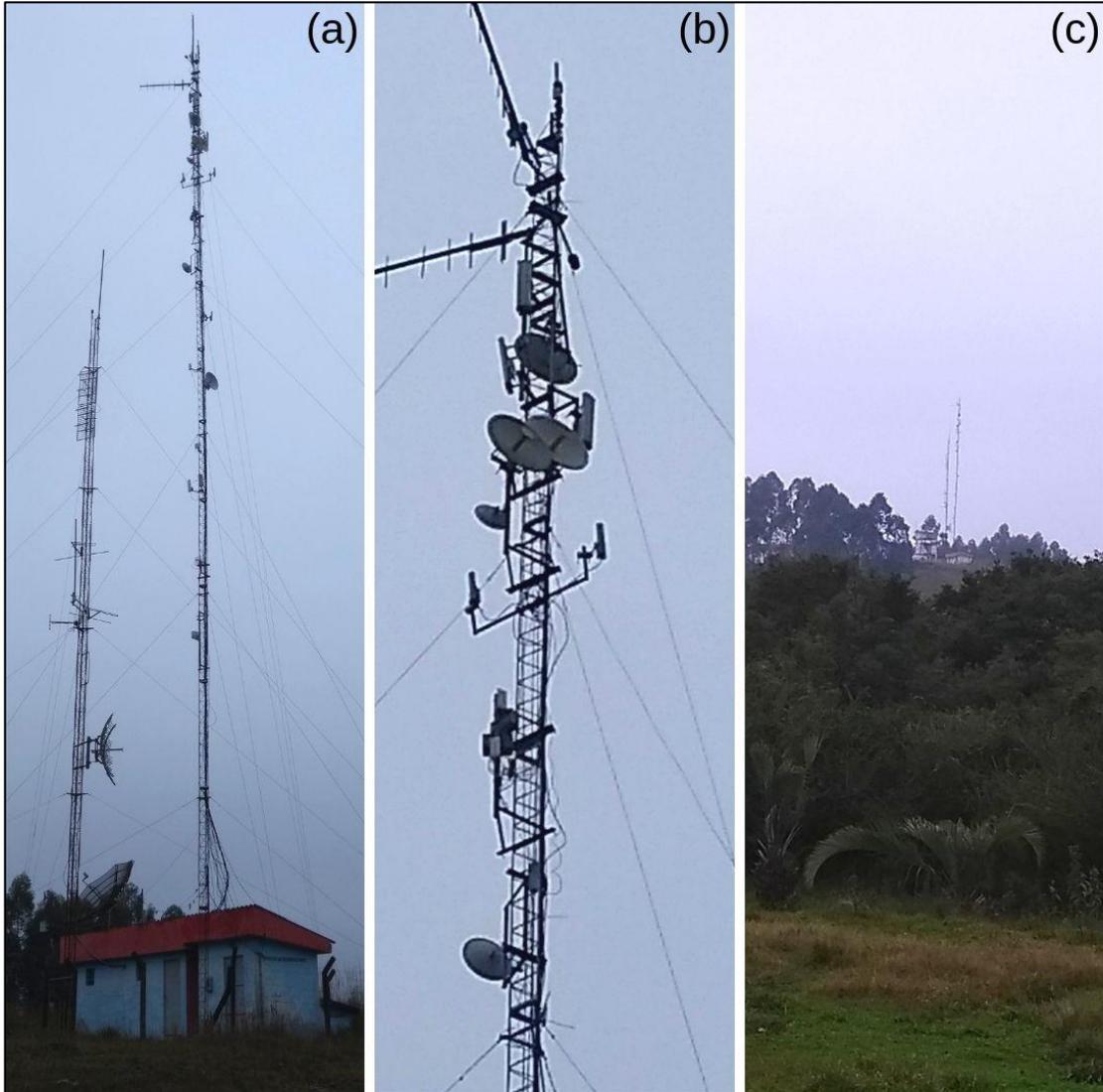
O estudo de caso que será abordado neste capítulo, apresenta o arranjo da rede de telecomunicação sem fio da empresa Ebert Informática na cidade de Correia Pinto/SC, provedora de internet via rádio nesta cidade. A partir da análise da rede existente, serão identificadas melhorias que poderão ser implementadas, buscando melhorar a qualidade do sinal entregue a seus clientes.

4.1 Materiais e métodos

O enlace de radiofrequência em estudo, compreende um conjunto de seis antenas transmissoras e três antenas receptoras de clientes escolhidos aleatoriamente e distanciados suficientemente entre si, de modo que seja possível analisar o desempenho das antenas e a qualidade do sinal recebido.

As antenas transmissoras estão dispostas em uma torre de telecomunicação, conforme a Figura 62, tendo em vista irradiar o sinal em todas as direções do plano horizontal. A torre localiza-se em um dos pontos mais elevados do perímetro urbano, com altitude de 869m em relação ao nível do mar, precisamente nas coordenadas 27°34'51.4"S 50°21'31.2"W. As antenas receptoras geralmente localizam-se fixadas em paredes de residências ou telhados, em uma altura de até 3 metros em relação ao solo, exceto nos edifícios maiores.

Figura 62 – (a) Torre de telecomunicação à direita medindo 30 metros de altura. (b) Parte superior da torre e com maior densidade de equipamentos. (c) Torre de telecomunicação vista à 583 metros de distância.



Fonte: Autor (2019).

O conjunto de antenas transmissoras e receptoras utilizadas no estudo é apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Antenas transmissoras e receptoras.

Identificação	Tipo de operação	Modelo	Marca
Ebert_Hospital D5.8	Transmissora	<i>Rocket M5</i>	<i>Ubiquiti</i>
Ebert_Hospital E3	Transmissora	<i>Rocket M5</i>	<i>Ubiquiti</i>
Ebert_Hospital E5.8	Transmissora	<i>Rocket M5</i>	<i>Ubiquiti</i>
Ebert_Hospital P2	Transmissora	<i>Rocket M5</i>	<i>Ubiquiti</i>
Ebert_Hospital P5.8	Transmissora	<i>Rocket M5</i>	<i>Ubiquiti</i>
Ebert_Hospital São_Pedro	Transmissora	<i>Nano Station Loco M5</i>	<i>Ubiquiti</i>
Receptora 01	Receptora	<i>LiteBeam M5-23</i>	<i>Ubiquiti</i>
Receptora 02	Receptora	<i>LiteBeam M5-23</i>	<i>Ubiquiti</i>
Receptora 03	Receptora	<i>LiteBeam M5-23</i>	<i>Ubiquiti</i>

Fonte: Autor (2019).

A Figura 63 exibe o mapa da região estudada e a localização dos equipamentos apresentados na Tabela 4.

Figura 63 – Mapa correspondente à área urbana da cidade de Correia Pinto/SC e localização atual das antenas em estudo.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do software *Google Earth PRO* (2019).

4.1.1 Especificações Técnicas

Os equipamentos utilizados no enlace são da fabricante *Ubiquiti Networks*, devido sua qualidade, durabilidade e confiabilidade. A seguir são apresentadas as especificações técnicas e imagens correspondentes para cada modelo das antenas mencionadas na Tabela 4.

a) *Rocket M5*

- Consumo máximo de energia: 8 W;
- Frequência de operação: 5170 – 5875 MHz;
- Ganho da antena: 3 dBi (padrão) – A *Basestation* (painel refletor) acoplada definirá o ganho real da antena;
- Largura de canal: 5/8/10/20/30/40 MHz;
- Potência de saída máxima transmitida (EIRP): 27 dBm;
- Especificações complementares: Vide Tabela 5.

Tabela 5 – Especificações complementares da antena *Rocket M5*.

Transmissor	Modulação	Taxa de dados	Transmissão média
	802.11a	6 - 24 Mbps	27 dBm
		36 Mbps	25 dBm
		48 Mbps	23 dBm
		54 Mbps	22 dBm
		802.11n/ <i>airMAX</i>	MCS0 – MCS15
Receptor	Modulação	Taxa de dados	Sensibilidade
	802.11a	6 - 24 Mbps	-94 dBm
		36 Mbps	-80 dBm
		48 Mbps	-77 dBm
		54 Mbps	-75 dBm
		802.11n/ <i>airMAX</i>	MCS0 – MCS15

Fonte: UBIQUITI (2019).

A Figura 64 exibe o refletor, denominado *Basestation* e o transmissor modelo *Rocket M5*.

Figura 64 – *Basestation e Rocket M5.*



Fonte: UBIQUITI (2019).

b) *Nano Station Loco M5*

- Consumo máximo de energia: 5,5 W;
- Frequência de operação: 5170 – 5875 MHz;
- Ganho da antena: 13 dBi;
- Largura de canal: 5/8/10/20/30/40 MHz;
- Potência de saída máxima transmitida (EIRP): 23 dBm;
- Especificações complementares: Vide Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações complementares da antena *Nano Station Loco M5*.

Transmissor	Modulação	Taxa de dados	Transmissão média
	802.11a	6 - 24 Mbps	23 dBm
		36 Mbps	21 dBm
		48 Mbps	19 dBm
		54 Mbps	18 dBm
		802.11n/ <i>airMAX</i>	MCS0 – MCS15
Receptor	Modulação	Taxa de dados	Sensibilidade
	802.11a	6 - 24 Mbps	-83 dBm
		36 Mbps	-80 dBm
		48 Mbps	-77 dBm
		54 Mbps	-75 dBm
		802.11n/ <i>airMAX</i>	MCS0 – MCS15

Fonte: UBIQUITI (2019).

A Figura 65 exibe o transmissor modelo *Nano Station Loco M5*.

Figura 65 – Antena *Nano Station Loco M5*.



Fonte: UBIQUITI (2019).

c) *LiteBeam M5-23*

- Consumo máximo de energia: 4 W;
- Frequência de operação: 5150 – 5875 MHz;
- Ganho da antena: 23 dBi;
- Largura de canal: 5/8/10/20/30/40 MHz;
- Polarização: Vertical;
- Potência de saída máxima transmitida (EIRP): 25 dBm;
- Especificações complementares: Vide Tabela 7.

Tabela 7 – Especificações complementares da antena *LiteBeam M5-23*.

