

GIULIANO CASA TAMAROZI

Estudo Sobre a Viabilidade de Projetos de Comunicações de Dados ou Voz

Guaratinguetá - SP
2016

GIULIANO CASA TAMAROZI

Estudo Sobre a Viabilidade de Projetos de Comunicações de Dados ou Voz

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Guaratinguetá - SP
2016

T153e

Tamarozi, Giuliano Casa

Estudo sobre a viabilidade de projetos de comunicações de dados ou voz /
Giuliano Casa Tamarozi. – Guaratinguetá, 2016.

96 f : il.

Bibliografia: f. 94-95

Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

1. Linhas de telecomunicação 2. Fibras óticas 3. Estações terrestres
(Telecomunicação por satélite) I. Título

CDU 621.372.2

GIULIANO CASA TAMAROZI


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTÔNIO LOTUFO
UNESP-FEG


Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP-FEG

NOVEMBRO de 2016

Dedico a todos os alunos da faculdade de engenharia, docentes e colaboradores que tornaram possível a uma universidade, formar por gerações, grandes profissionais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas de classe pelo apoio prestado nos períodos de alegrias e tristezas das quais passamos enquanto buscávamos conhecimento e oportunidades para nossas formações acadêmicas.

Agradeço também aos meus professores do departamento de Engenharia Elétrica, por me transmitirem seus conhecimentos, sempre prestativos e com afeição única.

Agradeço em especial ao professor José Feliciano pela paciência e conselhos prestados na orientação para que fosse acadêmica como profissional.

Obrigado a todos.

RESUMO

É difícil imaginar o mundo contemporâneo sem as facilidades providas pelas telecomunicações. Estas são de fato, as bases tecnológicas das sociedades modernas já que se tratam de meios de comunicação em massa, extremamente ágeis, de grande abrangência e, conseqüentemente, intrínsecos aos mercados de capitais globalizados. Tornar a informação e uso das telecomunicações disponíveis é um desafio permanente para sociedades preocupadas tanto com o desenvolvimento social, quanto urbano. Este é o enfoque deste trabalho. No Brasil, conforme a tecnologia de telecomunicações se desenvolveu, foi evidenciado que o desafio de oferecer um serviço de qualidade para os cidadãos é um fardo muito grande para apenas uma empresa de porte nacional carregar e, como consequência, a tecnologia e a qualidade dos serviços no país foram afetados durante décadas. Para aliviar esta pressão sobre a sociedade e aumentar a qualidade de serviços prestados, o Estado passou a atuar apenas como órgão regulador, enquanto, empresas locais, regionais ou macrorregionais surgiram para preencher o defasamento tecnológico deixado pelo governo. Este trabalho tem como foco as pequenas empresas ou indivíduos que almejam investir na expansão da rede de transmissão de informações sem depender de empresas já consolidadas de grande porte ou concessionárias. Uma introdução é realizada sobre assuntos básicos na construção de redes e enlaces para transmissão de informação e uma estimativa inicial dos mesmos. Esta estimativa deve ser considerada inicial devido a inúmeras simplificações a que o projeto em um primeiro momento exige, como por exemplo, o perfil topográfico somado às construções preexistentes nas localizações estudadas. Esta simplificação visa facilitar o entendimento de assuntos básicos sobre o tema, enfatizando o que foi julgado essencial. De tal forma, após a estimativa inicial sobre escolha de localidades e tecnologias é necessário um estudo mais profundo e completo para confrontar a premissa original e efetivamente executar o projeto. Para realizar este estudo, uma pesquisa com fornecedores de serviços de base para a construção de estimativas mais próximas do mundo real e atualizadas foram realizadas. Os valores encontrados foram concatenados com os valores técnicos de projeto para resultarem em uma resposta numérica de fácil comparação com base no ano de 2015. As tecnologias utilizadas para os cálculos foram: enlaces de rádio, Satélites e Fibras óticas. A metodologia de projeto foi baseada em ensaios didáticos sobre as tecnologias, carecendo assim, em um primeiro momento de base numérica de valores monetários, completada posteriormente. O trabalho resultante fornece uma ferramenta de consulta para a tomada de decisão quanto ao investimento inicial de um projeto de telecomunicações em duas frentes de estudo, sendo estas, técnica e financeira.

PALAVRAS-CHAVE: Viabilidade. Telecomunicações. Rádio. Fibra. Satélite.

ABSTRACT

It is hard to imagine the modern world without the facilities provided by telecommunications. These are the technological basis of modern societies as it's possible to define them as mass communications, really fast and essential to the globalized world market. Making information and use of telecommunications available is an ongoing challenge for companies concerned with both social and urban development, which is the basis of this work. In Brazil, as the telecommunications technology had been developing, it was evident that the challenge of providing a quality service for citizens was a burden too heavy for just one nation-sized enterprise; therefore, the technology and quality of services were hold for decades in comparison to other parts of the world. To answer this call of society and increase the quality of services, the state began to act only as a regulator, while local, regional and macro-regional companies emerged to fill the technological blank and backward technology left by the government.

This work focuses on small businesses or individuals who aim to invest in the expansion of information transmission network without relying on companies already consolidated in the market. An introduction is written about basic issues in building networks and links for transmitting information and an initial evaluation of them. This evaluation should be considered the first step to the project due to numerous simplifications in the calculations. This simplification aims to ease the understanding of basic issues on the subject, emphasizing what was deemed essential. So, after the initial valuation of locations and technologies, a deeper study is needed to confront the original premise and effectively run the project.

The values were combined with the project technical data to result in a numeric easy comparison of values, based on the year 2015. The final work provides a reference tool for decision making on the initial investment phase of a telecommunications.

KEYWORDS: Feasibility. Telecommunications. Radio. Fiber.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de uma onda eletromagnética.....	13
Figura 2 - Banda e Largura de Banda.....	18
Figura 3 - Sinal digital binário, ternário e quaternário.....	19
Figura 4 - Cabo F/UTP (blindagem em folha) com 4 pares.....	22
Figura 5 - Cabo F/UTP (blindagem em folha) com 4 pares.....	22
Figura 6 - OPGW.....	24
Figura 7 - Perfil de elevação São Paulo - Campinas.....	32
Figura 8 - Representação da correção K.....	35
Figura 9 - Representação de Área, Elipsoide e Raio de Fresnel.....	37
Figura 10 - Calculo da altura das antenas.....	39
Figura 11 - Ângulo de elevação e Azimute da estação da antena em solo.....	43
Figura 12 - Triângulo para cálculo de elevação.....	44
Figura 13 - Ângulo de cobertura e faixa de inclinação.....	45
Figura 14 - Rádio enlace básico geostacionário.....	49
Figura 15 - Geometria para cálculo de atenuação por chuva em rádio enlaces.....	50
Figura 16 - Corte transversal e longitudinal de fibra ótica.....	53
Figura 17 - Índice e Lei de refração.....	54
Figura 18 - Angulo critico.....	55
Figura 19 - Fibra Multimodo Índice Degrau.....	56
Figura 20 - Fibra multimodo gradual.....	57
Figura 21 - Fibra ótica monomodo.....	57
Figura 22 - Angulo de aceitação.....	59
Figura 23 - Exemplo fibras óticas com repetidores.....	60
Figura 24 - Comprimento de onda ótica por bandas.....	63
Figura 25 - Descrição de bandas óticas.....	63
Figura 26 - EDFA.....	64
Figura 27 - Ganho e absorção do érbio.....	64
Figura 28 - Espectro de ganho SOA.....	66
Figura 29 - Representação gráfica de um sistema de Fibra Ótica com amplificadores.....	67
Figura 30 - WDM.....	69
Figura 31 - Dispersão por meio de prisma.....	71
Figura 32 - Link Bragança Paulista.....	72
Figura 33 - Topografia Link Bragança Paulista.....	73
Figura 34 - Topografia Link Bragança Paulista e Valores.....	74
Figura 35 - Altura da torre x Valor de instalação.....	75
Figura 36 - Distribuição de resíduos.....	76
Figura 37 - Perfil do enlace.....	81
Figura 38 - Modelo de um sistema AOF.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão de espectro eletromagnético.....	14
Tabela 2 - Meios de Transmissão e respectivos valores de banda passante.	17
Tabela 3 - Banda Passante dos sinais digitais	18
Tabela 4 - Relação de valores em dB com potência.	28
Tabela 5 - Critérios para o raio de Fresnel.	36
Tabela 6 - Valores Limites de cobertura e distância.....	47
Tabela 7 - Valores aproximados de atenuação específica (vapor de água + ar seco) em dB/km.....	52
Tabela 8 - Comparação entre CWDM e DWDM.....	70
Tabela 9 - Dados do Projeto	74
Tabela 10 - Custo de instalação x altura da torre	77
Tabela 11 - Características finais do enlace – Obstáculo A.....	79
Tabela 12 - Características finais do enlace – Obstáculo B.....	79
Tabela 13 - Altura da Antena (Obstáculo A + B).....	80
Tabela 14 - Altura das Antenas (A+B) e seu Custo Total de implantação	81
Tabela 15 - Comparação de Valores:.....	82
Tabela 16 - EP105 FLEXWELL	83
Tabela 17 - Valor do projeto de Rádio Enlace.	84
Tabela 18 - Requisitos do projeto de fibra ótica.....	89
Tabela 19 - Resumo de custos fibra ótica	91

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVO	11
1.2	MOTIVAÇÃO	11
2	TEORIA GERAL	13
2.1	FAIXAS DE FREQUENCIA	13
2.2	FREQUÊNCIAS E SUAS APLICAÇÕES	15
2.3	BANDA PASSANTE OU LARGURA DE FAIXA	16
2.4	CAPACIDADE DO SISTEMA (SHANNON-HARTLEY).....	19
2.5	TAXA DE TRANSMISSÃO	20
2.6	CANAL DE TRANSMISSÃO E MEIO DE TRANSMISSÃO	20
2.7	CABOS METÁLICOS E FIBRAS.....	21
2.8	CABOS COAXIAIS	21
2.9	CABOS DE PAR TRANÇADO.....	22
2.10	FIBRAS ÓTICAS	23
2.11	TIPOS DE SERVIÇO EM TELECOMUNICAÇÕES – SEGUNDO LEI GERAL DE TELECOMUNICAÇÕES E HISTÓRIA NO BRASIL.....	24
2.11.1	Classificação.....	25
3	TIPOS DE TRANSMISSÃO	27
3.1	RÁDIO	27
3.1.1	Potência de Transmissão	27
3.1.2	Atenuação e interferência	29
3.1.3	Uso do software	30
3.1.4	Projeto de rádio enlace	30
3.1.5	Enlace e seu perfil	31
3.1.6	Modelos climáticos	32
3.1.7	Critérios de visibilidade	33
3.1.8	Raio de Fresnel e elipsoide.....	35
3.1.9	Atenuação em Espaço Livre	37
3.1.10	Desvanecimento e Reflexão.....	38
3.1.11	Cálculo da altura das antenas.....	38
3.1.13	Potência de transmissão, recepção e atenuação total líquida	40
3.2	RÁDIO ENLACES POR SATÉLITE	42
3.2.1	O Enlace	42
3.2.2	Geometria da Órbita Geoestacionária	42
3.2.3	Ângulo de Azimute e Elevação	43
3.2.4	Limites de Cobertura.....	45
3.2.5	Distância Entre um Satélite e um Ponto em Solo.....	46
3.2.6	Potência Irrradiada de Descida.....	47
3.2.7	Potência Irrradiada de Subida	48
3.2.8	Análise de Desempenho de Rádio Enlaces	48
3.2.9	Atenuação em Radioenlaces por Satélites	50
3.2.10	Atenuação em Razão dos Gases Atmosféricos	52
3.3	FIBRAS ÓTICAS	53
3.3.1	Índice de Refração	53
3.3.2	Lei de refração	54
3.3.3	Ângulo crítico	54
3.3.4	Tipos de fibras óticas	55

3.3.4.1	Multimodo de Índice Degrau	55
3.3.4.2	Multimodo de Índice Gradual	56
3.3.4.3	Fibras Monomodo.....	57
3.3.5	Conceitos Para Projeto de Enlace Óptico	58
3.3.6	Acoplamento de Fonte Luminosa	58
3.3.7	Dimensionamento.....	60
3.3.8	Espalhamento de Brillouim	61
3.3.9	Amplificadores	62
3.3.10	Amplificadores Óticos.....	62
3.3.10.1	<i>Optical Fibre Amplifier (OFA)</i>	63
3.3.10.2	<i>Optical Wave Guide Amplifier (OWGA).....</i>	65
3.3.11	Amplificadores no Sistema Ótico	66
3.3.12	Sistema WDM	68
3.3.13	Dispersão	70
4	PROJETO	72
4.1	PREMISSAS PARA O PROJETO DE RÁDIO ENLACE.....	72
4.1.1	Localidades.....	72
4.2	RADIO ENLACE	74
4.2.1	Altura da Torre	75
4.2.2	Cálculo Enlace.....	77
4.2.3	Limites de Potência e Transferência De Dados.....	82
4.3	RADIO ENLACE EM SATÉLITE	85
4.4	FIBRA ÓTICA	88
4.4.1	Cálculo Por Atenuação	89
4.4.2	Cálculo por Dispersão.....	91
5	CONCLUSÃO.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93
	APÊNDICE A – AMPLIFICADORES ÓTICOS	95

1. INTRODUÇÃO

Inicialmente é apresentado uma breve história sobre tecnologias referentes a transmissão de dados utilizando como meio de transmissão fibras óticas, Rádio Enlace e Satélite, assim como uma descrição de suas principais características teóricas e citação das principais normas e recomendações de âmbito internacional e nacional.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um estudo inicial sobre a possibilidade de implementação de sistemas de comunicação por empresas de pequeno porte ou cidadãos.

A metodologia simplifica diversos elementos de forma a focar primeiramente na viabilidade de projeto. O trabalho de implantação, propriamente dito, exige um desenvolvimento mais aprofundado sobre os elementos abordados, de forma a realizar um ajuste fino sobre os resultados obtidos.

Encontrar exemplos didáticos sobre como iniciar um projeto de comunicações, com análises iniciais, que incluam valores de construção e metodologias para encontra-los não é comum. Seja pelo motivo de simplificações constantes de modelo ou pelo fato da dificuldade de concorrer com concessionárias já estabelecidas, os projetos tendem a ficarem restritos a segmentos específicos e não ao estudo de qualquer interessado.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como intuito apresentar a teoria básica necessária para uma análise do uso de uma tecnologia de telecomunicação para a transferência de dados, sob a perspectiva financeira e técnica, em detrimento de outras.