Transmissor	Modulação	Taxa de dados	Transmissão média
	802.11n/ <i>airMAX</i>	MCS0 – MCS7	19 - 25 dBm
Receptor	Modulação	Taxa de dados	Sensibilidade
	802.11n/ <i>airMAX</i>	MCS0 – MCS7	-75 a -97 dBm

Fonte: UBIQUITI (2019).

A Figura 66 exibe a antena *LiteBeam M5-23* com refletor com ganho de 23 dBi.

Figura 66 – Antena *LiteBeam M5-23*.



Fonte: UBIQUITI (2019).

4.1.2 *airOS*

O *airOS v5.6* é um sistema operacional para equipamentos da série *Ubiquiti M*, que permite acessar a Interface de configuração de rede desses equipamentos. Sua página principal exibe um resumo do status do enlace, informações dos valores atuais da configuração básica, configuração de rede e estatísticas de tráfego, conforme ilustração da Figura 67.

Figura 67 – Página principal do *airOS* v5.6.

The screenshot displays the main interface of the *airOS* v5.6 web management system. The top navigation bar includes tabs for MAIN, WIRELESS, NETWORK, ADVANCED, SERVICES, and SYSTEM. The 'Estado' (Status) section provides detailed information about the Rocket M5 device, including its model, name, network mode (Bridge), SSID (Ebert_hospitalD5.8), security settings, version (v6.1.8), and activity time. It also lists channel and frequency information, distance, transmission/reception chains, energy, and antenna details. On the right, system metrics like CPU (9%), Memory (36%), AP MAC, signal strength, and airMAX quality (91%) are shown with progress bars. Below this is a 'Monitorizar' (Monitor) section with a table of connected stations.

MAC da estação	Nome do dispositivo	Sinal de transmissão, dBm Combinado	Sinal de recepção, dBm Combinado	Ruído, dBm	Latência, ms	Distância, km	Transmissão/recepção, Mbps	CCQ, %	Ligação Hora	Último IP	Ação
	Odila	-62	-58	-105	1	1.3	150 / 150	99	03:49:32	desconhecido	desligar
	Luciana	-56	-50	-105	1	1.1	150 / 150	98	00:34:50	desconhecido	desligar
	Amelia	-64	-66	-105	1	0.9	150 / 121.5	97	08:13:40	desconhecido	desligar
	Adriano	-62	-59	-105	1	0.8	150 / 150	98	11:57:27	desconhecido	desligar
	Elena	-52	-56	-105	1	0.8	150 / 150	99	03:48:26	desconhecido	desligar

Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do sistema *airOS* (2019).

A seguir, descreve-se as principais funções da página principal do *airOS* v5.6:

- Canal/frequência: Número do canal e frequência de operação correspondente. Se o canal for DFS (*Dynamic Frequency Selection*), significa que a frequência é selecionada dinamicamente dentro da faixa estabelecida.
- Amplitude de canal: Largura espectral do canal de rádio utilizado pelo dispositivo. Quando a antena opera no modo estação, o valor padrão é 20/40 MHz automático.
- Banda de frequências: Frequência real alcançada pelo dispositivo.
- Distância: Espaço entre o ponto de acesso e a estação conectada mais distante. A distância pode ser definida manualmente, e limita o alcance do enlace para o valor desejado.
- Ligações: Número de estações sem fio conectadas.
- Cadeias Tx/Rx (Transmissão/Recepção): Número de fluxos de dados espaciais independentes que o dispositivo transmite e recebe simultaneamente dentro de um canal. Essa propriedade é específica para dispositivos 802.11n que dependem de várias saídas e múltiplas entradas (*MIMO Multiple-Input Multiple-Output*).
- Energia de transmissão: Potência transmitida.

- Ganho: Eficiência em relação a diretividade da antena.
- Ruído de fundo: Ruído ambiental (interferência) na frequência de operação. Normalmente o valor de sensibilidade dos dispositivos é definido em -96 dBm, ou seja, somente o sinal maior que esse valor será recebido. Dessa forma, os ruídos que forem menor que esse valor serão rejeitados automaticamente.
- CCQ de transmissão: Avalia a qualidade da conexão. De acordo com o fabricante o valor ideal é acima de 90%.
- *airMAX*: Protocolo proprietário da *Ubiquiti* que fornece melhor desempenho sem fio, maior número de estações conectadas, maior taxa de transferência de dados, melhor tolerância a interferências e menor tempo de latência.
- Qualidade do *airMAX*: Função que avalia a qualidade do enlace físico. Se o valor estiver abaixo de 80%, o canal deve ser trocado.
- Capacidade do *airMAX*: Mede a eficiência do tempo de transmissão. Uma estação 1x1 conectada com outras estações 2x2 no transmissor com tecnologia, vai afetar a eficiência e prejudicar os outros 2x2, pois ocupará mais tempo com uma transmissão de baixa velocidade em relação aos demais. Um dispositivo 1x1 fornece a metade do desempenho de um dispositivo 2x2.

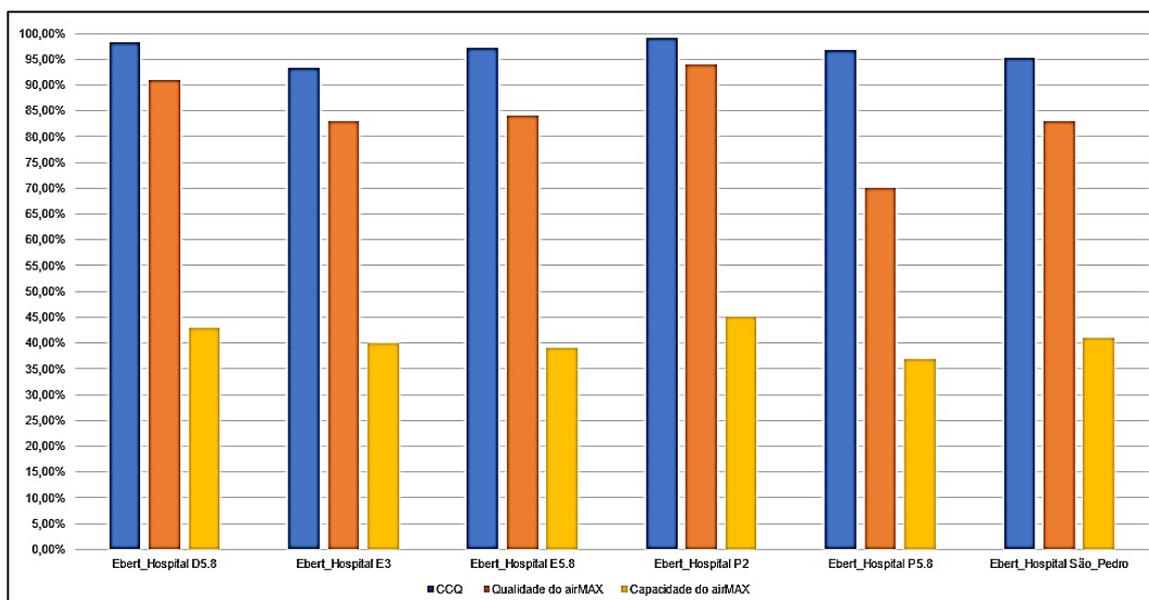
Utilizando essa ferramenta, realizou-se a extração das principais informações de operação do sistema, apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Configuração dos transmissores.

	Ebert_ Hospital D5.8	Ebert_ Hospital E3	Ebert_ Hospital E5.8	Ebert_ Hospital P2	Ebert_ Hospital P5.8	Ebert_ Hospital São_Pedro
Canal/	149/	149/	165/	120/	165/	104/
Frequência	5745 MHz	5745 MHz	5825 MHz	5600 MHz (DFS)	5825 MHz	5520 MHz (DFS)
Amplitude do canal	40 MHz	40 MHz	40 MHz	40 MHz	40 MHz	40 MHz
Banda de frequências	5735 – 5775 MHz	5735 – 5775 MHz	5795 – 5835 MHz	5570 – 5610 MHz	5795 – 5835 MHz	5490 – 5530 MHz
Distância	1,2 km	2,7 km	2,0 km	1,2 km	2,4 km	1,8 km
Ligações	5	16	13	2	14	12
Tx/Rx	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2	2x2
Energia	11 dBm	11 dBm	10 dBm	14 dBm	10 dBm	14 dBm
Ganho	19 dBi	19 dBi	20 dBi	16 dBi	20 dBi	13 dBi
Ruído	-105 dBm	-107 dBm	-105 dBm	-90 dBm	-104 dBm	-90 dBm
CCQ	98,4%	93,4%	97,2%	99,1%	96,9%	95,3%
Qualidade do <i>airMAX</i>	91%	83%	84%	94%	70%	83%
Capacidade do <i>airMAX</i>	43%	40%	39%	45%	37%	41%

Fonte: Autor (2019).

Figura 68 – Qualidade de transmissão.



Fonte: Autor (2019).

Ao realizar a análise da Tabela 8 e do gráfico da Figura 68, relaciona-se as seguintes observações:

A amplitude do canal está ajustada em 40 MHz de modo a obter a melhor taxa de transmissão de dados disponível. A energia de transmissão e o ganho da antena variam de acordo com o refletor utilizado. A qualidade de transmissão em todas as antenas está acima de 90%. Somente em um caso a qualidade do *airMAX* está abaixo de 80%. As antenas poderiam obter melhor capacidade do *airMAX* que se encontra abaixo da metade de sua capacidade.

A página *wireless* (sem fio), ilustrada na Figura 69, contém todas as funções necessárias para configurar a parte sem fio do enlace. Isso inclui configurações do canal e de frequência, modo de operação do dispositivo e taxas de dados.

Figura 69 – Página sem fio do *airOS* v5.6.

The screenshot shows the 'Definições Sem Fios básicas' (Basic Wireless Settings) page in the airOS v5.6 web interface. The interface includes a navigation menu with tabs for MAIN, WIRELESS, NETWORK, ADVANCED, SERVICES, and SYSTEM. The current page is under the WIRELESS tab. The settings are organized into two main sections: 'Definições Sem Fios básicas' and 'Segurança Sem Fios'.

Definições Sem Fios básicas:

- Modo Sem Fios: Ponto de acesso
- WDS (modo de bridge transparente): Ativar
- SSID: Ebert_hospitalE5.8 Ocultar SSID
- Código de país: Brasil
- Modo IEEE 802.11: A/N misto
- DFS: Ativar
- Amplitude de canal: 40 MHz
- Frequência (em MHz): 5825
- Canal de extensão: 0 mais baixo
- Lista de frequências (em MHz): Ativar
- Limite EIRP calculado: Ativar
- Antena: AM-5G20-90 (2x2) - 20 d
- Energia de saída: 10 dBm
- Módulo de taxa de transmissão: Predefinição
- Taxa de transferência máxima (em Mbps): MCS 15 - 270/300 Automático

Segurança Sem Fios:

- Segurança: nenhum
- Autenticação de RADIUS MAC: Ativar
- ACL de MAC: Ativar

At the bottom right of the configuration area, there is an 'Alterar' (Change) button. The footer of the page includes the 'GENUINE PRODUCT' logo and the copyright notice: '© Copyright 2006-2018 Ubiquiti Networks, Inc.'

Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do sistema *airOS* (2019).

A seguir, descreve-se as principais funções da página sem fio do *airOS* v5.6:

- Modo sem fios: Especifica o tipo de operação. Pode ser estação, onde o dispositivo é usado como receptor do sinal de radiofrequência; ponto de acesso, onde o dispositivo se comporta como um transmissor; e repetidor de ponto de acesso, onde o dispositivo recebe o sinal de um ponto de acesso e o repete com maior intensidade. Os dispositivos da série M, utilizados no estudo, operam em apenas um modo de cada vez.
- Modo IEEE 802.11: Esse modo é definido de acordo com cada país, já que as regulamentações das faixas de frequência diferem entre si. O Brasil utiliza o padrão A/N misto.
- DFS (*Dynamic Frequency Selection*): A seleção de frequência dinâmica é utilizada quando se quer evitar interferências com radares que usam a faixa de 5 GHz.
- Amplitude de canal: É a largura do espectro do canal. Usar uma largura de canal maior aumentará o rendimento do transmissor e a taxa de transferência de dados. Usar uma

largura de canal menor permitirá um número maior de canais a serem usados, e enlaces mais robustos em longas distâncias.

- **Frequência:** Frequência utilizada pelo dispositivo. Se a opção automática for selecionada, o dispositivo vai escolher a melhor frequência de um intervalo determinado.
- **Antena:** Disponível para dispositivos compatíveis com múltiplas antenas.
- **Energia de saída:** Potência de saída do dispositivo. Varia com o tipo de antena empregado.
- **Taxa de transferência máxima:** Taxa máxima de dados em uma faixa que o dispositivo transmite.

Na página *advanced* (avançado) do *airOS v5.6*, é onde pode-se definir manualmente a distância máxima que o transmissor irá alcançar, e também limitar a sensibilidade do transmissor, ou seja, definir o nível mínimo de sinal necessário para permitir que uma estação receptora se conecte ao ponto de acesso.

4.1.3 *airView*

O *airView* é uma ferramenta integrada no *airOS* que possibilita analisar o ruído ambiente do espectro de rádio, e, assim, selecionar a frequência ideal para instalação do ponto de acesso.

A página inicial do analisador espectral da Figura 70, apresenta as seguintes informações:

- *Device:* Identificação do dispositivo.
- *Total RF Frames:* Número total de estações de radiofrequência encontradas.
- *FPS:* Número total de quadros por segundo exibidos na análise.
- *Reset all data:* Redefine os dados coletados.

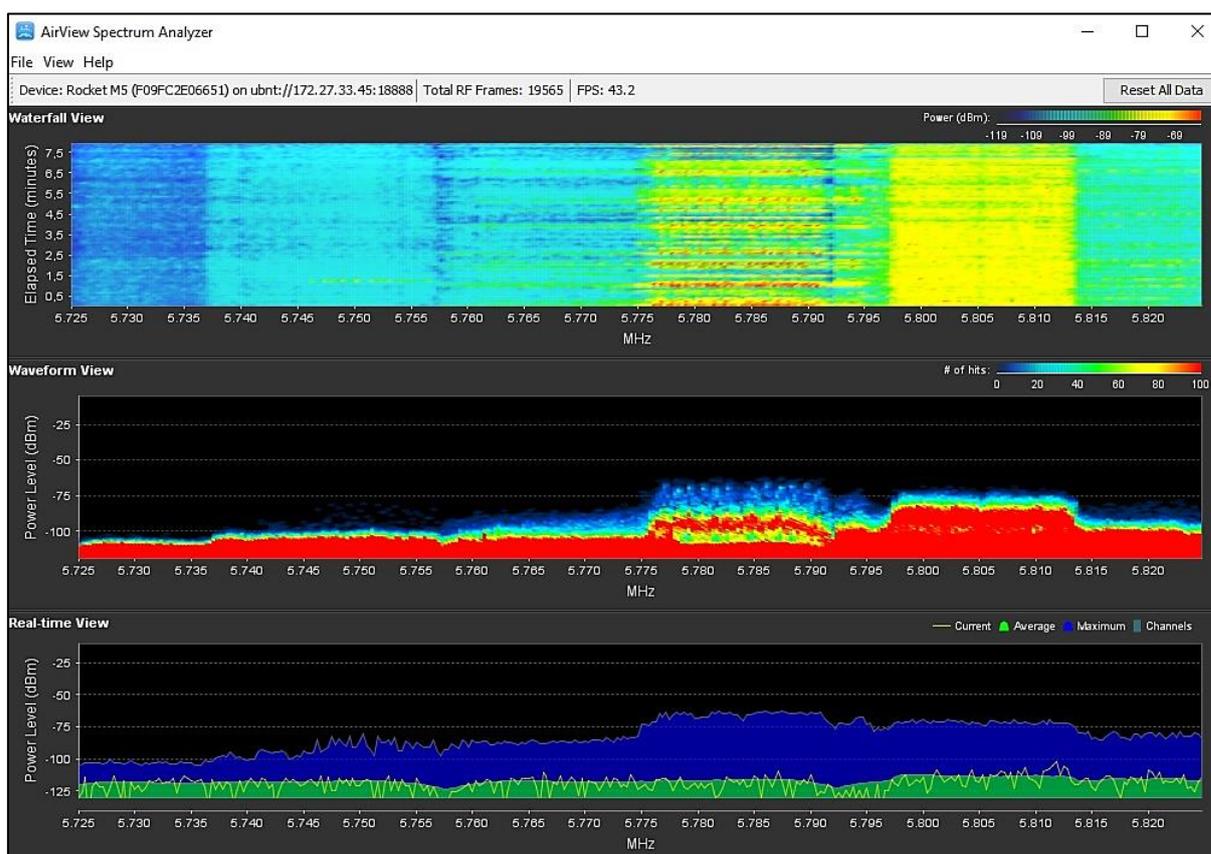
Também são apresentados os gráficos de análise espectral:

- *Waterfall view:* Gráfico em cascata que mostra o histórico da energia coletada em cada frequência desde o início da sessão do *airView*, isto é, os equipamentos em operação naquela faixa. A cor da frequência define sua amplitude. Quanto mais fria, menor será o nível de energia (níveis de azul), e quanto mais quente ela for, maior o nível de energia (amarelo, laranja e vermelho). A legenda fornece um guia associando as cores aos vários níveis de potência. O menor nível é ajustado de acordo com o ruído calculado, e o maior

é definido para o nível de potência mais alta detectada desde o início da sessão.

- *Waveform view*: Gráfico que mostra a assinatura energética de radiofrequência do ambiente de ruído desde o início da sessão do *airView*.
- *Real-time view*: Gráfico que exhibe o analisador do espectro em que a energia é mostrada em função da frequência. A linha amarela, e as áreas verde e azul mostram a energia em tempo real, a potência média e a potência máxima no espectro, respectivamente.

Figura 70 – Analisador espectral *airView*.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através da ferramenta *airView* (2019).

4.1.4 Google Earth PRO

O *Google Earth PRO* é um *software* desenvolvido pela *Google LLC*, que oferece uma enorme gama de funções relacionadas ao globo terrestre. Dentre elas, são utilizadas as funções direcionadas à obtenção de dados do mapa e do terreno.

Especialmente, um recurso denominado “perfil de elevação” auxiliará na exploração dos detalhes técnicos acerca das elevações do percurso entre dois pontos, o que permitirá a análise da zona de Fresnel.

4.1.4 airLink

Outra ferramenta oferecida pela *Ubiquiti* para auxiliar o planejamento dos enlaces de radiofrequência é o *airLink*, que além de proporcionar uma verificação mais detalhada da Zona de Fresnel estudada na seção 3.5, viabiliza a simulação de uma rede sem fio, possibilitando a alteração e a combinação dos equipamentos para constatar qual será mais eficiente para tal cenário. A simulação oferece a possibilidade de enlace ponto a ponto ou ponto-multiponto.