1.2 MOTIVAÇÃO

Para a execução de qualquer tipo de projeto é recomendável que seja realizado estudos que possam prever ou anteceder o êxito ou fracasso do mesmo. Assim torna-se fundamental o ato de avaliar o valor de um eventual projeto e seu respectivo impacto sobre a empresa. A implantação de um objetivo que requeira investimento implica em uma profunda análise de mercado, de produto e o detalhamento de um plano de negócios robusto que atenda a posição atual da empresa no mercado, cabendo ainda uma análise nomeadamente dos pontos fortes e

pontos fracos da empresa, ameaças e oportunidades, assim como um claro diagnóstico dos recursos disponíveis. De mesmo modo, a aplicação de uma tecnologia requer total atenção em sua escolha. Este material pretende oferecer uma básica referência no momento desta escolha.

2 TEORIA GERAL

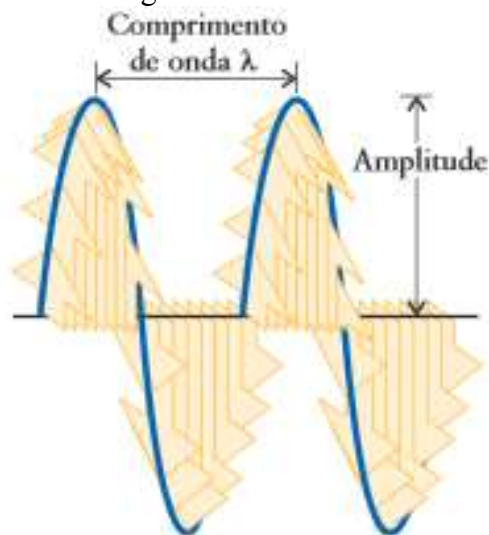
Neste item são descritas as características intrínsecas as tecnologias atualmente utilizadas. Para o estudo de transmissão de informações a distância o conhecimento de alguns conceitos se faz necessário. Alguns destes conceitos são a frequência, a largura de banda, a taxa de transmissão e a rede de transmissão, necessários para qualquer estudo e, portanto, julgados capitais para início de um projeto.

2.1 FAIXAS DE FREQUENCIA

As ondas de rádio pertencem ao grupo das ondas eletromagnéticas. Um feixe de radiação eletromagnética é uma composição de campos elétricos e magnéticos.

Uma fotografia instantânea de uma onda eletromagnética que viaja pelo espaço é semelhante à Figura 1. A onda se caracteriza pela amplitude e pelo comprimento de onda. A amplitude é a altura da onda em relação à linha central. O quadrado da amplitude determina a intensidade, ou brilho, da radiação. O comprimento de onda, λ (a letra grega *lambda*), é a distância entre dois máximos sucessivos” (ATKINS,1999).

Figura 1 - Exemplo de uma onda eletromagnética.



Fonte: (ATKINS,1999).

Os diferentes comprimentos de onda correspondem a regiões distintas do espectro eletromagnético e suas definições de limites (faixa de frequência e comprimento de onda) podem ser diferentes dependendo da aplicação que se é dada, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Divisão de espectro eletromagnético.

DENOMINAÇÃO	OBSERVAÇÃO	FAIXA DE FREQUÊNCIA (HZ)	COMPRIMENTO DE ONDA (M)
ULF	FREQUÊNCIA ULTRA BAIXA (ONDA HECTOQUILOMETRICA)	$3.10^2 \sim 3.10^3$	$>10^5$
VLF	FREQUÊNCIA MUITO BAIXA (ONDA MIRIAMETRICA) – ONDAS MUITO LONGAS	$3.10^3 \sim 3.10^4$	$10^5 \sim 10^4$
LF	FREQUÊNCIA BAIXA (QUILOMÉTRICA) – ONDAS LONGAS	$3.10^4 \sim 3.10^5$	$10^4 \sim 10^3$
MF	FREQUÊNCIA MEDIA(HECTOMETRICA) – ONDAS MEDIAS	$3.10^5 \sim 3.10^6$	$10^3 \sim 10^2$
HF	FREQUÊNCIA ALTA (DECAMÉTRICA) – ONDAS CURTAS	$3.10^6 \sim 3.10^7$	$10^2 \sim 10$
VHF	FREQUÊNCIA MUITO ALTA (MÉTRICA) – ONDAS MUITO CURTAS	$3.10^7 \sim 3.10^8$	$10 \sim 1$
UHF	FREQUÊNCIA ULTRA ALTA (DECIMETRICA) – MICROONDAS	$3.10^8 \sim 3.10^9$	$1 \sim 10^{-1}$
SHF	FREQUÊNCIA SUPER ALTA (CENTIMETRICA) – MICROONDAS	$3.10^9 \sim 3.10^{10}$	$10^{-1} \sim 10^{-2}$
EHF	FREQUÊNCIA EXTREMAMENTE ALTA (MILIMÉTRICA)	$3.10^{10} \sim 3.10^{11}$	$10^{-2} \sim 10^{-3}$
RAIOS-T	RADIAÇÃO TERA HERTZ (AINDA POUCO EXPLORADA COMERCIALMENTE)	$3.10^{11} \sim 3.10^{12}$	$10^{-3} \sim 10^{-4}$
INFRAVERMELHO	COMUNICAÇÕES ÓTICAS	$3.10^{12} \sim 3,75.10^{14}$	$10^{-4} \sim 8.10^{-6}$
LUZ VISIVEL	-	$3,75.10^{14} \sim 7,90.10^{14}$	$8.10^{-6} \sim 38.10^{-8}$
ULTRAVIOLETA	-	$7,90.10^{14} \sim 22,5007.10^{16}$	$38.10^{-8} \sim 13,3.10^{-9}$

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

2.2 FREQUÊNCIAS E SUAS APLICAÇÕES

Sobre as características das faixas de frequência utilizadas para comunicações e suas utilidades:

FAIXA ULF - grande penetração no solo e observada em processos na magnetosfera terrestre. Usadas por militares entre a primeira e segunda guerra para comunicação através do solo. Atualmente é utilizada em redes de comunicação de submarinos e sismólogos que procuram encontrar relação entre picos de ondas nestas faixas e abalos sísmicos. Exige antenas de grandes dimensões devido ao seu comprimento de onda (>1000 km)

FAIXA ELF - Razoável penetração no solo e água. Aplicações em comunicação marinha ou em escavações. Assim como as ondas ULF, requerem altas potências e grandes diâmetros de antenas para transmissão. Tem largura de banda reduzida e permite apenas transmissão de informações codificadas em forma binária, como o código Morse.

FAIXA VLF - Utilizada para algumas aplicações práticas no uso de navegação, faixa militar e serviços governamentais. Devido a seu grande comprimento de onda consegue difratar ao redor de grandes obstáculos e propagar como ondas terrestres (seguindo a curvatura da terra). Outro mecanismo de propagação tem como base a reflexão ionosférica. A ionosfera produz pequena atenuação na onda refletida, no entanto, podendo ainda ser considerado um ótimo condutor.

FAIXAS LF - Devido ao fato de ter pouca atenuação e conseqüentemente atingir grandes distâncias, é utilizado em alguns países da Europa, Ásia e África para transmissão de sinais AM. É também aplicada na aviação, sistemas meteorológicos e antigo sistema LORAN (sendo substituído pela tecnologia de GPS)

MF - Muito utilizada em transmissões “*broadcast*” AM. Suas ondas difratam, desviando-se de colinas e pequenos obstáculos e conseguem acompanhar a curvatura da terra. Podem ser transmitidas também pelo método da reflexão ionosférica, conseguindo alcançar maiores distâncias. Durante a noite, em períodos de pouca atividade solar, a camada D da ionosfera pode diminuir, as ondas MF são, então refratadas pela camada F restante e atingem centenas de quilômetros. Fenômeno que as tornou utilizadas em estações rádio amadoras.

HF - Muito utilizada em transmissões a curtas distâncias, como *broadcasting* de rádio amadores, governo e faixa cidadão (PX). Como o processo de transmissão utilizando reflexão ionosférica também é possível, em um cenário ideal, a comunicação utilizando HF alcançar continentes. Em contrapartida, estas condições são raras e assim, limitam este tipo de transmissão a curtas distâncias em condições usuais.

VHF EM DIANTE - Ondas mais utilizadas em comunicações comerciais.

Nestas frequências, devido ao fato das ondas não atingirem o ângulo necessário para a reflexão considerável é utilizado a propagação por meio de feixes estreitos (concentrados) de energia por meio de antenas diretivas, que descrevem um caminho espacial direto. Em VHF e UHF características permitem transmissão de informações com enlaces parcialmente ou totalmente obstruídos, enquanto SHF e EHF devem, necessariamente, ter visibilidade direta entre os pontos de transmissão e recepção.

INFRAVERMELHO - Uma das primeiras tecnologias óticas de transmissão de informações. Encontrada atualmente em controle remotos, *dimmers*, entre outros. Um sinal digital codificado é enviado ao receptor por meio de controle de ON e OFF de envio de sinais infravermelhos, este sinal é recebido e decodificado. Sua transmissão é limitada pela distância (aproximadamente 10 metros) e pela necessidade de visada direta.

ULTRAVIOLETA - Estudam-se tecnologias baseadas em ultravioleta para transmissão de dados em alta velocidade para pequenas distâncias como forma de expandir o espectro eletromagnético e aumentar bandas para comunicações Wireless (muito utilizada atualmente). Ainda não se tornou comercialmente viável para grandes aplicações.

O matemático francês *Joseph Fourier* desenvolveu a ideia de que um conjunto de frequências pode representar uma informação. Sua teoria apresentava um sinal qualquer como uma soma de sinais com frequências, fases e amplitudes diferentes. Este conjunto de senóides, chamado de espectro de sinal, teve então sua representação conhecida como Teorema de Fourier. Com esta, é possível analisar a transmissão de um sinal por meio da transmissão de cada um de seus componentes senoidais, ou seja, para que o sinal recebido seja igual ao transmitido, nenhum dos componentes emitidos poderão ser alterados até a recepção. Desta forma, a frequência tornou-se o principal parâmetro que determina a característica de interação entre o meio de transmissão (ou canal) e o sinal transmitido.

2.3 BANDA PASSANTE OU LARGURA DE FAIXA

Matematicamente, em uma transmissão de informações, o sinal original é igual a uma soma de infinitas componentes (Teorema de Fourier), o que, em termos de implementação, seria praticamente impossível devido à quantidade de informação. Por isso, para cada aplicação é verificado o número mínimo de frequências que a representação satisfatória do sinal exige, de

tal forma que a transmissão da informação seja completa. Assim é definido o valor conhecido como banda-passante ou largura de banda. (MONTE, 2010)

Quando considerado o sistema de transmissão, o mesmo deverá possibilitar que todas as frequência possam ser transportadas entre a fonte e o destino, onde, finalmente, é efetuada a “recuperação” do sinal e obtenção da informação.

Desta forma, a banda passante do canal de transmissão deverá ser igual ou superior que a do próprio sinal que tráfegará no canal. Caso isto não seja verdade, a deformação do sinal pode causar uma recepção falha de tal forma que o sinal recebido seja irrecuperável. A Tabela 2 - Meios de Transmissão e respectivos valores de banda passante. apresenta os valores de banda passante para alguns meios de transmissão mais conhecidos em comunicações, como a telefonia, a radiodifusão AM e FM, os cabos metálicos de par-trançado de várias categorias e os cabos metálicos coaxiais:

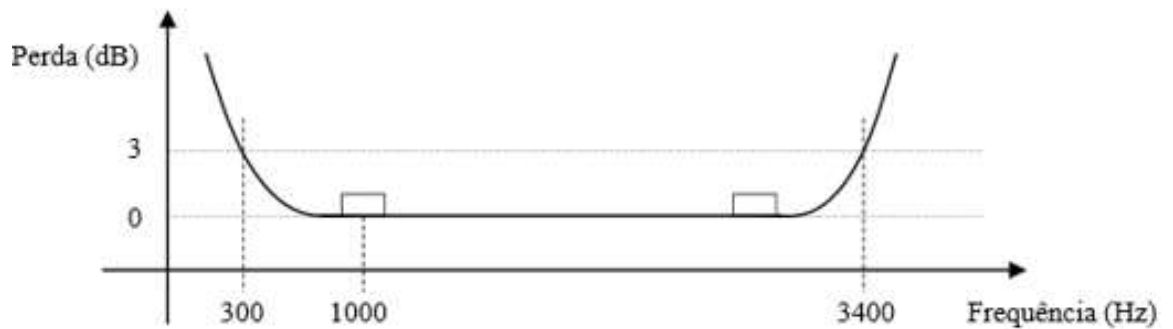
Tabela 2 - Meios de Transmissão e respectivos valores de banda passante.

MEIO DE TRANSMISSÃO	BANDA PASSANTE (kHz)
Rede Telefônica (antiga)	3,1 ~ 4
Áudio em Radiodifusão AM	5
Áudio em Radiodifusão FM	15
Cabo Par-Trançado Categoria 3	16.000
Cabo Par-Trançado Categoria 5	100.000
Cabo Par-Trançado Categoria 6	250.000
Cabo Par-Trançado Categoria 6 ^a	500.000
Cabo Coaxial	1.000.000

Fonte: (FURUKAWA, 2014).

A Figura 2 ilustra um exemplo de banda de um canal telefônico. Neste exemplo a banda é o espaço definido entre 300 Hz e 3400 Hz, enquanto largura de banda ou largura de faixa é igual a diferença entre estas duas frequências; neste caso, 3,1 kHz:

Figura 2 - Banda e Largura de Banda.



Fonte: (FURUKAWA, 2014).

Ainda dentro do conceito de largura de banda (*bandwidth*). Ela é um dos fatores determinantes para a capacidade de transmissão de um determinado meio (conexão ou rede), consequentemente, influenciando a velocidade que dados passam através deste por limitar a taxa de transmissão.

Os sinais digitais apresentam formas de onda que, também, podem ser analisadas segundo o teorema de Fourier. Neste caso, existe uma largura mínima que deve ser respeitada pelo sistema de transmissão para representar sinais digitais específicos. A Tabela 3 evidencia a transmissão de informações sob a forma de ondas digitais:

Tabela 3 - Banda Passante dos sinais digitais

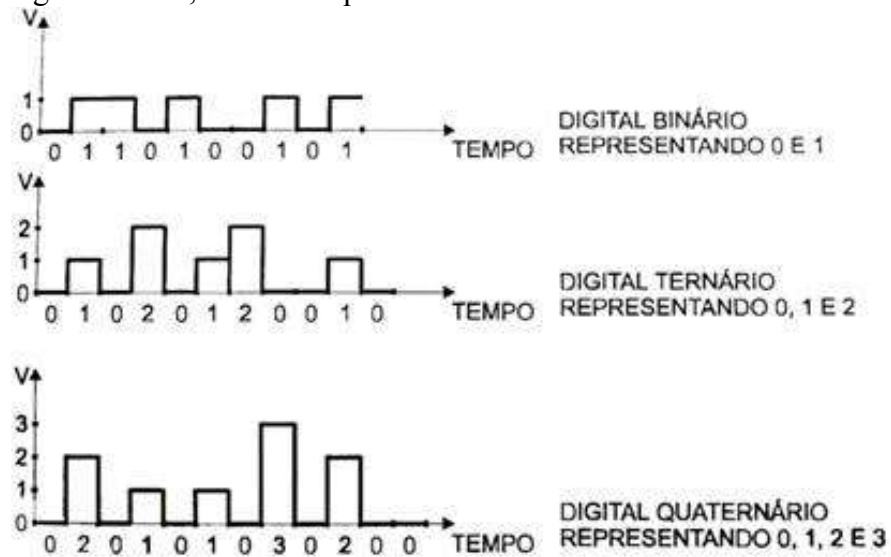
SINAL DIGITAL	BANDA PASSANTE (kHz)
Ethernet (10 Mbit/s)	7.500
Fast-Ethernet (100 Mbit/s)	31.250
Gigabit-Ethernet (1000Mbit/s)	62.500
10-Gigabit-Ethernet (10Gbit/s)	450.000

Fonte: (FURUKAWA, 2014).

Nas transmissões digitais, os sinais envolvidos podem ser originalmente digitais ou digitalizados, sempre sendo sinais discretos. A banda passante é, assim, limitada à técnica de codificação associada ao processo e às taxas de bits de cada sinal digital. Esta relação ocorre para garantir a taxa de transmissão (abordada a seguir) necessária, pois mesmo que diversas

técnicas de codificação possam ser aplicadas, todas utilizam um ou mais símbolos discretos com 2 ou mais níveis. A figura 3 mostra alguns exemplos para melhor compreensão:

Figura 3 - Sinal digital binário, ternário e quaternário.



Fonte: (MONTE, 2010)

2.4 CAPACIDADE DO SISTEMA (SHANNON-HARTLEY)

O teorema de Shannon–Hartley prediz a taxa máxima na qual uma informação pode ser transmitida por meio de um canal de comunicação de determinada largura de banda na presença de ruídos. Para todas as modulações e técnicas de codificações o teorema pode ser explicitado através da Equação (1) como a capacidade de canal que delimita a faixa superior na qual a taxa de informação de transmissão pode ser comunicada com baixa taxa de erro utilizando uma potência de sinal através de um canal analógico de comunicação, sujeito a um ruído aditivo denominado ruído gaussiano (*White Gaussian Noise*) (N).

$$C = BW \log_2 \left(\frac{S}{N} + 1 \right) \quad (1)$$

Sendo:

- C = Capacidade do canal em bits por segundo;
- BW = Largura de banda do canal em hertz;

- S = Potência do Sinal Taxa média de sinal recebido pela largura de banda (no caso de um sinal modulado, é denotado C), medido em watts (ou volts ao quadrado).
- N = Potência média do ruído gaussiano sobre a banda medido em watts (ou volts ao quadrado);
- S/N = Relação sinal-ruído (SNR) ou, para sinais modulados (CNR), do sinal de comunicação para o ruído gaussiano no receptor. É expresso como potência Linear, e não na escala de decibéis.

2.5 TAXA DE TRANSMISSÃO

A quantidade de bits que por um meio pode ser transmitida dá-se o nome taxa de transmissão. Esta taxa é descrita em grandezas de bits por segundo, ou usualmente por Mbps (Megabits por segundo). A taxa de transmissão depende de fatores como: características do meio utilizado para a transferência de informação; quantidade de tráfego de informações e, conseqüentemente largura de banda; taxas limítrofes de transmissão (máximas) de dispositivos de comunicação utilizados.

2.6 CANAL DE TRANSMISSÃO E MEIO DE TRANSMISSÃO

Em redes de comunicações, o sistema de transmissão de informações entre dois pontos recebe o nome de linha de transmissão, via de transmissão ou canal de transmissão. Este canal de transmissão utiliza o meio, físico ou guiado (cabos coaxiais e fibras óticas) ou não físico ou não guiado (espaço livre, eletromagnético), para envio de informações. O meio pode, assim, ser conceituado como todo o suporte que transporta as informações desde a origem até o destino e vice-versa.

Exemplos de transmissão por meio físico:

- Cabos metálicos
- Fibra Ótica

Exemplos de transmissão por meio não físico:

- Radiodifusão (frequências de Rádio)
- *Bluetooth*

- *Laser*

Em meios guiados, como pares trançados (abordados a seguir), as informações transmitidas são convertidas em sinais elétricos que propagam pelo material condutor, enquanto a transmissão por fibras ópticas têm as informações convertidas em sinais luminosos e então propagados pelo material cristalino. Quanto aos meios não-guiados, as mesmas informações são irradiadas através de antenas para o ambiente, como por exemplo as transmissões via satélite, rádio, infravermelho, *bluetooth e wireless*. Seja qual for a escolha do meio de transmissão para determinado sinal, cada um influencia no sinal transmitido limitando a largura de banda disponível, provocando distorções e atenuações.

2.7 CABOS METÁLICOS E FIBRAS

Os canais de transmissão guiados por cabos metálicos têm por parâmetros principais as características do condutor metálico, entre elas, resistência, indutância, capacitância e a condutância, que variam de acordo com a geometria e propriedades dielétricas dos materiais de revestimento dos cabos. De forma geral, pode-se descrever um canal de comunicação metálico como um arranjo de resistências e indutâncias em série, unidas a capacitâncias e condutâncias em paralelo, todas por unidade de comprimento do condutor. Como principais meios metálicos, pode-se citar os cabos coaxiais e os cabos de par trançado.

2.8 CABOS COAXIAIS

Embora os cabos coaxiais sejam largamente utilizados para Circuitos Fechado de Televisão Analógica, e ainda muito utilizados também para sistemas de TV a Cabo, os mesmos estão perdendo espaço para tecnologias mais recentes devido principalmente a sua dificuldade de manuseio e conexões, aliada ao desempenho prejudicado pela atenuação devido aos ruídos térmicos e pela intermodulação, que ocorre quando vários canais são usados através da técnica de modulação por frequência (MACHADO, 2012)

2.9 CABOS DE PAR TRANÇADO

Já os cabos metálicos de par trançado são largamente utilizados na atualidade, principalmente por seu avanço tecnológico constante nos últimos anos, seu fácil manuseio, seus acessórios, que causaram uma tendência global a adotá-lo como padrão para redes *ethernet* e TCP/IP nas comunicações de dados.

Os cabos UTP de par trançado consistem basicamente em pares de fios de cobre isolados e trançados entre si, com a intenção de causar, com este trançar de pares, a redução do acoplamento gerado entre eles devido à indutância mútua e ao desbalanceamento capacitivo, minimizando assim os efeitos da diafonia e do ruído. O trançamento dos pares aumenta também o balanceamento entre os condutores, maximizando o efeito de cancelamento de correntes, o que protege o par de interferências externas.

Na comunicação de dados, os cabos de pares metálicos trançados mais utilizados são de 4 e 25 pares, mas há disponíveis também, principalmente com aplicações para a área de telefonia, os cabos com 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300, 600, 1200, 2400 e 3600 pares, além é claro de encomendas especiais para atender a demandas específicas das grandes empresas de telecomunicações (FURUKAWA, 2014). As Figuras 4 e 5 ilustram cabos com 4 pares.

Figura 4 - Cabo F/UTP (blindagem em folha) com 4 pares e 25 pares



Fonte: (FURUKAWA, 2014)

Figura 5 - Cabo F/UTP (blindagem em folha) com 4 pares



Fonte: (FURUKAWA, 2014)

Há uma necessidade de eliminar a interferência que chega ao sinal transmitido, e para isto surgem os cabos blindados. Nos cabos metálicos de par trançado, há algumas classificações importantes: Os cabos U/UTP, sigla que significa, do inglês, *Unshielded Twisted Pair*, ou seja, Par Trançado Não Blindado. Há ainda os cabos F/UTP (*Foilled Twisted Pair*, ou par trançado com blindagem em folha), SF/UTP (*Screened Twisted Pair*, ou par trançado com blindagem em malha) e o mais conhecido S/UTP (*Shielded Twisted Pair*, ou par trançado blindado), entre outros com aplicações mais específicas.

Os cabos F/UTP e SF/UTP são cabos de 4 pares com uma camada de blindagem metálica em forma de folha (*foilled*), ilustrado na Figura 5, ou em forma de malha (*screened*) que recobre todos os pares trançados entre si. Esta blindagem aplicada aos cabos proporciona uma proteção contra interferências de ondas eletromagnéticas, reduzindo também a irradiação gerada pelo próprio cabo que poderia afetar os demais condutores ao seu redor. Estas características tornam este tipo de cabo largamente aplicado em ambientes ruidosos. Efetivamente esta proteção depende de vários fatores, como por exemplo, as frequências das radiações que devem ser bloqueadas, a espessura da blindagem, o tipo de metal e a qualidade da ligação ao aterramento, item importantíssimo num sistema de cabeamento blindado.

2.10 FIBRAS OTICAS

Em fibras óticas os sinais de informação são convertidos em sinais óticos. Os canais de transmissão guiados por fibras óticas possuem frequências de portadora na faixa de centenas de terahertz, o que permite o emprego de elevadas taxas de transmissão. Os diâmetros externos das fibras óticas são menores quando comparados a pares metálicos de mesma faixa de frequência, o que resulta em peso reduzido, flexibilidade mecânica maior, menor custo de transporte e menor espaço de instalação. Como em sua fabricação são utilizados elementos não metálicos (Vidros altamente transparentes, por exemplo), e, conseqüentemente, ser um meio isolante não é necessário o uso de técnicas de aterramento de modo a proteger o sistema de interferências.

Pelo fato de serem imunes a ruídos eletromagnéticos externos as fibras são adotadas em ambientes urbanos, pelo meio de cabos especiais que acompanham linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão, assim, compartilhando de uma infraestrutura já consolidada reduzindo custos de implementação. Nesta situação se destacam os cabos especiais OPGW

(*optical ground wire*), formado por fibras no interior de cabos para-raios, como mostrada na Figura 6.

Figura 6 - OPGW



Fonte: (AFL, 2016)

2.11 TIPOS DE SERVIÇO EM TELECOMUNICAÇÕES – SEGUNDO LEI GERAL DE TELECOMUNICAÇÕES E HISTÓRIA NO BRASIL

Os serviços de Telecomunicações no Brasil são regulamentados pelo governo via Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) a partir da configuração da Lei n.º 9.472/97 de Julho de 1997, denominada Lei Geral de Telecomunicações (LGT), base regulatória para o setor.

Segundo a Lei Geral, o processo relativo à privatização do setor ficou a cargo de uma Comissão Especial de Supervisão, ligada ao Ministério das Comunicações. Essa privatização do setor acarretou uma acirrada concorrência entre operadoras e, conseqüentemente, a demanda de realização de projetos de rádio enlaces de baixa, média e alta capacidade para reestruturação de todos os níveis de infraestrutura, incluindo ‘backbones’ internacionais, nacionais e regionais.

Essas ações, aos poucos, diminuiram o defasamento entre a realidade do país e o aumento da capacidade de transmissão que o mundo assistia nas décadas de 1980 e 1990.

Algumas classificações desta legislação estão descritas a seguir: LGT define serviço de telecomunicações como: “o conjunto de atividades que possibilita a oferta de telecomunicação. Telecomunicação é a transmissão, emissão ou recepção, por fio, radioeletricidade, meios ópticos ou qualquer outro processo eletromagnético, de símbolos, caracteres, sinais, escritos, imagens, sons ou informações de qualquer natureza. Não constituem serviços de telecomunicações o provimento de capacidade de satélite, a atividade de habilitação ou cadastro

de usuários e de equipamentos para acesso a serviços de telecomunicações e os serviços de valor adicionado.” (BRASIL, 1997).

2.11.1 Classificação

Quanto à compreensão dos méritos a que atendem, a LGT qualifica os serviços de telecomunicações em serviços de interesse coletivo e serviços de interesse restrito.

- **INTERESSE COLETIVO:** Os serviços de interesse coletivo são aqueles passíveis de serem oferecidos a todos aqueles que se enquadrarem no regulamento específico, ou seja, o prestador não pode deixar de prestá-lo quando solicitado, desde que seja técnica e economicamente viável (TUDE, 2016)

- **INTERESSE RESTRITO:** Entende-se como de interesse restrito o serviço destinado ao uso do executante ou de um grupo de pessoas naturais ou jurídicas, caracterizado pela realização de atividade específica (TUDE, 2016).

Os serviços de telecomunicações são, juridicamente, classificados como públicos ou privados:

- **REGIME PÚBLICO:** O serviço de telecomunicações em regime público é sempre de interesse coletivo e é aquele prestado mediante concessão ou permissão, com atribuição a sua prestadora de obrigações de universalização e de continuidade. Incluem-se neste caso as diversas modalidades do serviço telefônico fixo comutado, de qualquer âmbito, destinado ao uso do público em geral (TUDE, 2016).

- **REGIME PRIVADO:** Já o regime privado está sujeito a regras mais flexíveis e com menor interferência da União na sua regulação, não havendo controle de tarifas (praticase preço). O serviço prestado no regime privado é outorgado mediante autorização (existindo exceções nas quais ele é objeto de concessão, como é o caso do Serviço Móvel Celular - SMC) e pode ser de interesse restrito ou coletivo (TUDE, 2016).

Três modalidades podem distinguir o serviço a que empresas de comunicações estão sujeitas:

- **CONCESSÃO:** Define-se como concessão de serviço de telecomunicações a delegação de sua prestação, mediante contrato, por prazo determinado, no regime público, sujeitando-se a concessionária aos riscos empresariais, remunerando-se pela cobrança de tarifas

dos usuários ou por outras receitas alternativas e respondendo diretamente pelas suas obrigações e pelos prejuízos que causar (TUDE, 2016).