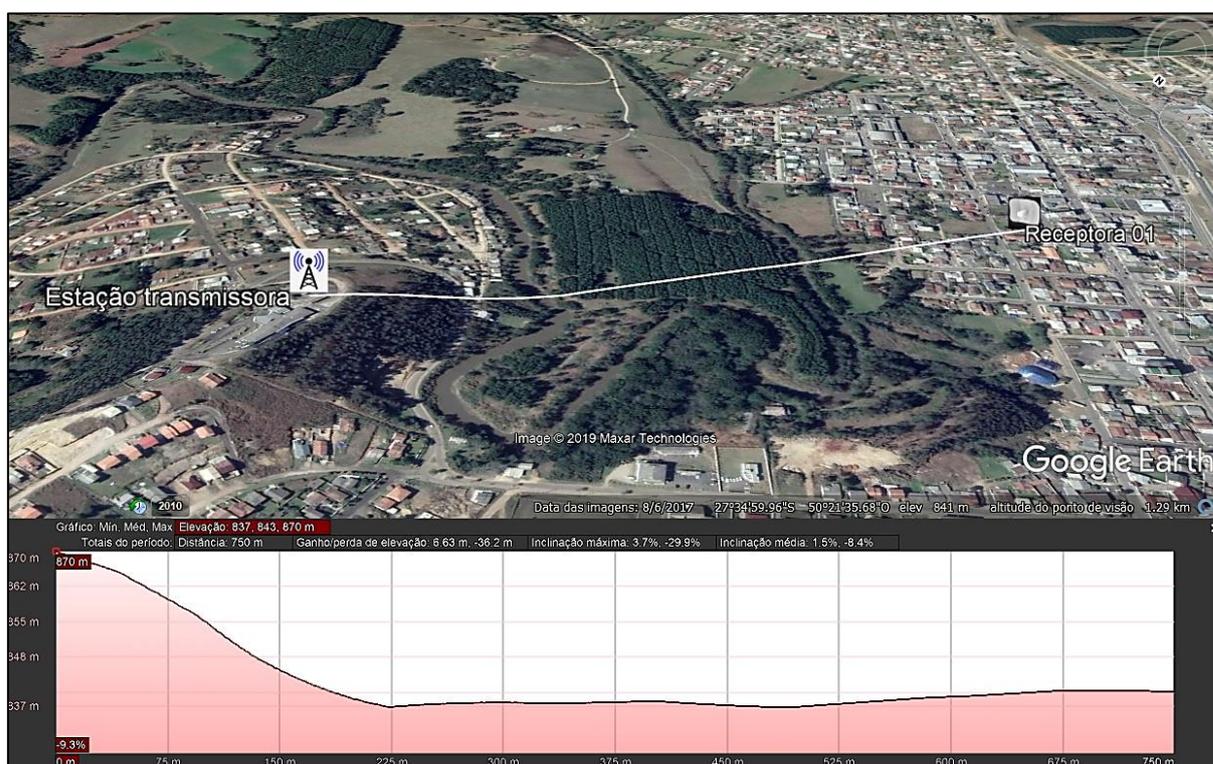
4.2 Análise do enlace

Inicialmente, será realizada a análise da linha de visada e da zona de Fresnel entre cada estação receptora e a torre geral de transmissão.

a) Receptora 01 – Estação Transmissora

Obtém-se na Figura 71, através do *Google Earth PRO*, o perfil de elevação ao longo do trajeto entre esses dois pontos:

Figura 71 – Perfil de elevação entre a antena receptora 01 e a torre de transmissão.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do *software Google Earth PRO* (2019).

Nota-se no lado esquerdo do gráfico, a altitude do terreno no ponto da estação transmissora. Essa altitude varia até chegar no final do percurso, onde encontra-se a estação

receptora 01. Assim, verifica-se que os dispositivos estão em linha de visada, pois a estação transmissora está no ponto mais alto e nenhum outro ponto intermediário se sobrepõe a essa elevação.

Na Figura 72, obtém-se a Zona de Fresnel para esse cenário:

Figura 72 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 01 e a torre de transmissão.



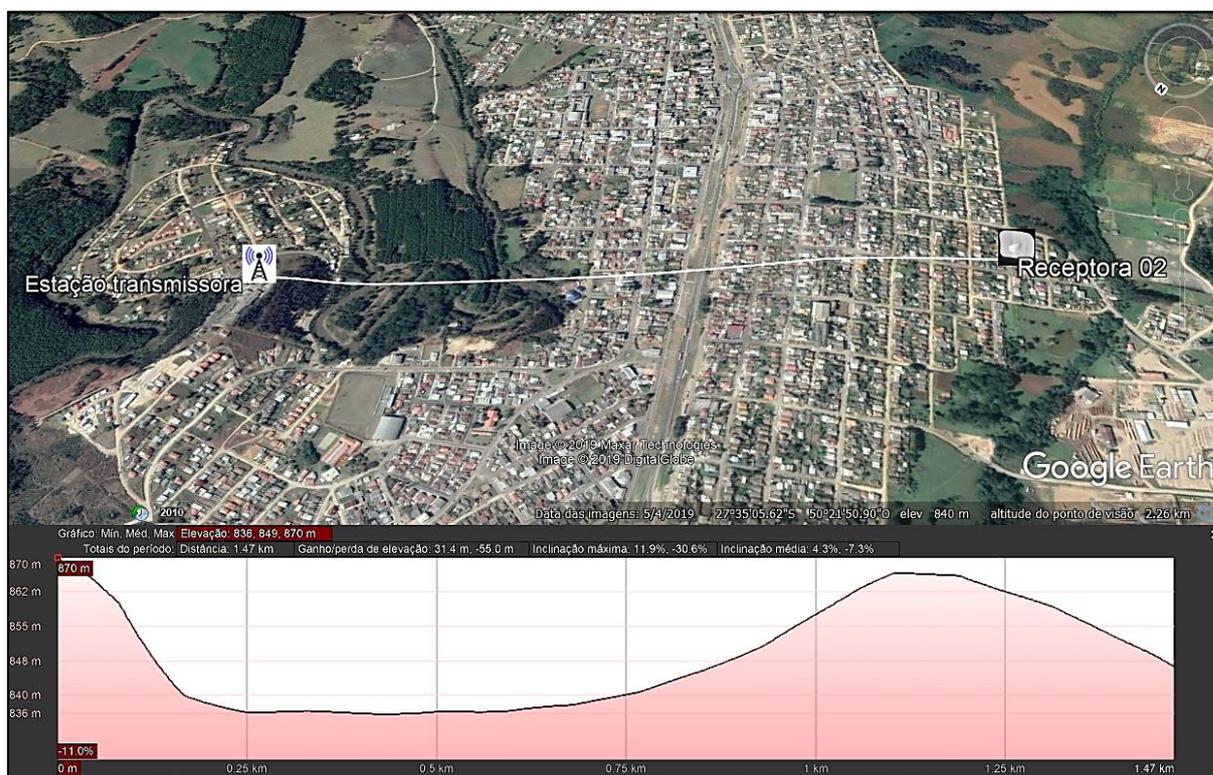
Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através da ferramenta *airLink* (2019).

Confirmando a análise do perfil de elevação, verifica-se que a zona de Fresnel, em destaque, está livre e o enlace apresentará um bom desempenho.

b) Receptora 02 – Estação Transmissora

A Figura 73, permite verificar o perfil de elevação do terreno entre a Receptora 02 e a estação transmissora:

Figura 73 – Perfil de elevação entre a antena receptora 02 e a torre de transmissão.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do *software Google Earth PRO* (2019).

Com base nos mesmos procedimentos utilizados na análise anterior, verifica-se que os dispositivos não estão em linha de visada. Ainda que a estação transmissora esteja no ponto mais alto, há uma elevação em parte trajeto impedindo que o sinal alcance a antena receptora, localizada em uma área de sombra.

Essa elevação intermediária é destacada na Figura 74 a seguir.

Figura 74 – Perfil de elevação do terreno.

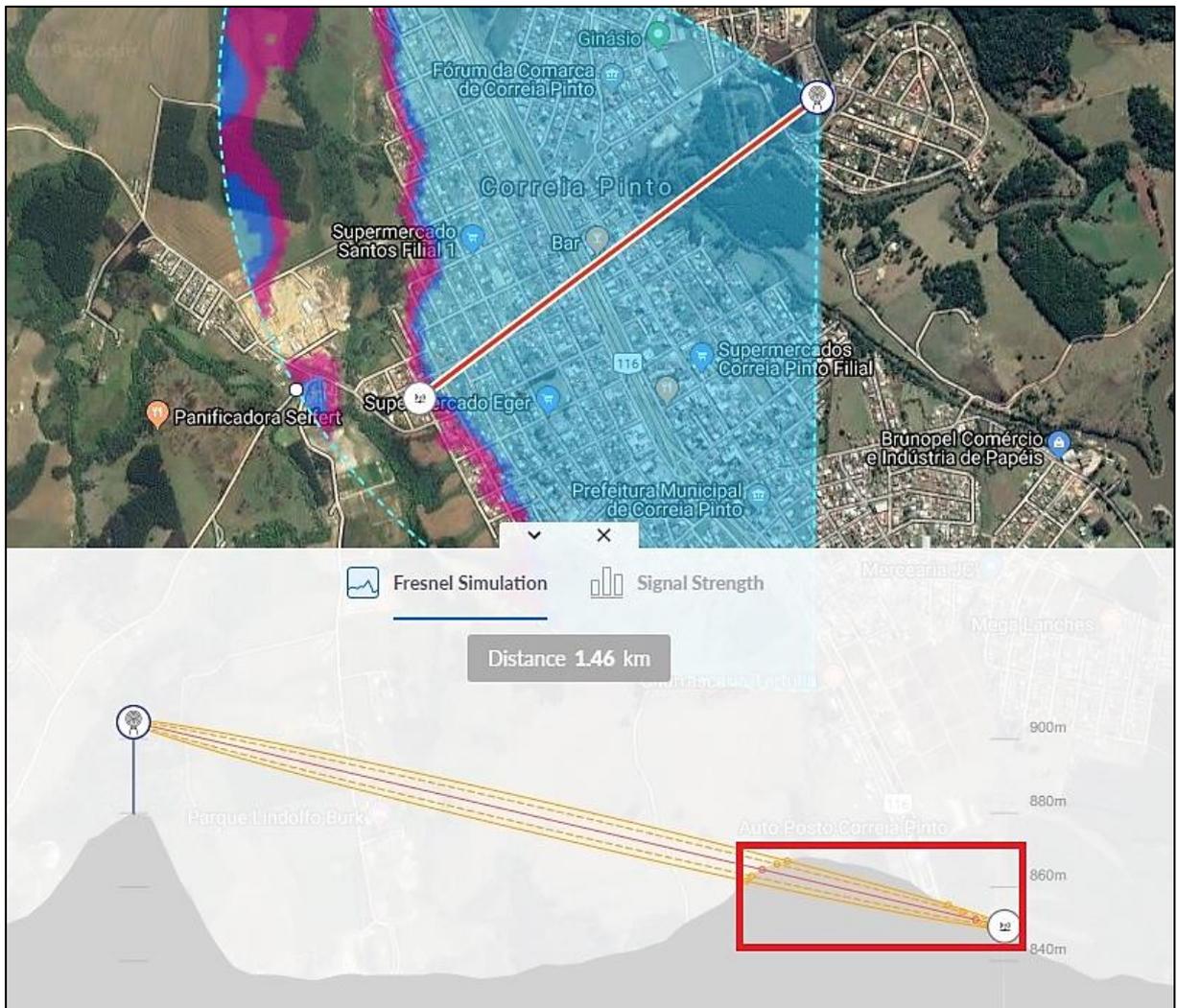


Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do *software Google Earth PRO* (2019).

Ao verificar a zona de Fresnel na Figura 75, confirma-se essa conjuntura. Destaca-se ainda que as áreas do mapa na cor púrpura são regiões de sombra onde o sinal não alcança, e a área em azul são as regiões que o transmissor alcança, de acordo com a angulação de

transmissão do refletor e ganho da antena.

Figura 75 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 02 e a torre de transmissão.

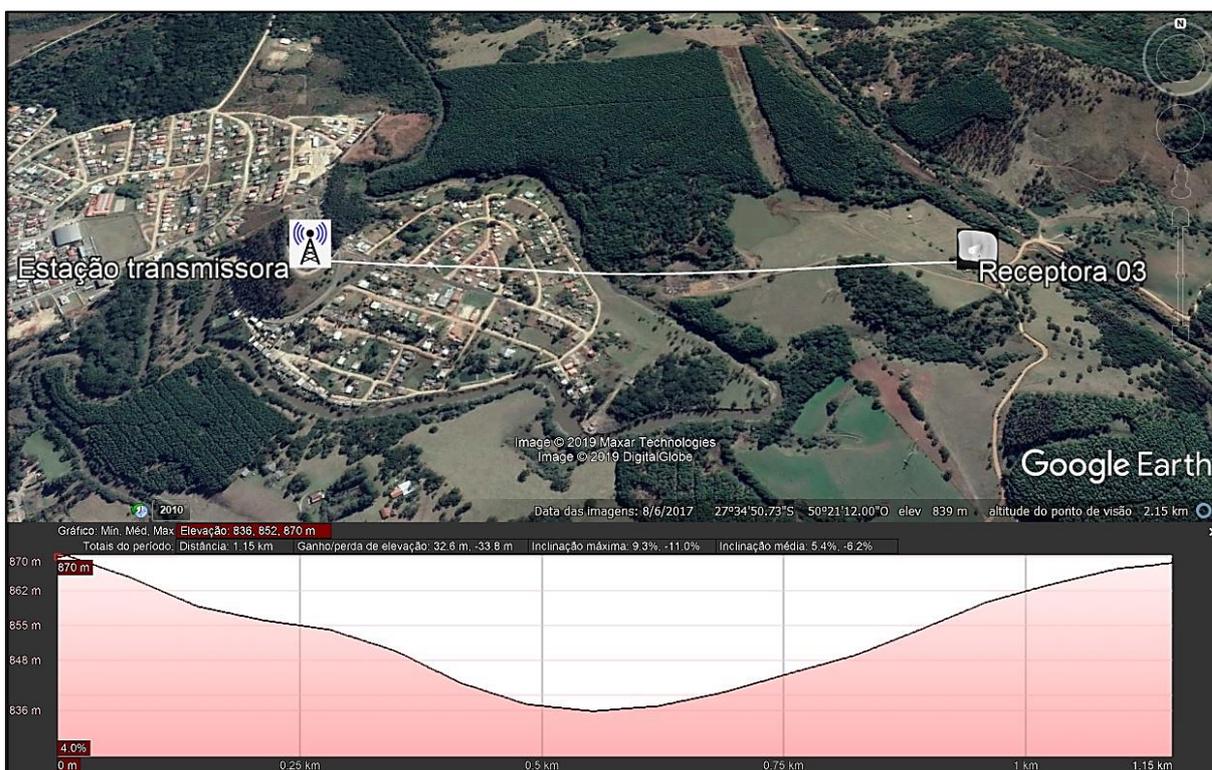


Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através da ferramenta *airLink* (2019).

c) Receptora 03 – Estação Transmissora

O perfil de elevação do enlace entre a Receptora 03 e a estação transmissora é mostrado na Figura 76.

Figura 76 – Perfil de elevação entre a antena receptora 02 e a torre de transmissão.

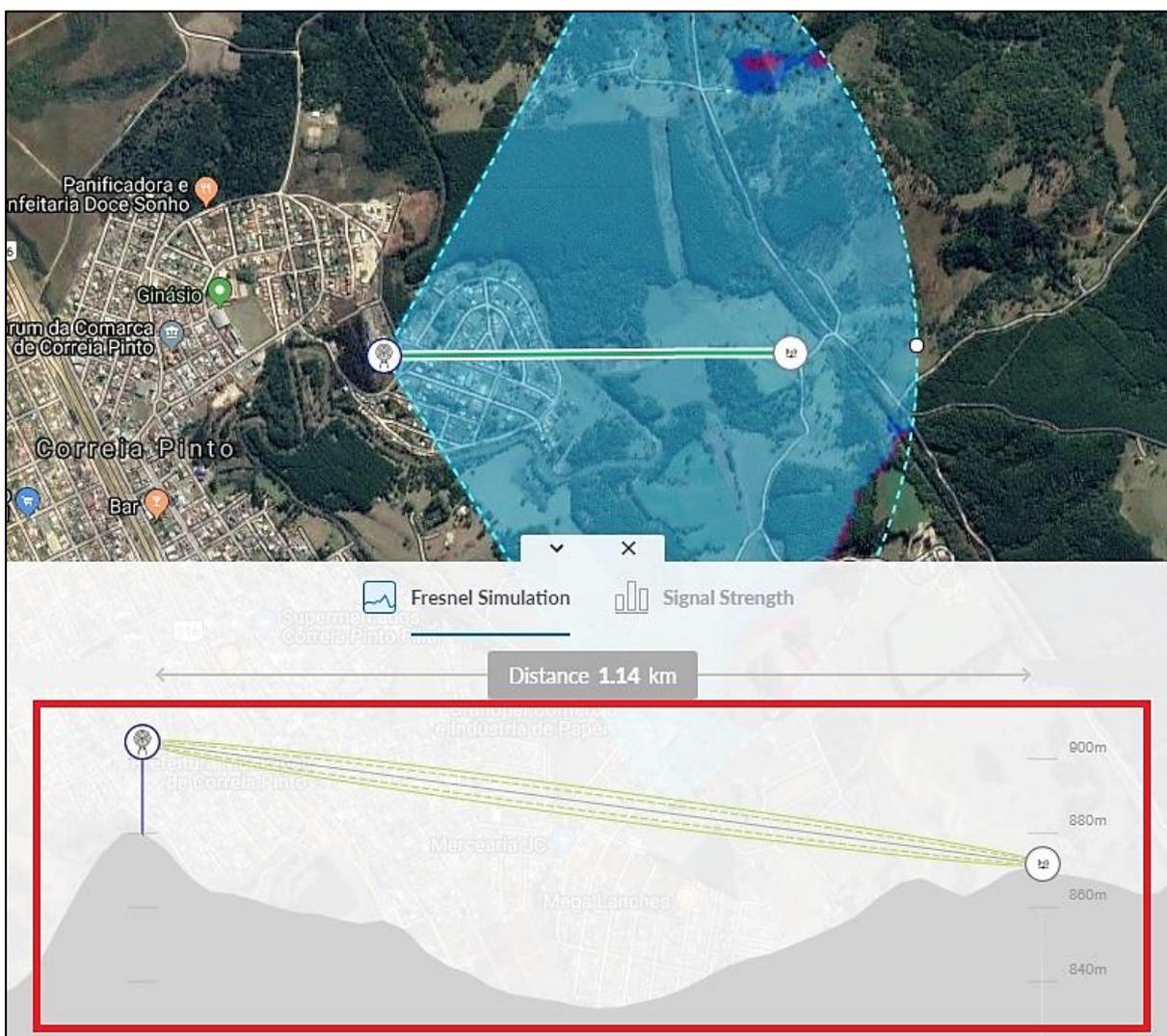


Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do *software Google Earth PRO* (2019).

Percebe-se que existem variações de elevação ao longo do caminho, mas que nenhum ponto intermediário interfere a propagação do sinal, e que as antenas transmissora e receptora encontram-se nos pontos mais elevados, à esquerda e à direita do gráfico, respectivamente. Dessa forma, pode-se afirmar que os dispositivos estão em linha de visada e que a transmissão será bem-sucedida.

Realizando a verificação da zona de Fresnel na Figura 77, tem-se a confirmação da propagação do sinal.

Figura 77 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 03 e a torre de transmissão.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através da ferramenta *airLink* (2019).

4.3 Resultados

Através das análises do enlace realizadas na seção 4.2, foi possível determinar que os itens a e c apresentaram viabilidade para implementação, enquanto o item b não obteve a condição de visibilidade requerida.

Por conseguinte, será verificado os pontos de acesso ideais para que as receptoras 01 e 03 se conectem. Adiante, serão fornecidas soluções que permitirão o enlace entre a Receptora 02 e o ponto de acesso.

a) Receptora 01 – Ponto de acesso

Recorrendo ao *airOS*, realiza-se o escaneamento na antena receptora 01 para encontrar o ponto de acesso que oferecerá melhor desempenho. Os pontos de acesso rastreados são

apresentados na Figura 78.

Figura 78 – Pontos de acesso rastreados pela Receptora 01.