- **PERMISSÃO:** Define-se como permissão de serviço de telecomunicações o ato administrativo pelo qual se atribui a alguém o dever de prestar serviço de telecomunicações no regime público e em caráter transitório, até que seja normalizada a situação excepcional que a tenha proporcionado. Observa-se, portanto, que a permissão é reservada para casos excepcionais (TUDE, 2016).

- **AUTORIZAÇÃO:** Já os serviços sob o regime privado são, em princípio, objeto de autorização, existindo exceções, casos em que são objeto de concessão. Define-se como autorização de serviço de telecomunicações o ato administrativo vinculado que faculta a exploração, no regime privado, de modalidade de serviço de telecomunicações, quando preenchidas as condições objetivas e subjetivas necessárias (TUDE, 2016).

3 TIPOS DE TRANSMISSÃO

3.1 RÁDIO

Os recursos utilizados para propiciar comunicação por intermédio da transmissão de informações previamente codificadas em sinais eletromagnéticos, os sistemas de rádio são caracterizados como uma propagação de ondas eletromagnéticas utilizando antenas de transmissão e recepção.

Em um sistema de rádio: o conjunto transmissor atua como um gerador de oscilação, originando pulsos em determinadas frequências de rádio para difusão através de antenas ou meios semelhantes; o conjunto receptor tem a função de captar as oscilações eletromagnéticas emitidas pelo transmissor e converte-las, com o intuito de posterior demodulação para a obtenção da informação original.

Os sistemas de rádio exercem na comunicação de sinais de telefonia e de dados um papel fundamental, podendo ser classificado como um dos mais importantes meios de transmissão, independente da capacidade, distância ou natureza das informações. Para uma transmissão efetiva, entre ao menos dois pontos, utilizando o sistema citado é importante o respeito a certos requisitos:

- Potência de transmissão
- Taxa de transmissão
- Atenuação e propagação
- Composição do meio
- Espectro de frequência
- Modo de propagação

3.1.1 Potência de Transmissão

A potência que atinge o receptor deve ter valor suficientemente elevado para que a correção de sinal recebido possa tornar-se possível. A unidade de medida (Bel) relaciona duas grandezas por meio de logaritmos. Hoje a padronização internacional adota a utilização de seu submúltiplo, o conhecido decibel (em sua abreviação, dB) (FURUKAWA, 2014).

O decibel, é definido pela equação (2):

$$\text{dB} = 10\text{Log} \left(\frac{\text{Pot Saída}}{\text{Pot Entrada}} \right) \quad (2)$$

Sendo:

- dB = decibel (relação de potências);
- Pot Saída = potência de saída do circuito;
- Pot Entrada = potência de entrada (ou de referência) do circuito.

Atribuindo valores à equação (2), tem-se uma relação dos valores de dB com a relação de potências (saída e entrada), conforme a Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 - Relação de valores em dB com potência.

Relação em dB	Relação de Potência
30	1000
20	100
10	10
6	4
3	2
-3	0,5
-6	0,25
-10	0,1
-20	0,01
-30	0,001

Fonte: (FURUKAWA, 2014)

Como exemplo: uma atenuação de sinal de -3 dB significa, matematicamente, que apenas 50% da potência do sinal emitido chegou ao receptor. Para uma atenuação de - 6dB, 75% da potência não atinge o receptor.

3.1.2 Atenuação e interferência

Os canais de transmissão estão sujeitos a diversos fenômenos que podem degradar o sinal transmitido como a distorção de retardo, de atenuação, distorção harmônica, distorção característica, ruídos, diafonia, eco, *Jitter* de fase e *drop-out* (FURUKAWA, 2014). Esses fenômenos são brevemente descritos a seguir:

- Distorção de Retardo: ocorre quando, em um canal, a fase do sinal não varia de forma linear com a frequência, transmitindo várias componentes de frequência em tempos diferentes. Quando o pulso for recebido e, posteriormente interpretado, estará comprometido.
- Distorção de Atenuação: ocorre distorção seletiva das componentes de frequência de um sinal. Em um sinal no qual ocorra o excesso de atenuação de frequências, sendo estas, baixas ou altas, o sinal torna-se deformado.
- Distorção Harmônica: ocorre quando a amplificação de sinal resulta em um valor de entrada excessivo. Há uma excursão por regiões não-lineares da curva de transferência e filtragem.
- Distorção Característica: alongamento dos pulsos, causado pelos limites de largura de banda do canal, resultando em uma interferência nos símbolos adjacentes do sinal.
- Ruído: térmico ou impulsivo: o primeiro ocorre devido ao movimento de elétrons em que seu movimento torna-se proporcional à temperatura e à banda passante; o segundo representa perturbações esporádicas e repentinas, provocado por causas diversas, como descargas atmosféricas, explosões, ignições e proximidade à reatores ou motores elétricos.
- Diafonia: sinais distintos, quando em canais de transmissão fisicamente próximos.
- Eco: reflexão de parte do sinal.
- *Jitter* de Fase: variação instantânea da fase. Ocorre quando a curva do sinal transmitido passa por “zero”.
- *Drop-Out*: perda momentânea da portadora de um sinal.

As interferências são indesejáveis, pois tem como resultado a limitação de desempenho de sistemas de comunicação, alterando as características dos sinais transmitidos, podendo

ocasionar o não reconhecimento e, conseqüente, perda de informação quando atingido seu receptor.

Como ponto de nota, para projetos simples de telecomunicações, apenas o ruído é considerado. Este ruído incidente no sinal durante o trecho de transmissão é adicionado ao mesmo, provocando variação em sua forma. A relação entre a intensidade do sinal original e o ruído absorvido constitui um parâmetro chamado de Relação Sinal/Ruído (ou, do inglês, *Signal Noise Ratio – SNR*). Esta grandeza é adimensional, calculada a partir das potências em decibéis do sinal e do ruído do sistema.

3.1.3 Uso do software

Para cálculo de desempenho e disponibilidade de um enlace de rádio, além do procedimento de cálculo, o software (PTP *LinkPlanner Cambium Networks* ®) é utilizado neste trabalho. Este software, apesar de não ser o mais completo do mercado, executa os cálculos a partir da inserção de coordenadas das pontas do enlace, frequência utilizada, modelo do rádio a ser utilizada, configuração do rádio, modelos das antenas, guias de onda, relevo do enlace, além de modelos climáticos.

3.1.4 Projeto de rádio enlace

Neste documento são demonstrados os conceitos básicos relacionados aos radio enlaces em visibilidade direta. Um projeto de rádio enlace é considerado otimizado quando o valor monetário é reduzido e a qualidade técnica do mesmo é mantido e, conseqüentemente, um projeto otimizado significa que sua confiabilidade está relacionada apenas as condições especificadas para a sua criação.

Estes modelos e medidas são encaminhados para órgãos reguladores, como *International Telecommunications Union* (ITU) e no caso de radiocomunicação especificamente, *Radiocomunication* (ITU-R), com o objetivo de serem analisadas e padronizadas internacionalmente sob a forma de normas e recomendações.

Quando, superdimensionado por imperícia ou futuras expansões, pode ocasionar, além de um aumento no custo do projeto, problemas técnicos que muitas vezes passam despercebidos na implementação. Estes problemas são: uso de antenas e torres maiores do que o necessário;

susceptibilidade a interferências; reflexões; atenuações adicionais, devido ao aumento da metragem dos cabos coaxiais; e comprometimento do próprio funcionamento do sistema.

As recomendações mais utilizadas para projetos de rádio são: Serie-P (*RadioWave Propagation*) e Serie-V (*Vocabulary and related objects*). Dentro destas series citadas é possível ainda, destacar as seguintes recomendações:

- *Recommendation P.525-2 (08/1994) - Calculation of free-space attenuation.*
- *Recommendation P.372-12 (07/2015) - Radio noise.*
- *Recommendation P.526-13 (11/2013) - Propagation by diffraction.*
- *Recommendation P.341-5 (10/1999) - The concept of transmission loss for radio links.*
- *Recommendation P.453-6(05/1997) - The radio refractive index: its formula and refractivity data.*
- *Recommendation P.373-9 (09/2013) - Definitions of maximum and minimum transmission frequencies.*
- *Recommendation P.530-16 (07/2015) - Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.*
- *Recommendation P.581-2 (06/1990) - The concept of "worst month".*
- *Recommendation P.833-8 (09/2013) - Attenuation in vegetation.*

3.1.5 Enlace e seu perfil

O principal objetivo de um projeto de rádio é a garantia de recuperação de um sinal transportado na outra ponta do sistema com taxa de erro aceitável (sinal possa ser recuperado).

Para que isso aconteça a relação entre o sinal e o ruído gerado (S/N) na recepção deve ser maior do que o valor mínimo especificado. Este valor é dependente da função de modulação e mecanismos de codificação utilizados no enlace.

O Transmissor e antenas devem ser dimensionados de modo com que a potência destes elementos compense as perdas na propagação, polarização cruzada, atenuação nos conectores, cabos coaxiais e outros elementos presentes nas fontes de atenuação ou interferência.

Segundo recomendações do órgão internacional ITU-R, faz se necessário incluir uma margem para compensação a sinais interferentes próximos a banda de frequência utilizadas no

enlace. Esta compensação é devida ao fato de sinais próximos, muitas vezes, aumentarem o nível de ruído e, por consequência, a piora da relação essencial (S\R)

Obtido através de cartas topográficas ou análises de campo, o perfil, permite a justificativa para o melhor traçado a ser desenvolvido para o projeto.

Para exemplificar, segue abaixo relevo topográfico em linha direta, entre São Paulo (23°24,08'45" S - 46°38,12'15" W) e Campinas (23°07'46,08" S – 47° 21,06' 70" W), obtido pela ferramenta Google Earth®. A Figura 7 mostra o perfil de elevação da cidade de São Paulo.

Figura 7 - Perfil de elevação São Paulo – Campinas



Fonte: (Produção do próprio autor utilizando Google Earth, 2016)

Após a obtenção destes dados, ao percurso é realizado um ensaio com conceitos de cálculo de enlace.

3.1.6 Modelos climáticos

Ao se propagar as ondas de rádio estão sujeitas a reflexões no solo e na atmosfera que provocam alterações na sua amplitude e caminho percorrido ocasionando variações na potência do sinal recebido. Estas variações são chamadas de desvanecimento (*fading*). O desvanecimento pode ser causado também por obstáculos na linha de visada direta, ou por atenuação devido a chuvas.

As perdas ocasionadas pelo desvanecimento podem resultar em margens exageradas, encarecendo projetos ou até mesmo, inviabilizando-os.

Em regiões com características climáticas específicas, em regiões chuvosas, por exemplo, é recomendado a utilização de modelos próprios de estimativa de chuva (ITU-R 838-3, ITU R P838-2 e ITU-R 837-6).

3.1.7 Critérios de visibilidade

As diferentes densidades atmosféricas encontradas no percurso de um feixe eletromagnético, caso seja considerado um valor médio do gradiente de refatividade (G), ocasionam uma variação na trajetória do mesmo, alterando o destino final e curvando o feixe de modo a este abandonar a consideração inicial de propagação em linha reta. Para minimizar este inconveniente, é considerado um feixe sendo propagado em um arco cujo raio é “r”. Este raio, inversamente proporcional ao valor médio do índice de refração, é aproximado pela equação (3):

$$\frac{1}{r} = \frac{dN}{dh} \quad (3)$$

A superfície da Terra pode ser aproximada por um arco com raio médio de 6,371 km. De modo que, a liberação de um feixe que se propaga pela superfície da terra depende da distância relativa entre duas curvas. Para simplificar o cálculo, sem prejuízo considerável de resultado, a prática recorre ao artifício do raio equivalente da terra (R_e) e considera-se uma linha com fator de correção. Isto significa que ao incrementar o raio da terra e, conseqüentemente, reduzir a sua curvatura, é possível representar o feixe percorrendo a trajetória em linha reta. Matematicamente, o raio real da terra recebe a correção (K) ocasionada pela suposição deste novo valor de raio, demonstrado na equação (4)

$$R_e = K \cdot a \quad (4)$$

Sendo:

- R_e = Raio equivalente da Terra;
- K = Fator de correção;
- a = Raio real da terra;

O valor de k por estar relacionado com G, varia de acordo com condições climáticas, e é dado pelas equações (5) e (6):

$$K = \frac{1}{1 + a \cdot \frac{dN}{dh}} \quad (5)$$

Sendo:

$$\frac{dN}{dh} = \frac{dM}{dh} \times 10^{-6} - \frac{1}{a} \quad (6)$$

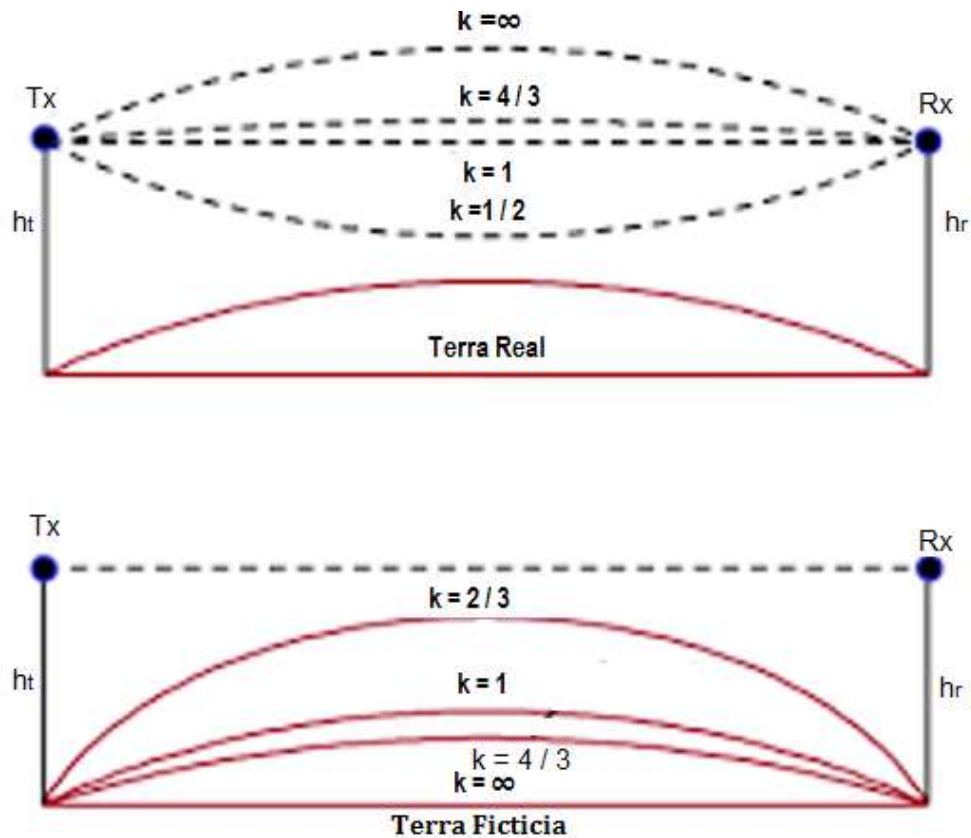
Valor médio do gradiente de refração próximo da superfície terrestre é dado por.

$$\frac{dM}{dh} = 0,118 \frac{M.U}{m} \quad (7)$$

Para muitos projetistas, genericamente, o cálculo utilizando o valor de $K_{\text{médio}} = 4/3$ e valor de $K_{\text{mínimo}} = 2/3$, considerando condições de atmosfera padrão é utilizado.