Inquérito do site

Frequências rastreadas:
 5.5GHz 5.505GHz 5.51GHz 5.515GHz 5.52GHz 5.525GHz 5.53GHz 5.535GHz 5.54GHz 5.545GHz 5.55GHz 5.555GHz 5.56GHz 5.565GHz 5.57GHz
 5.575GHz 5.58GHz 5.585GHz 5.59GHz 5.595GHz 5.6GHz 5.605GHz 5.61GHz 5.615GHz 5.62GHz 5.625GHz 5.63GHz 5.635GHz 5.64GHz 5.645GHz
 5.65GHz 5.655GHz 5.66GHz 5.665GHz 5.67GHz 5.675GHz 5.68GHz 5.685GHz 5.69GHz 5.695GHz 5.7GHz 5.745GHz 5.75GHz 5.755GHz 5.76GHz
 5.765GHz 5.77GHz 5.775GHz 5.78GHz 5.785GHz 5.79GHz 5.795GHz 5.8GHz 5.805GHz 5.81GHz 5.815GHz 5.82GHz 5.825GHz

Endereço MAC	SSID	Nome do dispositivo	Modo de rádio	Encriptação	Sinal / Ruído, dBm	Frequência, GHz / Canal
<input type="radio"/> 44:D9:E7:64:23:D7	Ebert_hospitalE5.8	Ap_Hospital_E	802.11n airMAX	NONE	-59 / -104	5.825 / 165
<input type="radio"/> 80:2A:A8:2E:3F:0C	Ebert_hospitalP5.8	Ap_Hospital	802.11n airMAX	NONE	-77 / -104	5.825 / 165
<input type="radio"/> DC:9F:DB:42:2B:6B	Sandrii Cameras	Sandrii-Ap	802.11n airMAX	NONE	-78 / -104	5.825 / 165
<input type="radio"/> 24:A4:3C:AC:A5:C9	Ebert_CentroC	Rocket M5	802.11n airMAX	NONE	-84 / -96	5.5 / 100
<input type="radio"/> 24:A4:3C:AC:7F:83	FH_CP	Painel 01 - It	802.11n airMAX	NONE	-87 / -98	5.5 / 100
<input type="radio"/> 24:A4:3C:32:70:39	PTP_Estacao	Ptp Deda_ap	802.11n airMAX	NONE	-76 / -96	5.515 / 103
<input type="radio"/> DC:9F:DB:8E:D8:5D	Ebert_Maico3		802.11n airMAX	NONE	-82 / -96	5.61 / 122
<input type="radio"/> 44:D9:E7:BE:6C:7F	Ptp_Ebert_chacara	Ptp_chacara_Si	802.11a airMAX	NONE	-92 / -96	5.62 / 124
<input type="radio"/> 58:10:8C:6E:BA:96	bitcom_ptp_hospital_madruga		802.11n	WPA2	-52 / -101	5.64 / 128
<input type="radio"/> F0:9F:C2:52:CB:BE	Ptp_Kymerly	Kimberly_Ashla	802.11n airMAX	NONE	-63 / -102	5.66 / 132
<input type="radio"/> 04:18:D6:08:6F:A3	PTP_Ebert_Encruzilhada_MBatista	ptp Encruzilh	802.11a airMAX	NONE	-77 / -96	5.675 / 135
<input type="radio"/> DC:9F:DB:46:94:81	UltraNet_CorreiaPinto58_2	CorreiaPinto58	802.11n airMAX	NONE	-53 / -103	5.7 / 140
<input type="radio"/> 24:A4:3C:6A:71:DC	UltraNet_DonaMaria58_2	DonaMaria58_2	802.11n airMAX	NONE	-88 / -103	5.7 / 140
<input type="radio"/> 04:18:D6:98:C9:21	Ebert_hospitalD5.8	Rocket M5	802.11n airMAX	NONE	-74 / -96	5.745 / 149
<input type="radio"/> 44:D9:E7:68:1C:E3	Ebert_Sao_Joao_ap_Centro	Sao Joao Centr	802.11a airMAX	NONE	-78 / -96	5.745 / 149
<input type="radio"/> DC:9F:DB:7C:27:04	bitwls_ptp_elias_canoas		802.11n airMAX	NONE	-72 / -102	5.745 / 149
<input type="radio"/> 00:27:22:16:25:FC	Ebert_hospitalP2	Ebert hospital	802.11n airMAX	NONE	-71 / -96	5.765 / 153
<input type="radio"/> 04:18:D6:88:8E:FE	Ebert_Sao_Joao_ap_Centro1	Rocket M5	802.11n airMAX	NONE	-78 / -96	5.77 / 154
<input type="radio"/> 58:10:8C:05:CF:20	bitwls_hospital_SO		802.11n	NONE	-60 / -104	5.785 / 157
<input type="radio"/> DC:9F:DB:92:9B:98	bitwls_hospital_58ghz	Rocket M5	802.11n	NONE	-60 / -104	5.805 / 161
<input type="radio"/> DC:9F:DB:3E:BB:BE	bitwls_elias_58GHz		802.11n	NONE	-56 / -104	5.805 / 161

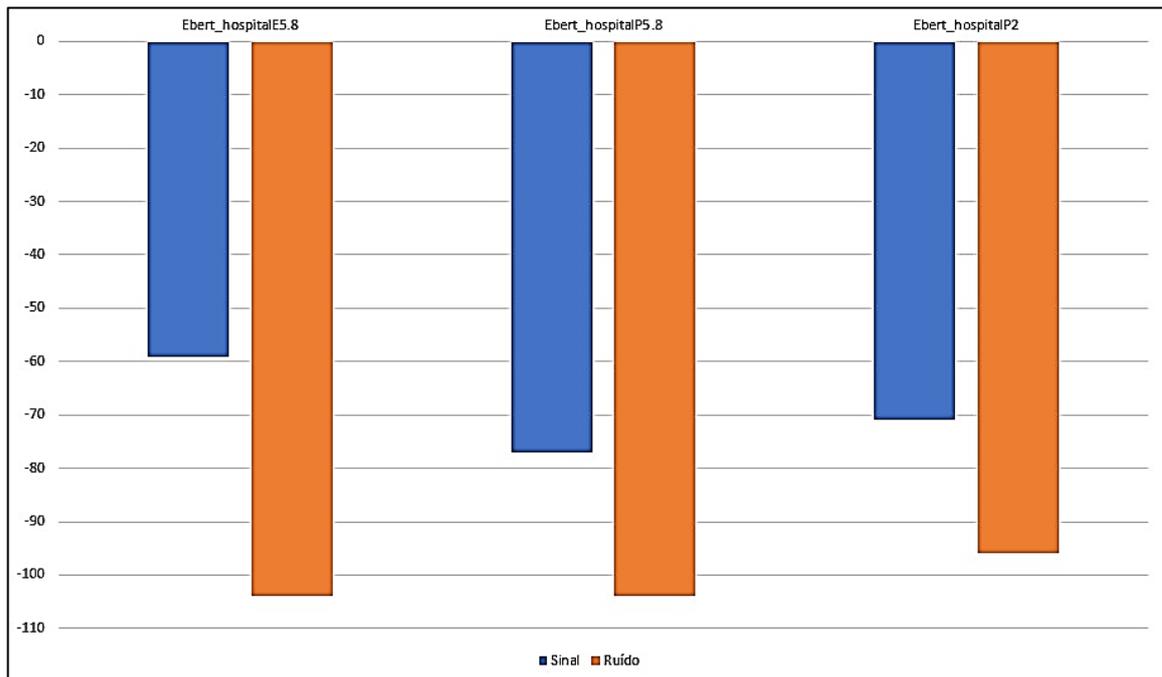
Os SSID selecionados devem ser visíveis e ter largura de banda de canal e definições de segurança compatíveis.

Fixar ao ponto de acesso Selecionar Rastrear

Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do sistema *airOS* (2019).

Dentre todos os dispositivos rastreados, identifica-se que três deles são pertencentes ao conjunto de transmissores definidos na Tabela 4. O que apresenta melhor sinal e menor sensibilidade ao ruído de acordo com o gráfico da Figura 79 é o ponto de acesso denominado Ebert_hospitalE5.8, que será utilizado nessa conexão.

Figura 79 – Potência do sinal e sensibilidade ao ruído.



Fonte: Autor (2019).

A potência e a qualidade do sinal obtido são indicadas na Figura 80.

Figura 80 – Informações da conectividade entre Receptora01 e Ebert_hospitalE5.8.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do sistema *airOS* (2019).

Verifica-se que o sinal recebido pela estação foi de -58 dBm, enquanto o ruído de fundo foi de -104 dBm e a qualidade do *airMAX* é de 82%. Diante desses valores e dos índices gráficos oferecidos pelo fabricante, define-se que o enlace tem um bom desempenho.

b) Receptora 03 – Ponto de acesso

Realizando o escaneamento na antena receptora 03, encontra-se os pontos de acesso exibidos na Figura 81.

Figura 81 – Pontos de acesso rastreados pela Receptora 03.

Inquérito do site

Frequências rastreadas:
 5.5GHz 5.505GHz 5.51GHz 5.515GHz 5.52GHz 5.525GHz 5.53GHz 5.535GHz 5.54GHz 5.545GHz 5.55GHz 5.555GHz 5.56GHz 5.565GHz 5.57GHz 5.575GHz 5.58GHz 5.585GHz 5.59GHz 5.595GHz 5.6GHz 5.605GHz 5.61GHz 5.615GHz 5.62GHz 5.625GHz 5.63GHz 5.635GHz 5.64GHz 5.645GHz 5.65GHz 5.655GHz 5.66GHz 5.665GHz 5.67GHz 5.675GHz 5.68GHz 5.685GHz 5.69GHz 5.695GHz 5.7GHz 5.745GHz 5.75GHz 5.755GHz 5.76GHz 5.765GHz 5.77GHz 5.775GHz 5.78GHz 5.785GHz 5.79GHz 5.795GHz 5.8GHz 5.805GHz 5.81GHz 5.815GHz 5.82GHz 5.825GHz

Endereço MAC	SSID	Nome do dispositivo	Modo de rádio	Encriptação	Sinal / Ruído, dBm	Frequência, GHz / Canal
<input checked="" type="radio"/> DC:9F:DB:EC:FC:48	Ebert_hospitalSao_Pedro	NanoStation M5	802.11n airMAX	NONE	-64 / -99	5.52 / 104
<input type="radio"/> 44:D9:E7:BE:6C:7F	Ptp_Ebert_chacara	Ptp_chacara_Si	802.11a airMAX	NONE	-89 / -96	5.62 / 124
<input type="radio"/> 58:10:8C:6E:BA:96	bitcom_ptp_hospital_madruga		802.11n	WPA2	-84 / -102	5.64 / 128
<input type="radio"/> F0:9F:C2:52:CB:BE	Ptp_Kymerly	Kimberly_Ashla	802.11n airMAX	NONE	-75 / -103	5.66 / 132
<input type="radio"/> 04:18:D6:08:6F:A3	PTP_Ebert_Encruzilhada_MBatista	ptp Encruzilh	802.11a airMAX	NONE	-70 / -96	5.7 / 140
<input type="radio"/> DC:9F:DB:46:94:81	UltraNet_CorreiaPinto58_2	CorreiaPinto58	802.11n airMAX	NONE	-67 / -103	5.7 / 140
<input checked="" type="radio"/> F0:9F:C2:E0:66:51	Ebert_hospitalE3	Rocket M5	802.11n airMAX	NONE	-83 / -96	5.745 / 149
<input checked="" type="radio"/> 00:27:22:16:25:FC	Ebert_hospitalP2	Ebert hospital	802.11n airMAX	NONE	-72 / -96	5.765 / 153
<input type="radio"/> 58:10:8C:05:CF:20	bitwls_hospital_SO		802.11n	NONE	-83 / -104	5.785 / 157
<input type="radio"/> DC:9F:DB:92:9B:98	bitwls_hospital_58ghz	Rocket M5	802.11n	NONE	-55 / -104	5.805 / 161
<input checked="" type="radio"/> 44:D9:E7:64:23:D7	Ebert_hospitalE5.8	Ap_Hospital_E	802.11n airMAX	NONE	-75 / -96	5.825 / 165
<input checked="" type="radio"/> 80:2A:A8:2E:3F:0C	Ebert_hospitalP5.8	Ap_Hospital	802.11n airMAX	NONE	-64 / -96	5.825 / 165