A prática de adotar estes valores, apesar de não estar incorreta (baseia-se nas práticas TELEBRAS), super dimensiona a altura das antenas. Para evitar este gasto, as recomendações ITU-R 530-014 determinam $K_{\text{mínimo}}$ para 99,9% no pior mês do ano em função da distância. A Figura 8 mostra comportamento do fator de correção K.

Figura 8 - Representação da correção K.



Fonte: (RAMOS, 2013)

3.1.8 Raio de Fresnel e elipsoide

Após correção do percurso utilizando o fator K, determina-se características do enlace baseando-se na porcentagem do raio de Fresnel desobstruída. A relação com K pode ser resumida na Tabela 5, que mostra os valores máximos admissíveis de obstrução em função da frequência de operação do rádio enlace.

Tabela 5 - Critérios para o raio de Fresnel.

< 1 GHz	Entre 1GHz e 3GHz	>3GHz
30% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{medio}}$.	60% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{medio}}$.	100% do raio de Fresnel para $K = K_{\text{medio}}$.
10% do raio de Fresnel para $K=K_{\text{minimo}}$	30% do raio de Fresnel para $K=K_{\text{minimo}}$	60% do raio de Fresnel para $K=K_{\text{minimo}}$

Fonte: (MONTE, 2010)

Considera-se um enlace desobstruído quando não há obstáculos encontrados no interior do primeiro elipsoide de Fresnel. As Elipsoides de Fresnel correspondem ao lugar geométrico dos pontos cuja soma das distâncias entre receptor e transmissor é um múltiplo interior de meio comprimento de onda.

As Zonas de Fresnel são anéis circulares delimitados por um par de círculos concêntricos que correspondem as seções retas dos elipsoides no plano perpendicular ao enlace.

O raio da primeira zona de Fresnel é dado pela equação (8) e equação (9):

$$F_1 = \sqrt{\frac{\lambda(d_1 \cdot d_2)}{d_1 + d_2}} \quad (8)$$

Sendo:

- d_1 = Distância (metros) do transmissor até o obstáculo.
- d_2 = Distância (metros) do obstáculo até o receptor.
- λ = comprimento de onda do sinal (metros)

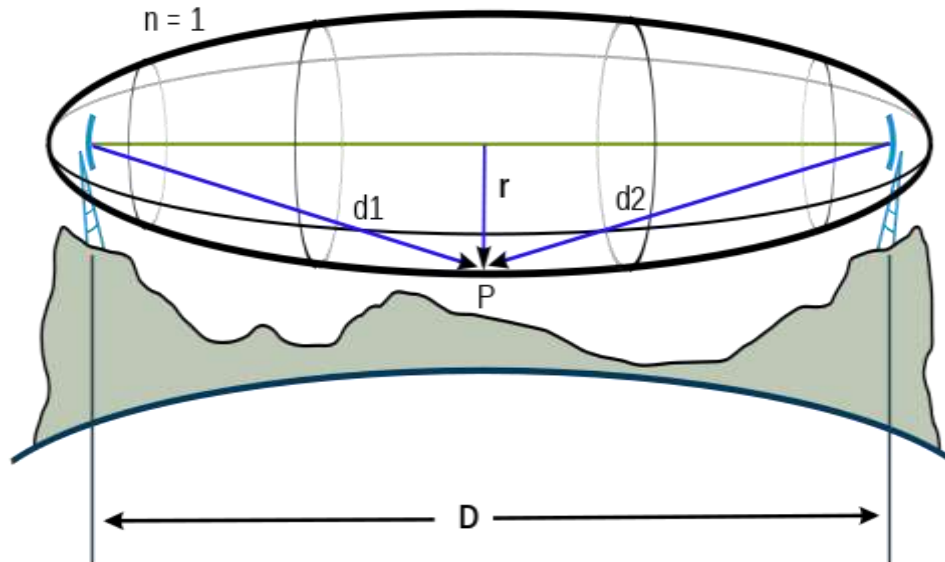
A Figura 9 ilustra a elipsoide e raio de Fresnel.

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{f \cdot d}} \quad (9)$$

- $d_1 \rightarrow \text{km}$
- $d_2 \rightarrow \text{km}$

- $f \rightarrow \text{GHz}$

Figura 9 - Representação de Área, Elipsoide e Raio de Fresnel



Fonte: (MUNDO TELECOMUNICACIONES, 2010)

Nota-se que as zonas de Fresnel são dependentes da frequência. Assim, com o aumento da frequência o raio da zona de Fresnel é reduzido facilitando a liberação do enlace. No entanto, deve-se considerar que um aumento extremo na frequência torna o sistema mais propício ao risco de obstrução por desvanecimento (detalhado mais a frente). Para facilitar o projeto são utilizadas zonas de Fresnel normalizadas, tornando independentes as mesmas das frequências.

Como recomendação, utilizar para enlaces longos o valor de K mínimo, pois ao percorrer um espaço maior as ondas de rádio percorrem diferentes meios e, conseqüentemente, índices de refração distintos. Neste caso, a aplicação de K mínimo aproxima-se da realidade.

3.1.9 Atenuação em Espaço Livre

A onda eletromagnética sofre uma atenuação contínua ao ser transmitida pelo espaço livre. Esta atenuação pode ser calculada pela equação de Friis, equação (10).

$$A_o = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (10)$$

E sob a forma logarítmica (expressa em dB):

$$A_o = 32,5 + 20\text{Log}(d) + 20\text{Log}(f) \quad (11)$$

Sendo:

- d = Distância em km;
- f = Frequência em MHz.

Ou

$$A_o = 92,44 + 20\text{Log}(d) + 20\text{Log}(f) \quad (12)$$

- f = Frequência em GHz.

3.1.10 Desvanecimento e Reflexão

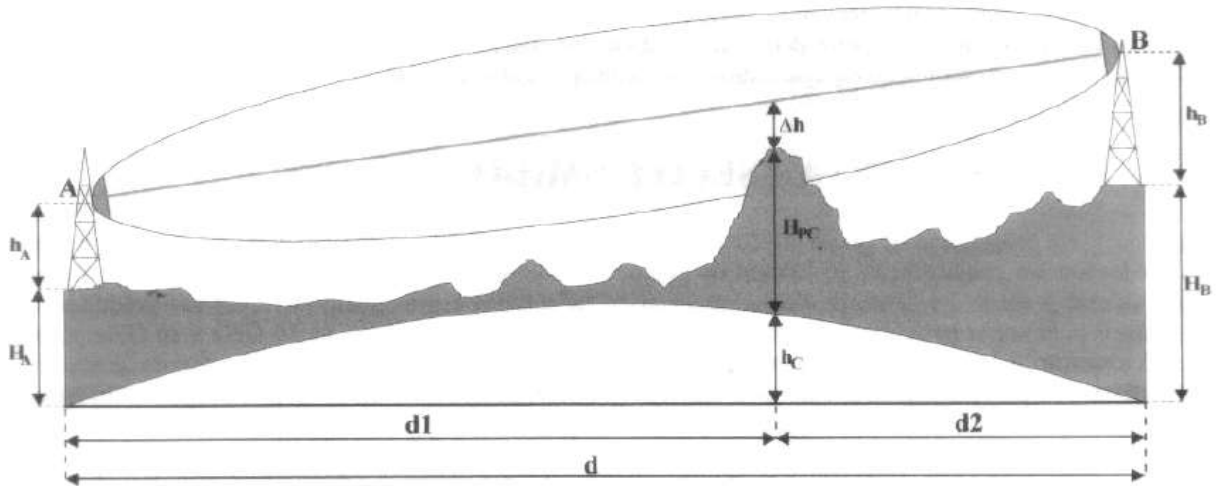
A atmosfera e o próprio solo, em quaisquer condições, exercem influência sobre o enlace e pela forma de fenômenos de reflexão. Esta reflexão também pode ocorrer em condições específicas, como obstáculos na linha de visada direta e atenuação devido à chuva.

Estes fenômenos de variações de potência no sinal recebido e são denominados desvanecimentos (*Fading*) e é definido como a diferença entre o nível de recepção nominal e o limiar do receptor.

3.1.11 Cálculo da altura das antenas

Com os dados definidos e pontos críticos do percurso (pontos de maior altitude que podem obstruir a disponibilidade das elipsoides de Fresnel) pode-se calcular a altura das antenas de transmissão e recepção. O método proposto consiste em arbitrar a altura de uma das antenas e calcular a altura da outra, obedecendo os critérios de desobstrução do primeiro elipsoide de Fresnel. Um exemplo visual é dado pela Figura 10

Figura 10 - Cálculo da altura das antenas.



Fonte: (MANITO, 2010).

$$hB = \frac{d(Hpc + \Delta h + hc - HB) - d2(HA + hA - HB)}{d1} \quad (13)$$

Sendo:

- Δh = Distância do ponto crítico à linha de visada (m);
- Hpc = Altitude do ponto crítico (m);
- HA = Altitude do ponto A (m);
- HB = Atitude do ponto B (m);
- hc = Correção da curvatura da terra no ponto crítico (m);
- hA = Altura da antena A (m);
- hB = Altura da antena B (m);
- $d1$ = Distância do ponto crítico à antena A (km);
- $d2$ = Distância do ponto crítico à antena B (km);
- d = Distância total entre as duas antenas (km).

Para cálculo, utilizando correção de curvatura:

$$h_{k\text{medio}} = \frac{d_1 d_2}{12,74 K} \quad (14)$$

e:

$$h_{k\text{minimo}} = \frac{d_1 d_2}{12,74 K} \quad (15)$$

Comparação com norma:

$$R = P * 547,72 * \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} \quad (16)$$

Sendo:

- R - Novo raio de Fresnel
- P - Porcentagem de correção do fator K
- f - Frequência em MHz

O valor corrigido pode ser representado como:

$$H_{ck\text{medio}} = H_{k\text{medio}} + P \cdot R_F \quad (17)$$

$$H_{ck\text{minimo}} = H_{k\text{minimo}} + P \cdot R_F \quad (18)$$

É utilizado o valor delimitador entre ambos.

Finalmente, pode-se obter a correção para a curvatura da terra, efetivamente encontrar o valor do novo raio de Fresnel e altura de antenas se desejável.

3.1.13 Potência de transmissão, recepção e atenuação total líquida

Os equipamentos utilizados para os projetos de enlace têm características próprias que permitem uma análise quanto as potências de transmissão e recepção do sistema.

A potência de transmissão é um fator que depende, puramente, do equipamento de transmissão e suas características construtivas. No entanto, quanto a potência de recepção, para um sistema ser bem sucedido e fornecer uma qualidade aceitável alguns parâmetros devem ser observados:

O sistema exige um nível mínimo de potência recebida para operar, a partir do nível mínimo de sinal, a seguir equação pode ser escrita:

$$\mathbf{Prx = Ptx - AT} \quad (19)$$

Sendo:

- Ptx = Potência de saída (dBm);
- AT = Atenuação total líquida.

Como forma de manter o nível mínimo, reduzindo o problema com aproximações, pode ser considerada uma margem de segurança.

$$\mathbf{Prx = P_{Lim} + M} \quad (20)$$

Sendo

- P_{Lim} : Potência limiar do sistema.
- M : Margem de segurança do sistema.

Quando os pontos supracitados são postos em uma única análise, a seguinte relação pode ser dada quanto a atenuação total líquida do enlace:

$$\mathbf{AT = Ao + Aab + Armf + Aga + Agb + afTx + afRx + atob - (GAtx + GARx)} \quad (21)$$

Sendo:

- Ao = Atenuação no espaço livre (dB);
- Aab = Atenuação devido a absorção na atmosfera (dB);
- Armf = Atenuação total no circuito de ramificação Tx e RX (dB);
- Aga = Atenuação no guia de onda/cabo de Rf da estação A;
- Agb = Atenuação no guia de onda/cabo de Rf da estação B;
- AfTx = Atenuação filtros, circuladores, e duplexadores no lado transmissor (dB);

- A_{fRx} = Atenuação filtros, circuladores e duplexadores no lado receptor(dB);
- A_{tob} = Atenuação por obstrução;
- $G_{Atx} + G_{Arx}$ = Ganhos das antenas de transmissão e recepção (dBi)

3.2 RÁDIO ENLACES POR SATÉLITE

Os rádios enlaces por satélites são utilizados quando links de comunicação devem atingidos a centenas de metros ou mais, o que torna o investimento em estações de repetição de rádio ou infraestrutura de fibra proibitivo ou economicamente inviável.

Neste tipo de situação é aconselhável o uso de satélites artificiais em orbitas geoestacionárias. Em sistemas digitais por satélite, o sinal recebido tem seu desempenho mensurado a partir da probabilidade média de erros de bit. Esta probabilidade media é uma relação entre a potência da portadora e a potência do ruído do enlace (RPR), do tempo de duração do bit (T_B) e da largura do ruído do canal satélite, B.

3.2.1 O Enlace

Os enlaces de satélite são constituídos por dois enlaces distintos, sendo estes o de subida, *uplink*, e o de descida, *downlink*. A qualidade de sinal no *uplink* é dependente da potência de transmissão do sinal da estação em terra e como este sinal é recebido pelo satélite. Devido à grande distância que os pontos de transmissão e recepção a atenuação que incide sobre o sinal do enlace tem valor significativo, sendo facilmente perturbado por ruídos térmicos. O sinal de *uplink* pode, adicionalmente, ser influenciado por outros sinais provenientes de outras estações transmissoras. A chuva provoca grande atenuação em enlaces operando em bandas entre (12 a 18 GHz).