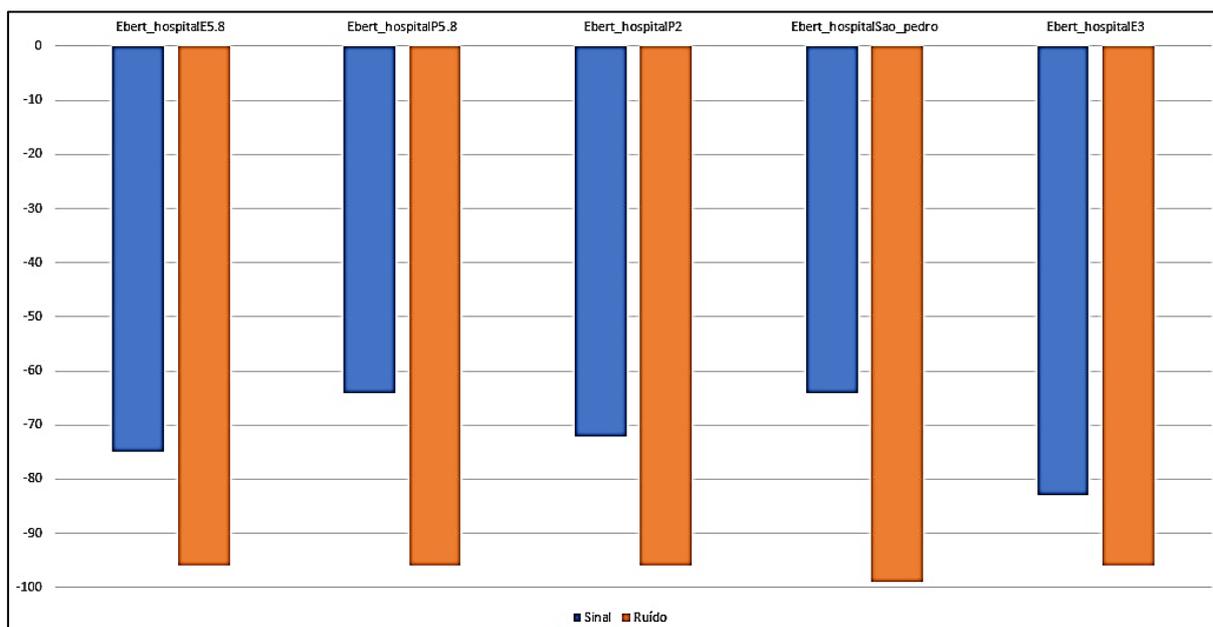
Os SSID selecionados devem ser visíveis e ter largura de banda de canal e definições de segurança compatíveis.

Fixar ao ponto de acesso Selecionar Rastrear

Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do sistema *airOS* (2019).

Dentre todos os dispositivos rastreados, identifica-se que cinco deles são pertencentes ao conjunto de transmissores definidos na Tabela 4. De acordo com o gráfico da Figura 82, os que apresentam melhor sinal é o Ebert_hospitalSao_Pedro e o Ebert_hospitalP5.8. Devido ao ponto de acesso Ebert_hospitalSao_Pedro apresentar menor sensibilidade ao ruído, o mesmo é escolhido.

Figura 82 – Potência do sinal e sensibilidade ao ruído.



Fonte: Autor (2019).

A potência e a qualidade do sinal obtido são indicadas na Figura 83.

Figura 83 – Informações da conectividade entre Receptora03 e Ebert_hospitalSao_Pedro.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do sistema *airOS* (2019).

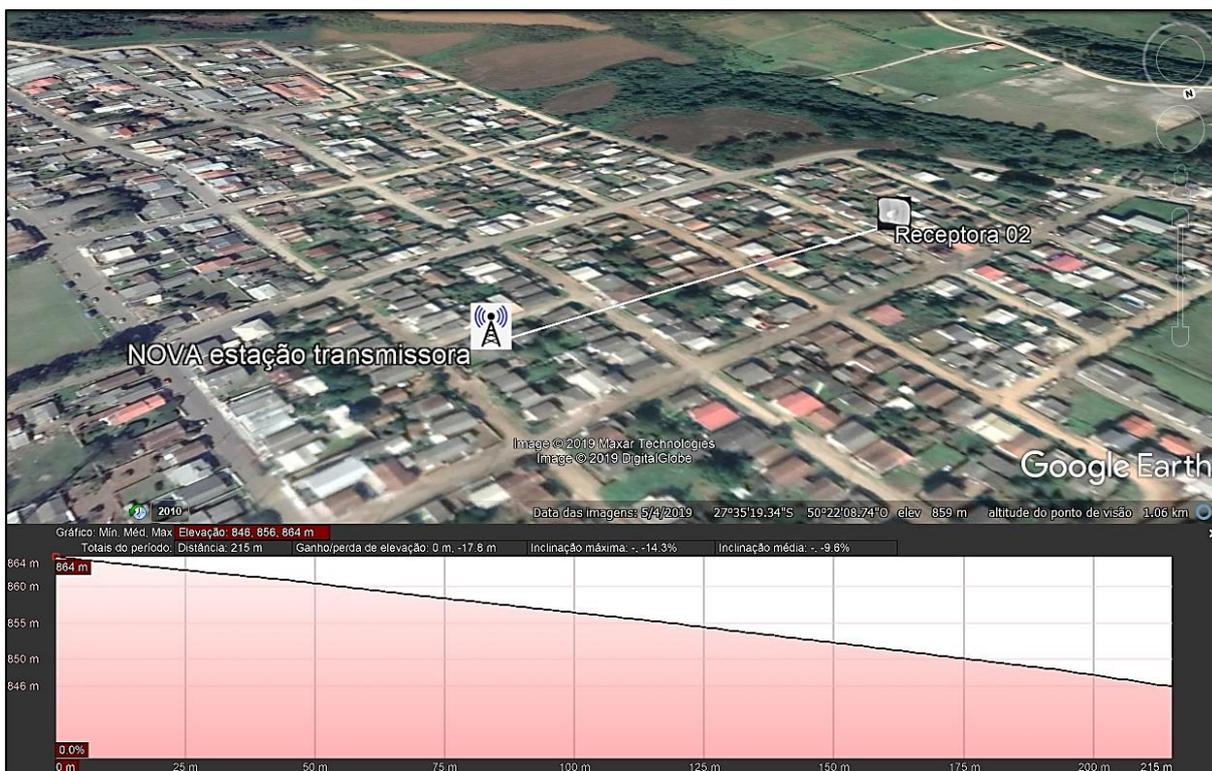
Verifica-se que o sinal recebido pela estação foi de -65 dBm, enquanto o ruído de fundo foi de -99 dBm e a qualidade do *airMAX* é de 72%. Diante desses valores e dos índices gráficos oferecidos pelo fabricante, pode-se definir que o enlace tem um desempenho satisfatório. Nesse caso, é possível melhorar a qualidade do sinal reduzindo o valor de amplitude de canal, fazendo com que o enlace seja mais eficiente.

c) Receptora 02 – Ponto de acesso

Nesse último caso, em que não houve viabilidade no enlace, e que o sistema depende de uma linha de visada direta para que a comunicação sem fio ocorra, propõe-se a instalação de uma central transmissora que atenda a área bloqueada pela zona de Fresnel.

Para tal fim, realizou-se uma análise do perfil de elevação em múltiplas áreas da cidade e determinou-se que o melhor ponto para implantação de uma nova transmissora é mostrado na Figura 84.