3.2.2 Geometria da Orbita Geoestacionária

O direcionamento de uma antena a um satélite geoestacionário é realizado pela determinação dos ângulos de elevação (E) e de azimute (A) com base no conhecimento da

HEMISFERIO SUL

$$\text{Estação a oeste do satélite} \quad \mathbf{A = A'} \quad (24)$$

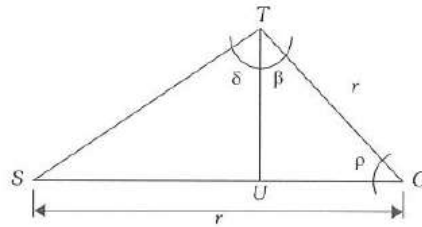
$$\text{Estação a leste do satélite} \quad \mathbf{A = 360^\circ - A'} \quad (25)$$

$$\mathbf{A' = \tan^{-1}\left(\frac{MP}{MT}\right) = A' = \tan^{-1}\left(\frac{MO \tan|\varphi_s - \varphi|}{r \tan \theta}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{r}{\cos \theta} \frac{\tan|\varphi_s - \varphi|}{r \tan \theta}\right)} \quad (26)$$

$$\mathbf{A' = \tan^{-1}\left(\frac{\tan|\varphi_s - \varphi|}{\sin \theta}\right)} \quad (27)$$

O ângulo produzido pela intersecção dos planos TPM e TSO com a linha de visada entre a estação e o satélite recebe o nome de ângulo de elevação. Para a determinação dos ângulos de azimute e de elevação é atribuído ao planeta Terra um raio esférico com $r = 6.378,155$ km. A Figura 12 demonstra as relações para o ângulo de elevação (E):

Figura 12 - Triângulo para cálculo de elevação.



Fonte: (GOMES, 2013).

De modo que:

$$\hat{E} = \beta + \delta - 90^\circ = (90^\circ - \rho) + \delta - 90^\circ \quad (28)$$

$$\hat{E} = \delta - \rho \quad (29)$$

Com base no triângulo TPO:

$$\rho = \cos^{-1}\left(\frac{r}{OP}\right) \quad (30)$$

Podendo ser reescrito como:

$$\rho = \cos^{-1}(\cos \theta \cos |\varphi_S - \varphi|) \quad (31)$$

E o ângulo δ :

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{r_S - r \cos \theta \cos |\varphi_S - \varphi|}{r \sin[\cos^{-1}(\cos \theta \cos |\varphi_S - \varphi|)]}\right) \quad (32)$$

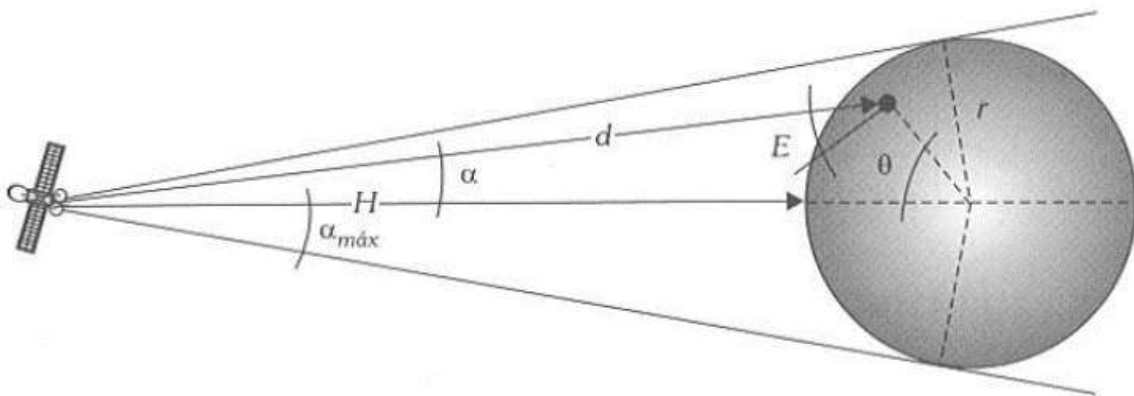
Somando as equações (32), (31) na equação
(29)

$$E = \tan^{-1}\left(\frac{r_S - r \cos \theta \cos |\varphi_S - \varphi|}{r \sin[\cos^{-1}(\cos \theta \cos |\varphi_S - \varphi|)]}\right) - \cos^{-1}(\cos \theta \cos |\varphi_S - \varphi|) \quad (33)$$

3.2.4 Limites de Cobertura

A Figura 13 ilustra as relações para cálculo de cobertura:

Figura 13 - Ângulo de cobertura e faixa de inclinação.



Sendo o ângulo de cobertura da Terra $2\alpha_{\max}$, o ângulo total de como a Terra é vista do satélite.

Para um ângulo de elevação E da antena em solo, o ângulo 2α é dado pela equação (34):

$$\frac{\sin \alpha}{r} = \frac{\sin 90 + E}{r + H} = \cos \frac{E}{r + H} \quad (34)$$

Admitindo que a Terra é esférica com raio r e $H = 35.786\text{km}$ sendo a altitude de orbita do satélite. A equação pode ser reescrita como:

$$\sin \alpha = \frac{r}{r + H} \cos E \quad (35)$$

$$2\alpha = 2 \sin^{-1} \left(\frac{r}{r + H} \cos E \right) \quad (36)$$

Para obtenção da máxima cobertura, $\hat{E} = 0$, $r = 6378,15 \text{ km}$ e $H = 35.786 \text{ km}$, substituídos na equação (35):

$$2\alpha = 17,4^\circ \quad (37)$$

A latitude coberta por um satélite estacionário, em razão de \hat{E} e α :

$$\theta = 180 - (90 + E + \alpha) = 90 - E - \alpha \quad (38)$$

Com $\alpha = \alpha_{\max}$ e $E = 0^\circ$, é obtido uma latitude teórica de $\theta_{\max} = 81,3^\circ$

Na prática é recomendado uma latitude de cobertura mínima $\hat{E} = 5^\circ$, o que resulta em $\theta_{\max} = 76,3^\circ$.

3.2.5 Distância Entre um Satélite e um Ponto em Solo.

Quando a estação se encontra na mesma latitude do satélite, ou seja $\varphi_S = \varphi$, e sobre o equador, θ , a menor distância entre estes dois pontos é encontrada. Neste caso a distância

mínima é a altitude do satélite. A maior distância ocorre quando $\theta=76,3^\circ$ (cobertura mínima na prática), a qual se obtém, a partir da equação a seguir:

$$d^2 = (r + H)^2 + r^2 - 2r(r + H) \cos \theta \quad (39)$$

Substituindo valores de r e H:

$$d = \sqrt{1,8185 \cdot 10^9 - 537,859 \cdot 10^6 \sin[E + \sin^{-1}(0,15127 \cos E)]} \quad (40)$$

Desta maneira, Substituindo $\theta = 76,3$ obtém-se $d = 41.127$ km. Valores que podem ser demonstrados por meio da Tabela 6

Tabela 6 - Valores Limites de cobertura e distância.

	Latitude	Distancia d	Condições
Máxima	76,3°	41.127 km	$\varphi_s=\varphi$ e $E=5^\circ$
Mínima	0°	35.786 km	$\varphi_s=\varphi$ e $E=90^\circ$

Fonte: (GOMES, 2013).

3.2.6 Potência Irradiada de Descida

A intensidade de irradiação varia conforme a posição geográfica da estação em solo. O parâmetro que define a distribuição da energia irradiada para a região geográfica de atendimento é a potência efetivamente irradiada de descida, $EIRP_d$, dada por:

$$EIRP_d = P_{TSat} + G_{TSat}(\varphi; \theta) \quad (41)$$

Sendo:

- P_{TSat} = Potência de transmissão do satélite.
- $G_{TSat}(\varphi; \theta)$ = Ganho da antena na direção da estação em solo cuja posição é definida por sua latitude (θ) e longitude (φ).

3.2.7 Potência Irrradiada de Subida

A relação entre o ganho da antena de recepção e a temperatura equivalente de ruído é conhecida como figura de mérito de recepção, RGT:

$$\mathbf{RGT = G_R - 10 \log(T_R + T_A) \quad \left(\frac{dB}{K}\right)} \quad (42)$$

Sendo:

- T_R = Temperatura equivalente de ruído do receptor (K).
- T_A = Temperatura de ruído da antena de recepção (K).
- G_r = Ganho da antena de recepção (dB).

3.2.8 Análise de Desempenho de Rádio Enlaces

A relação entre a potência de ruído em um receptor (N_R) e a potência de uma portadora recebida (P_R), pode ser escrita como:

$$\mathbf{RPR = P_R - N_R \quad (dB)} \quad (43)$$

Os valores de P_R e N_R estão representados em dBw. E:

$$\mathbf{P_R = P_T + G_T + G_R - \sum A} \quad (44)$$

- P_T = é a potência de transmissão (dB).
- G_T = Ganho da antena de transmissão (dB).
- G_R = Ganho da antena de recepção (dB).
- $\sum A$ = Somatório de perdas no enlace (dB).
- $EIRP = P_T + G_T$

Somando (44) a (43):

$$\mathbf{RPR} = \mathbf{EIRP} + \mathbf{G_R} - \sum \mathbf{A} - \mathbf{N_R} \quad (45)$$

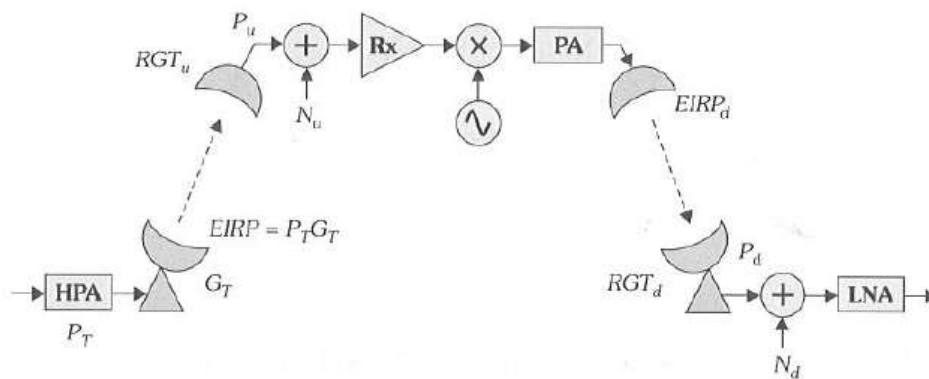
Como a potência de ruído no receptor é a potencia de ruído termica:

$$\mathbf{N_R} = \mathbf{10 \log(KTB)} \quad (\mathbf{dBw}) \quad (46)$$

- K = constante de Boltzmann(K=1,38.10⁻²³ J/K)
- T = Temperatura de ruído do sistema de recepção em Kelvin
- B = Largura de faixa em Hz.

Desta maneira o enlace geostacionario, ilustrado na Figura 14 pode ser descrito como:

Figura 14 - Rádio enlace básico geostacionário.



Fonte: (GOMES, 2013).

Em que a relação para subida (*Uplink*) é expressa por:

$$\mathbf{RPR} = \mathbf{EIRP} + \mathbf{RGT} - \sum \mathbf{A} - \mathbf{10 \log(kB)} \quad (\mathbf{dB}) \quad (47)$$

E descida (*Downlink*):

$$\mathbf{RPR} = \mathbf{EIRP} + \mathbf{RGT} - \sum \mathbf{A} - \mathbf{10 \log(kB)} \quad (48)$$

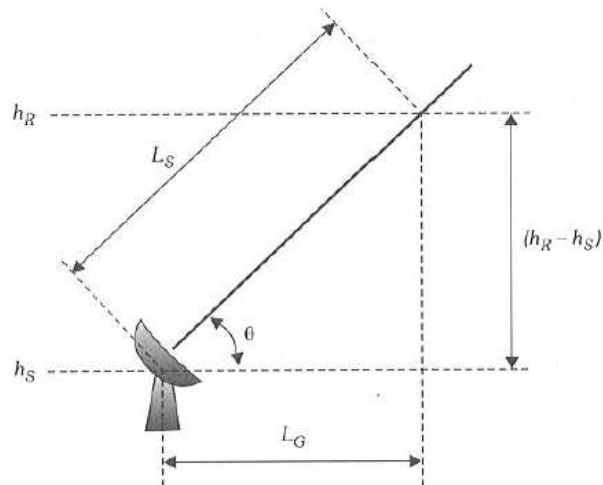
De modo que a relação portadora/ruído pode ser determinada fazendo:

$$\text{RPR} = 10 \log \left[\left(10^{\frac{(\text{RPR})_s}{10}} \right)^{-1} + \left(\left(10^{\frac{(\text{RPR})_d}{10}} \right)^{-1} \right) \right]^{-1} \quad (49)$$

3.2.9 Atenuação em Radioenlaces por Satélites

Analisando uma trajetória exemplo de um enlace em satélite, como expresso na Figura 15:

Figura 15 - Geometria para cálculo de atenuação por chuva em rádio enlaces.



Fonte: (GOMES, 2013).

Considerando h_R , em km, a altura da chuva em relação ao nível do mar. Esta medida pode ser determinada pela recomendação ITU-R P.839-3, no entanto, no Brasil, um estudo mais exato desenvolvido no CETUG-PUC-RJ é mais indicado. Este estudo afirma que:

$$h_R = 3,8 \left[1 + e^{(-0,1.R_{0,01})} \right] \quad (50)$$

D_S é o segmento de radioenlace propagado através da camada de chuva e pode ser obtido através do ângulo de elevação e da diferença de valores entre h_R e h_S (em km), representando a altura do nível do mar subtraído da elevação onde se encontra a antena.

$$L_S = \frac{(h_R - h_S)}{\sin \theta}. \quad (51)$$

Ainda é necessário o cálculo do fator de redução horizontal para 0,01% do tempo devido ao caráter aleatório do deslocamento da celula da chuva ao longo do sinal.