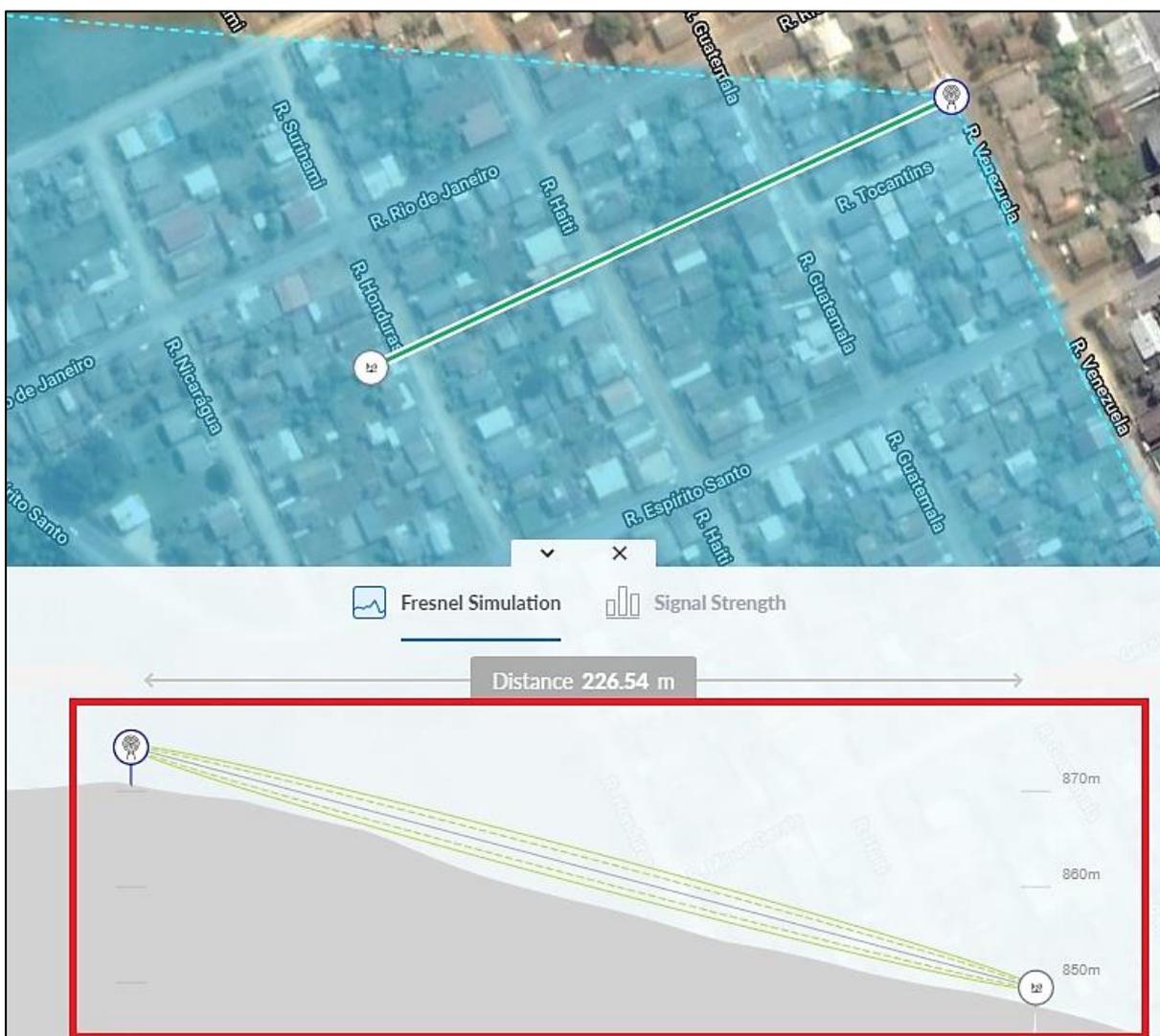
Figura 84 – Nova estação transmissora.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através do *software Google Earth PRO (2019)*.

Realizando a verificação da zona de Fresnel, apresentada na Figura 85, tem-se:

Figura 85 – Zona de Fresnel entre a antena receptora 02 e a nova central de transmissão.



Fonte: Captura de tela obtida pelo autor através da ferramenta *airLink* (2019).

Assim, não somente a Receptora 02 será atendida, mas todas as receptoras que estiverem abaixo daquela região também serão.

4.4 Considerações finais

Através das ferramentas apresentadas e do conhecimento adquirido nesse estudo, é possível manifestar algumas recomendações que permitirão melhorar o desempenho de um enlace de radiofrequência:

- Troca do canal de frequências, quando o mesmo estiver com muita interferência;
- Aumentar o ganho do transmissor através da substituição do refletor, maximizando o alcance e reduzindo o desvanecimento;
- Instalação de uma estação transmissora intermediária para contornar as zonas de Fresnel

obstruídas;

- Utilização de receptores que suportem o modelo o modelo de cadeias de transmissão 2x2, melhorando as cadeias de transmissão de dados.

5 CONCLUSÃO

Os enlaces de radiofrequência para transmissão de internet via rádio ainda são muito utilizados devido a sua característica principal de utilizar o espaço físico para propagação do sinal da informação através de ondas eletromagnéticas. Essa propriedade é barata e eficaz, comparada a outros modelos, e apresenta-se como uma solução para atender principalmente áreas longínquas, que outros meios encontrariam dificuldades para alcançar, como por exemplo a fibra óptica, o que elevaria substancialmente o custo do enlace.

Frente à esta asserção, o estudo desse trabalho atentou para o desenvolvimento das concepções que abrangem esse tema, possibilitando a compressão dos assuntos relacionados à degradação, à melhoria da qualidade do sinal de radiofrequência, e ao emprego de técnicas de transmissão e recepção que tornam a confiabilidade da informação mais efetiva.

Observou-se na abordagem do princípio de funcionamento das antenas, linhas de transmissão, moduladores e receptores, as características que cada modelo apresentado oferece, e como pode ser adotada nas diferentes necessidades de um enlace.

Através do estudo de caso foi possível explorar um sistema de comunicação já existente e compreender na prática seu funcionamento, extrair informações do mesmo e propor melhorias com base nos conceitos explanados, de modo a aperfeiçoar a qualidade do sinal entregue aos usuários finais, possibilitando a melhoria do sinal transmitido, a diminuição da sensibilidade ao ruído nas antenas receptoras, a escolha de regiões com melhor viabilidade para o enlace, além de propiciar a minimização das degradações causadas por fatores naturais e artificiais.

6 BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, Claudio de. **Cabeamento - parte 4**. 2016. Disponível em: <<http://www.institutocftv.com.br/cabeamento---4---cabos-utp.html>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. **Atribuição de faixas de frequências no Brasil**. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=314474&assuntoPublicacao=null&caminhoRel=null&filtro=1&documentPath=314474.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2019.

BERNARDES, Luana (Ed.). **Ionosfera**. Disponível em: <<https://www.todoestudo.com.br/geografia/ionosfera>>. Acesso em: 30 jun. 2019.

BLACK B. A. *et al.* **Introduction to wireless systems**. 1. ed. USA: Prentice Hall, 2008.

BLOGSPOT. **Guia prático para TSS RF e TX: Identificando antenas**. 2013. Disponível em: <<http://wilsonub.blogspot.com/2013/08/identificando-antenas.html>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

BRAGA, Newton C. **Curso de Eletrônica: Telecom 1 - Radiocomunicações**. São Paulo: Instituto NCB, 2012. 207 p.

BRASIL. Altineu Pires Miguens. Marinha do Brasil. **Navegação: A ciência e a arte**. Niterói: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 1996. 3 v. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/npublicacoes>>. Acesso em: 09 maio 2019.

CARVALHO, Álvaro Gomes de; BADINHAN, Luiz Fernando da Costa. **Eletrônica: Telecomunicações**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011. 280 p. (5).

CÉSAR, Amílcar Careli. **Propagação: Zona de Fresnel**. São Carlos: USP, 2014. 19 slides, color. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4419593/mod_folder/content/0/Sel371%20Zona%20de%20Fresnel.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 25 jun. 2019.

FAGUNDES, Eduardo. **Tipos de modulação (I)**. Disponível em: <<https://efagundes.com/networking/sistema-telefonico/tipos-de-modulacao-i/>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

FRENZEL, Louis E. **Fundamentos de comunicação eletrônica: Linhas, micro-ondas e antenas**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2013.

GOMES, Alcides Tadeu. **Telecomunicações: Transmissão e recepção AM-FM: Sistemas pulsados**. 21. ed. São Paulo: Érica, 2007. 420p.

HAYKIN, Simon. **Fundamentos de comunicação eletrônica: Linhas, micro-ondas e antenas**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 242 p.

HAYKIN, Simon; Moher, Michael. **Introdução aos sistemas de comunicação**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008. 514 p.

HAYKIN, Simon. **Sistemas de Comunicação: Analógicos e Digitais**. 4. ed. São Paulo: Bookman, 2004. 837 p.

ITU (International Telecommunication Union). **Radio Regulations: Articles**. Genebra: ITU, 2016. 431 p. Disponível em: <<https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/pages/publications.aspx?parent=R-REG-RR-2016&media=electronic>>. Acesso em: 15 maio 2019.

LOUREIRO, Eduardo Pacheco. **A física aplicada na transmissão e recepção por ondas de rádio**. 2005. 54 f. TCC (Graduação) – Curso de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MARTINS, Ramon Mayor. **ANT – Antenas e Propagação**. São José: IFSC, 2016. 47 slides, color.

MEDEIROS, Júlio Cesar de Oliveira. **Princípios de Telecomunicações: Teoria e Prática**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2007. 321 p.

MIYOSHI, E.; SANCHES, C. A. **Projetos de Sistemas de Rádio**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2010.

NASCIMENTO, Juarez do. **Telecomunicações**. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 2000. 348 p.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de.; KWON, Byung Hyuk; Jefferson Francisco de. **A Ocorrência de Dutos Atmosféricos em Ambiente Costeiro**. *Physicae*, Maceió, v. 5, n. 5, p.23-32, 1 jan. 2005. Disponível em: <<https://physicae.ifi.unicamp.br/index.php/physicae/article/view/physicae.5.4>>. Acesso em: 29 maio 2019.

PIAU, Diego de Brito; CARRIJO, Gilberto Arantes. **Projeto de Dimensionamento de Enlace de Rádio**. *Ciência & Engenharia*. [s. L.], p. 81-90. dez. 2014. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/27371/16559>>. Acesso em: 23 abr. 2019.

PIAU, Diego de Brito. **Projeto de dimensionamento de enlace de rádio associado a atenuações devido à chuva utilizando CELPLAN e PATHLOSS**. 2013. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

RAPIDTABLES. **Decibel-Watt (dBW)**. Disponível em: <<https://www.rapidtables.com/electric/dBW.html>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

RIBEIRO, Filipe T. S. **Wimax: Estudo e Simulação da Camada Física do Padrão IEEE 802.16d**. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwimaxiee802/pagina_2.asp>. Acesso em: 19 jun. 2019.

SANTOS, Rogério Vogt Cardoso dos. **Geração, Emissão, Propagação e Recepção de Ondas Eletromagnéticas**. 78 f. Manual. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SILVA, Gilberto; BARRADAS, O. **Telecomunicações: Sistemas Radiovisibilidade**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos S.A., 1978.

SOUTO, Ana Lúcia. **O espectro eletromagnético.** Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/9-ano/materia-e-energia-9-ano/ondas-eletromagneticas/a/o-espectro-eletromagnetico>>. Acesso em: 15 maio 2019.

STROSKI, Pedro Ney. **O que são guias de onda?.** 2018. Disponível em: <<http://www.electricalibrary.com/2018/07/20/o-que-sao-guias-de-onda/>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

TANENBAUM, Andrew S.; WETHERALL, David J. **Computer Networks.** 5. ed. [s. L.]: Pearson, 2011. 938 p.

UBIQUITI. **Datasheet.** Disponível em: <<https://www.ui.com/download/airmax>>. Acesso em: 27 jun. 2019.