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + 0,78 \sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f}} - 0,38(1 - e^{-2L_G})} \quad (52)$$

E ajuste vertical:

$$\gamma_{0,01} = \frac{1}{1 + \sqrt{\sin \theta} \left(31 \left(1 - e^{-\left(\frac{\theta}{1+\chi}\right)} \right) \sqrt{\frac{L_G \cdot \gamma_R}{f^2}} - 0,45 \right)} \quad (53)$$

O valor de L_R é encontrado por meio de ζ :

$$\zeta = \tan^{-1} \left(\frac{h_R - h_S}{L_G \cdot r_{0,01}} \right) \quad (54)$$

Assim, para $\zeta > 0$:

$$L_R = \frac{L_G \cdot r_{0,01}}{\cos \theta} \quad (55)$$

E para $\zeta < 0$:

$$L_R = \frac{h_R - h_S}{\sin \theta} \quad (56)$$

De acordo com a latitude terrestre(ϕ):

Para $|\phi| < 36^\circ$

$$\chi = 36 - |\varphi| \quad (57)$$

E para $|\phi| \geq 36^\circ$

$$\chi = 0 \quad (58)$$

Desta maneira, o comprimento efetivo percorrido pela onda, sob a célula de chuva, é dado pela equação (59):

$$L_E = L_R \cdot v_{0,01} \quad (59)$$

E atenuação produzida pela chuva para as condições apresentadas pela equação (60):

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot L_E \quad (60)$$

3.2.10 Atenuação em Razão dos Gases Atmosféricos

São divididas em dois tipos: provocadas pela absorção da energia pelo ar seco; produzidas por absorção de energia pelo vapor de água. Os valores dessa atenuação podem ser exibidos conforme a Tabela 7:

Tabela 7 - Valores aproximados de atenuação específica (vapor de água + ar seco) em dB/km.

Frequência GHz	Atenuação combinada (vapor de água + ar seco) dB/km	Frequência GHz	Atenuação combinada (vapor de água + ar seco) dB/km
1	0,005	17	0,05
2	0,007	18	0,06
4	0,008	19	0,08
6	0,010	20	0,10
8	0,012	22	0,20
10	0,015	26	0,14
12	0,02	30	0,10
15	0,03	36	0,12
16	0,04	40	0,14

Fonte: (GOMES, 2013).

3.3 FIBRAS ÓTICAS

A fibra ótica teve sua origem como meras guias de onda para sinais óticos de curta distância. Após a década de 1970, inovações em relação a produção de material base para as mesmas (principalmente sílica e plástico), agiram como evento catalisador e logo as fibras tornaram-se uteis pra monitoração de grandeza e comunicação de dados a longas distâncias. As transmissões pela fibra seguem o princípio de: ao ser lançado um feixe de luz em uma extremidade, este feixe percorre toda a extensão do meio devido a sucessivas reflexões.

Conceitualmente a fibra tem vantagens sobre outros meios de transmissão por não sofrer interferências do meio externo (interferências magnéticas, por exemplo), por ter uma velocidade de transmissão de informação elevada por baixa atenuação.

A transmissão depende de equipamentos especiais, que contenham componentes foto emissores. Atualmente as tecnologias mais acessíveis são *LED's* e *Laser's*.

Algumas características devem ser entendidas e portanto, um breve resumo é suscitado.

3.3.1 Índice de Refração

Uma guia de onda ótica, constituída de duas camadas concêntricas (Núcleo e Casca) é o modo mais simples de se conduzir luz dentro de uma fibra, como exemplificado na Figura 16.

Figura 16 - Corte transversal e longitudinal de fibra ótica



Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

O índice de refração (n) é definido como a relação entre velocidade de propagação da luz no vácuo e velocidade de luz no próprio material.

$$n = \frac{c}{c_1} \quad (61)$$

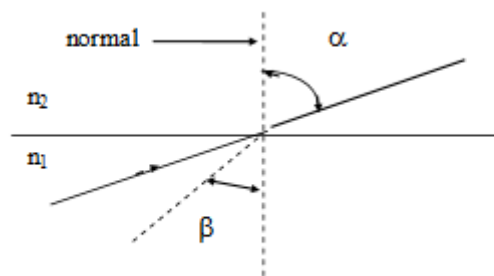
Sendo:

- C - Velocidade de Luz no Vácuo
- C_1 - Velocidade de luz no material (meio)
- n - Índice de refração

3.3.2 Lei de refração

Quando um feixe de luz, com somente um comprimento de onda (monocromática), passa por um meio cujo índice de refração equivale a n_1 em direção a outro meio com índice n_2 , este muda de direção conforme ângulo de incidência mostrado na Figura 17

Figura 17 - Índice de refração



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

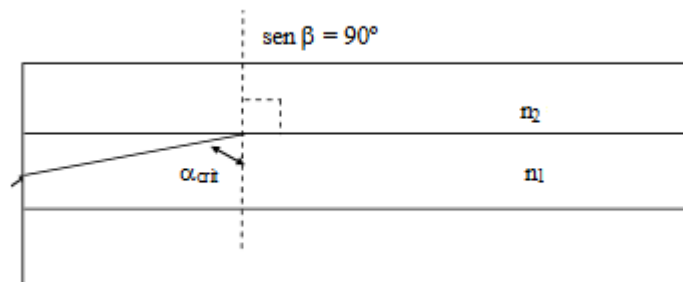
A lei de refração é regida pela relação:

$$n_1 \operatorname{sen} \alpha = n_2 \cdot \operatorname{sen} \beta \quad (62)$$

3.3.3 Ângulo crítico

Quando a luz passa por um meio com índice de refração n_1 para um meio com índice de refração n_2 (regida pela lei de refração), formando entre a secção dos meios um ângulo de 90° , este recebe o nome de ângulo crítico. A Figura 18 ilustra o ângulo crítico.

Figura 18 - Ângulo crítico



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

$$\text{Sen } \alpha_{\text{critico}} = \frac{n_2}{n_1} \cdot \text{Sen } \beta \quad (63)$$

Sendo:

$$\beta = 90^\circ$$

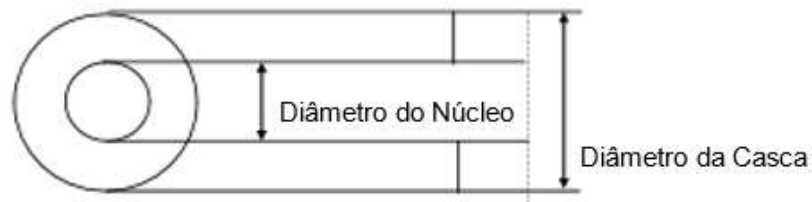
$$\text{Sen } \beta = 1$$

3.3.4 Tipos de fibras óticas

3.3.4.1 Multimodo de Índice Degrau

A fibra Multimodo de índice degrau consiste em um núcleo de 10 μ m a 50 μ m de diâmetro, revestido de uma casca com diâmetro de 100 μ m, 200 μ m ou 300 μ m, e índice de refração ligeiramente inferior ao do núcleo. Neste tipo de fibra a Luz é totalmente refletida entre o núcleo e a casca com reflexão interna total e é propagada sob a forma de zig-zag. Como o diâmetro do núcleo é menor que o comprimento da onda guiada, existe um elevado número de modos sendo transmitidos simultaneamente pela fibra, o que resulta em uma propagação em linha em degrau. A Figura 19 mostra uma fibra óptica multimodo de índice degrau

Figura 19 - Fibra Multimodo Índice Degrau



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

O cálculo do número de modos é dado pela equação (64):

$$N = \frac{V^2}{2} \quad (64)$$

Sendo:

- V = Padrão normalizado de Frequência.

Dado pela equação (65):

$$V = \left[2\pi \frac{a}{\lambda} \right] \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (65)$$

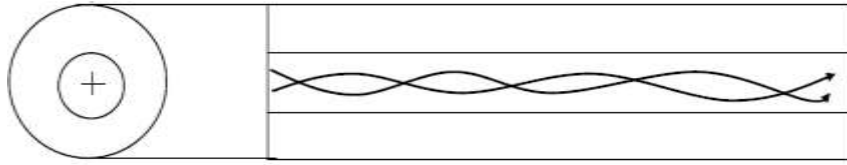
- a = Raio do núcleo
- n = índice de refração
- λ = comprimento de onda

3.3.4.2 Multimodo de Índice Gradual

Neste tipo de fibra óptica o índice de refração é maior no centro do núcleo e decresce gradualmente até a linha divisória entre o núcleo e a casca, esta recebe o nome de gradual.

Neste tipo de fibra a luz é refratada de volta ao centro do núcleo, assemelhando-se a uma propagação ondulatória, como mostra a Figura 20.

Figura 20 - Fibra multimodo gradual.



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

Como o índice de refração é variável em relação a posição distante do núcleo, nota-se que os modos de transmissão que se dirigem a outra extremidade da fibra pelo centro do núcleo, apesar de percorrerem um menor trajeto, possuem velocidades reduzidas aos modos refratados com percurso mais próximo das extremidades e, conseqüentemente, possuem velocidade superior. A forma de se calcular o seu número de modos é:

$$N = \frac{\Delta\alpha}{(2 + \alpha)} \cdot \frac{(2\pi n_1 \cdot a)^2}{\lambda} \quad (66)$$

Sendo:

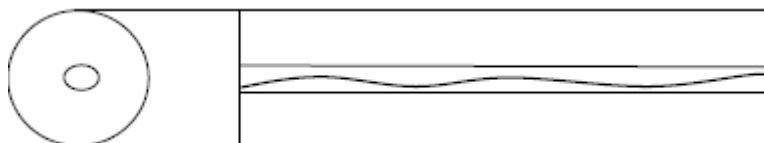
$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, é a diferença relativa entre n_1 e n_2 .

α é o número decisivo de perfil (para uma fibra ótica de índice degrau $\alpha = \infty$, para a fibra índice gradual $\alpha = 2$).

3.3.4.3 Fibras Monomodo

Neste tipo de fibra, o diâmetro do núcleo é muito menor que o diâmetro da casca, em contrapartida, seu índice de refração da casca é ligeiramente menor que o índice de refração do núcleo, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Fibra ótica monomodo



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

Esta fibra em geral possui $\Delta \cong 0,002$ e, como dito por seu nome, suporta apenas um modo de propagação para um comprimento particular de onda (λ). Para que isso ocorra, o padrão normalizado de frequência é:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \cdot (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (67)$$

3.3.5 Conceitos Para Projeto de Enlace Óptico

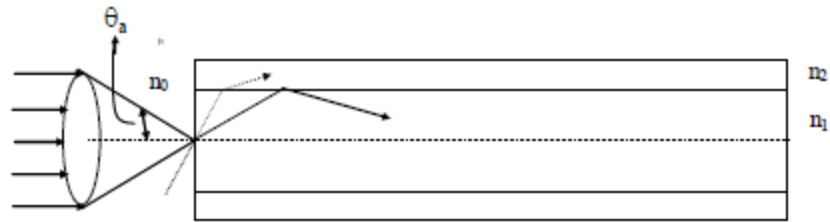
O cálculo total de atenuação ótica deve manter as exigências de potência média disponível no transmissor e sensibilidade no receptor, assim como manter a transmissão dentro da taxa de erro admissível. Para encontrar os parâmetros que suportam estas premissas, deve-se levar em consideração:

- Atenuação máxima das emendas por fusão;
- Atenuação máxima dos conectores;
- Potência de saída de transmissão;
- Sensitividade do receptor.
- Absorção Material
- Variações geométricas
- Espalhamento de Rayleigh
- Efeito Núcleo – Casca

3.3.6 Acoplamento de Fonte Luminosa

A Figura 22 mostra o ângulo de aceitação de uma fibra ótica

Figura 22 - Ângulo de aceitação



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

O seno de maior “Ângulo de aceitação”, ou seja, ângulo máximo do cone de aceitação na entrada da fibra óptica em relação ao eixo da mesma, recebe o termo técnico de “Abertura Numérica”, e pode ser expressa como:

$$AN = n_0 \text{sen} \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (68)$$

Sendo:

- n_0 = índice de refração do ar;
- n_1 = índice de refração do núcleo;
- n_2 = índice de refração da casca.

AN pode ser determinado pelo índice de refração do núcleo e da casca:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (69)$$

Sendo o caso de $\Delta \ll 1$:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (70)$$

Considerando a equação (70) e adicionando a informação $n_0 = 1$ para o ar:

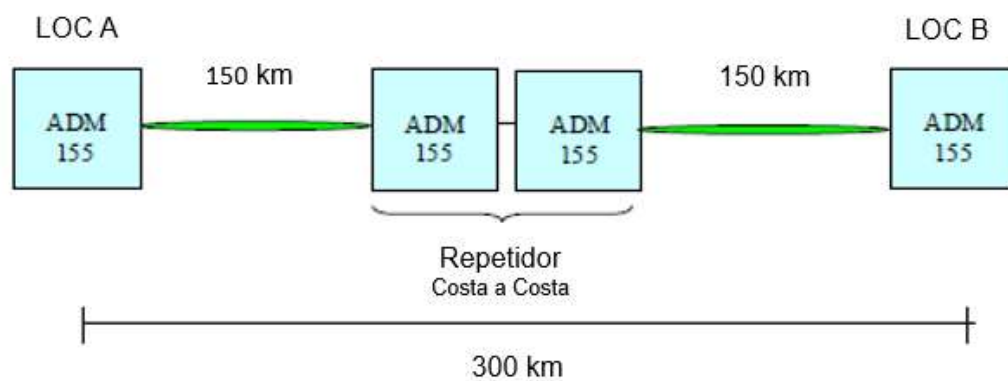
$$AN = n_2\sqrt{2\Delta} \quad (71)$$

3.3.7 Dimensionamento

O dimensionamento técnico de um enlace de fibras exige o atendimento de requisitos de potência e dispersão.

Para o desenvolvimento dos cálculos duas localidades A e B estão exemplificadas na Figura 23:

Figura 23 - Exemplo fibras óticas com repetidores



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

A seguir é considerada a atenuação presente no sistema.

Esta degradação, de um ponto de vista extremamente simplificado, pode ser compensada pelo aumento na amplitude do sinal ótico disponível. Após esta simplificação são levantados os itens que serão considerados no projeto:

Equipamentos de transmissão e recepção:

- P_{tx} = Potência do transmissor (dBm) - máxima e mínima
- P_{Rx} = Potência do receptor ótico (dBm) – máxima e mínima
- M = Margem de segurança (dB)
- Dmax = Dispersão máxima suportada pelo equipamento de recepção

Cabo ótico:

- U_c = Atenuação do cabo (dB/km);
- L_t = Comprimento total do cabo (km);
- U_s = Perda nas emendas (dB);
- N_s = Número de emendas no cabo;
- U_{CON} = Perda nos conectores (dB);
- N_{CON} = Número de conectores.

Deste modo, o cálculo para a potência:

$$P_{tx} - N_{CON} \cdot U_{CON} - N_s \cdot U_s - U_c \cdot L_t - P_{Rx} - M > 0 \quad (72)$$

3.3.8 Espalhamento de Brillouim

Para potências elevadas de transmissão, geralmente maiores de 18 dBm, o fenômeno de espalhamento de Brillouim (SBS) pode ser observado. Este efeito resulta da transferência de potência de um modo para si mesmo, principalmente na direção contrária de propagação e em frequência diferente.

O espalhamento de Brillouim é agravado em fibras com núcleos menores, dispersão deslocada, por exemplo, e quanto menor a largura espectral dos *lasers* de sinal utilizado.

O limiar de Brillouim (Potência mínima na qual o espalhamento é iniciado) é dado pela equação (73):

$$P_{\text{Brillouim}} = 4,4 \cdot 10^{-3} \cdot d^2 \cdot \lambda^2 \cdot \alpha_t \cdot \nu \quad (73)$$

Sendo:

- d = diâmetro do núcleo da fibra (mm);
- λ = comprimento da onda de operação (μm);
- α_t = atenuação da fibra (dB/km);
- ν = largura de faixa da fonte luminosa (GHz).

3.3.9 Amplificadores

Os amplificadores são elementos chave dentro do projeto de enlaces óticos por proverem rendimentos adequados de potência e ganho.

Os amplificadores são elementos ativos comuns na eletrônica. São utilizados quando se faz necessário o aumento de intensidade de sinais, seja em situações de acoplamento ou intermediárias.

Em sistemas de telecomunicações os amplificadores funcionam com duas principais funções, ou para aumentar a potência de sinais fracos, ou para elevá-las devido a reduções no sinal por motivo de percurso.

3.3.10 Amplificadores Óticos

Considerados um dos pontos mais importantes de sistemas de comunicações óticas são referenciados com *Optical Amplifiers* (OA). Sua principal função é amplificar os sinais óticos de entrada, independentemente do modo de modulação utilizada, propagando o sinal por distâncias maiores sem a necessidade de regeneradores.

Um amplificador ótico é definido por suas características principais de:

- Faixa de Operação [nm]
- Faixa de Variação de Potência de Entrada [dBm]
- Faixa de Variação de Ganho [dB]
- Figura de Ruído [dB]
- Potência de Saída [dBm]
- Eficiência da Conversão de Potência[%]
- PDG (*Polarization Dependent Gain*)[dB]
- PMD (*Polarization Mode Dispersion*)[ps]

Dividindo os amplificadores óticos em duas categorias, *Optical Fiber Amplifier* (OFA) e *Optical Wave Guide Amplifier* (OWGA), é possível subdividi-los da seguinte maneira e bandas de atuação conforme Figura 24 e Figura 25

Figura 24 - Comprimento de onda ótica por bandas.



Fonte: (Keiser, 2014)

Figura 25 - Descrição de bandas óticas.

Nome	Designação*	Espectro (nm)	Origem do nome
Banda original	Banda O	1.260 a 1.360	Primeira região (original) usada em conexões de fibras monomodo
Banda estendida	Banda E	1.360 a 1.460	Essa conexão pode ser utilizada para fibras com baixa concentração de água
Banda curta	Banda S	1.460 a 1.530	Comprimentos de onda menores que na banda C, mas maiores que na banda E
Banda convencional	Banda C	1.530 a 1.565	Comprimento de onda utilizado por amplificador de fibra dopada com érbio (EDFA)
Banda longa	Banda L	1.565 a 1.625	O ganho de uma EDFA diminui progressivamente até 1 no limite dessa banda de comprimento de onda longo (1.625 nm)
Banda ultralonga	Banda U	1.625 a 1.675	Região além da capacidade de resposta para uma EDFA

* N. de T.: As denominações O, E, S, C, L e U referem-se às denominações em língua inglesa: *original, extended, short, conventional, long e ultra-long*, respectivamente.

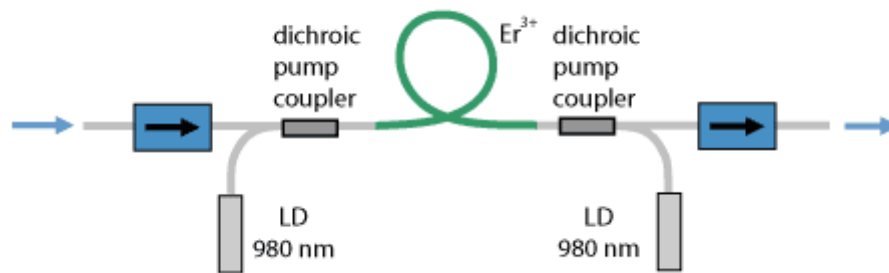
Fonte: (Keiser, 2014)

3.3.10.1 *Optical Fibre Amplifier (OFA)*

EDFA (*Erbium Doped Fibre Amplifier*) [Banda C e L]

Um exemplo é demonstrado na Figura 26. Uma fibra dopada de érbio, tipicamente uma fibra monomodo. A onda é injetada (“*Pumped*”) a partir de dois diodos *laser* e tem um comprimento de onda que fica por volta dos valores de 980 nm a 1450 nm. Esta onda injetada excita os ions de érbio (Er^{3+}) que ao retornar a seu estado natural amplificada a luz no comprimento de 1,5 μm .

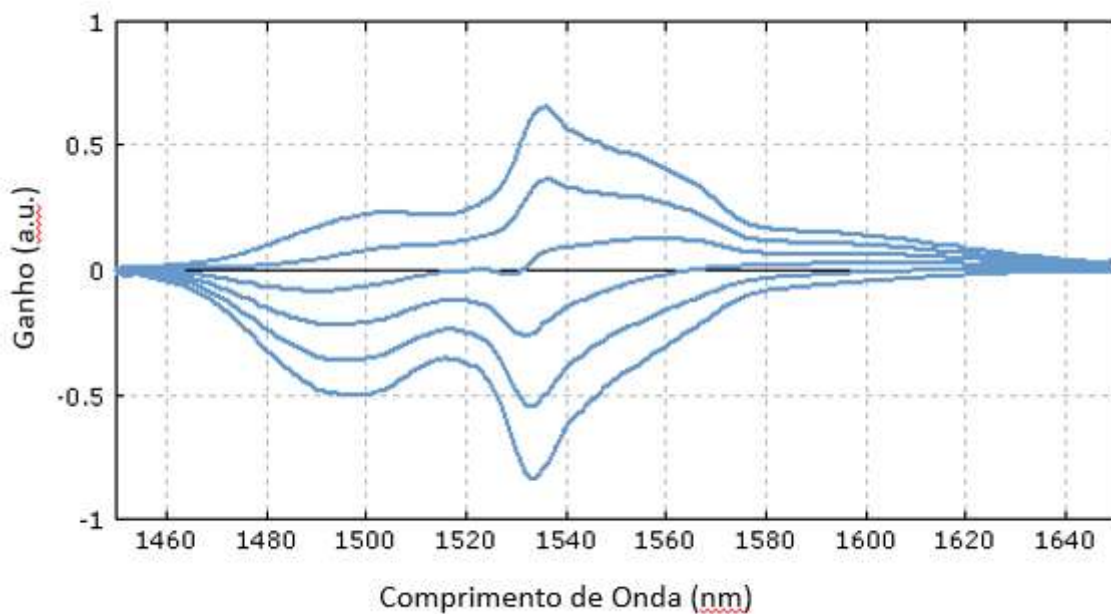
Figura 26 - EDFA



Fonte: (PASCHOTTA, 2016)

Como referência a Figura 27 demonstra o grau de absorção e emissão dos íons de érbio em um meio de fosfato.

Figura 27 - Ganho e absorção do érbio.



Fonte: (PASCHOTTA, 2016)

RA (*Raman Amplifier*) [Banda O a L]

Os amplificadores que se baseiam no efeito de espalhamento Raman. Não tem características lineares, pois o aumento entre a injeção de luz e o ganho também não o é. O efeito de Raman se baseia na publicação por Chandrasekhara Raman de seu trabalho (**DIFRAÇÃO MOLECULAR DA LUZ, 1928**). Tem como base a existência de moléculas de

fóton que quando dispersadas possuem características diferentes de energia, ou seja, frequência, que sua molécula matriz. A partir deste fundamento é possível criar dois tipos de amplificadores RAMAN; distribuído, a partir de uma multiplexação do comprimento de onda da fibra com o comprimento de onda injetado; ou conjugado (“*Lumped*”), Utiliza um pequeno comprimento de fibra para causar este efeito.

Os parâmetros dominantes que influem no alcance dos sistemas óticos de comunicações são a potência do transmissor e sensibilidade do receptor, atenuação da fibra utilizada e dispersão da mesma. A limitação que estes parâmetros impõem pode ser superada pela regeneração periódica do sinal. A regeneração consiste na conversão ótica-eletrica-ótica do sinal e, há alguns anos, é realizada utilizando amplificadores óticos mais baratos, que portanto, ficaram popularizados. Outros tipos de OFA podem ser utilizados como:

- **EYDFA (E rbiu m Y tterbiu m D oped F ibre A mplifier)** [Banda C e L]
- **PDFFA (Praseodymium D oped F luoride F ibre A mplifier)** [Banda O]
- **TDFFA (T hulium D oped F luorid F ibre A mplifier)** [Banda S]

3.3.10.2 *Optical Wave Guide Amplifier (OWGA)*

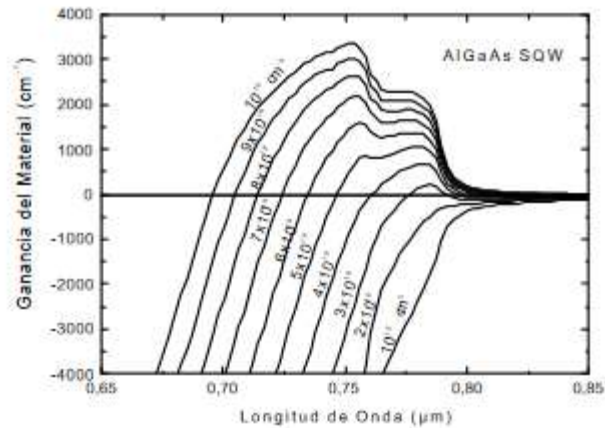
Os Amplificadores Óticos baseados em Guias de Onda Óticas (**OWGA**), podem ser subdivididos da seguinte forma:

SOA (Amplificador ótico de ganho fixo) [Banda O e S]

Basicamente é um *laser* que opera abaixo de seu ponto de limiar, com pico de ganho que pode ser escolhido entre qualquer banda estreita de comprimento de onda até 1280nm (Banda S) a 1650nm (Banda O). Pode ser ainda subdividido em dois tipos de construção Fabry-Perot e Quase-onda progressiva (NTW)

Como principal vantagem sua capacidade de combinação, ou seja, ser utilizado tanto com ganho positivo quanto negativo como uma chave ótica, com controle realizado via corrente elétrica. Demonstrado na Figura 28

Figura 28 - Espectro de ganho SOA



Fonte: (MIRANDA, 2016)

Outro tipo de amplificador é o EDWA (*Erbium Doped Waveguide Amplifier*) [Banda O e C]

3.3.11 Amplificadores no Sistema Ótico

Conforme a localização dos amplificadores, os mesmos recebem diferentes denominações. Assim, quanto a sua posição: quando utilizados imediatamente após o multiplexador são conhecidos como amplificadores de potência. De mesmo modo, quando utilizados no meio de um enlace, como regeneradores, amplificadores de linha e, quando imediatamente antes de um demultiplexador, pré amplificadores.

No caso de um amplificador de potência não ser suficiente para vencer perdas do enlace, a recomendação é a de acréscimo de um amplificador no lado oposto do enlace, atendendo, então, a relação:

$$P'_{tx} - N_{CON} \cdot U_{CON} - N_s \cdot U_s - U_c \cdot L_t - P'_{Rx} - M > 0 \quad (74)$$

Sendo:

- P'_t e P'_R são os novos valores de potência de transmissão e recepção.

O uso de um amplificador óptico de linha, substitui em muitos casos a regeneração elétrica. Com seu uso a equação de balanceamento de potência torna-se:

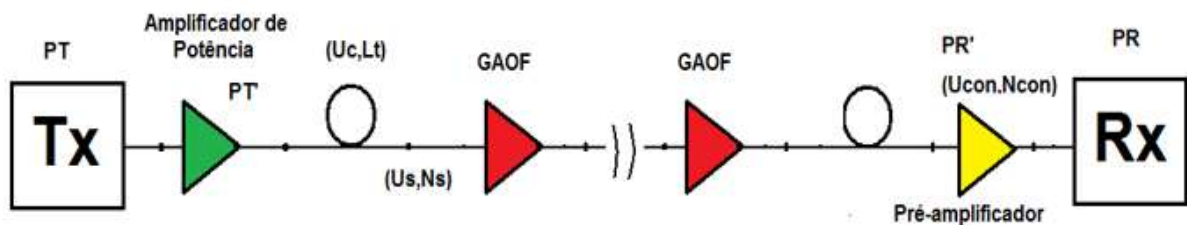
$$P_{tx} - N_{CON}U_{CON} - N_s \cdot U_s - U_c \cdot L_t - P_{Rx} - M + G_{AOF} > 0 \quad (75)$$

Finalizando, uma equação completa poderia ser escrita como:

$$P'_t - N_{CON}U_{CON} - N_s \cdot U_s - U_c \cdot L_t - P'_R - M + nG_{AOF} > 0 \quad (76)$$

A representação de um sistema segue ilustrada na Figura 29:

Figura 29 - Representação gráfica de um sistema de Fibra Ótica com amplificadores.



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

- PT = Potência de Transmissão (dBm);
- PT' = Potência na saída do AOF (dBm);
- PR = Sensibilidade de Receptor (dbm)
- PR' = Sensibilidade do Pré-amplificador (dBm);
- Ucon = Perda do conector ótico;
- Ncon = Número de Conectores do Enlace;
- Us = Perda de Emendas da Fibra (dB);
- Ns = Número de emendas do enlace;
- Uc = Perda da fibra no cabo (dB/km);
- Lt = Comprimento do Cabo (km);
- GAOF = Ganho do Amplificador (dB).

Existem alguns parâmetros que devem ser considerados sobre amplificadores óticos e devem ser observados sob o ponto de vista do próprio equipamento e sua influência na rede. Os pontos que merecem atenção são:

- Ganho (G_{AOF})
- Figura de Ruído (NF)
- Banda de Amplificação (B_{ampl})

- Potência de ASE (P_{ASE})

Se P_{in} é a potência óptica de entrada e P_{out} é a potência óptica de saída no amplificador, o Ganho (G_{AOF}) pode ser definido como:

$$G_{amp}^L = \frac{P_{out} - P_{ASE}}{P_{in}} \quad (77)$$

- P_{ASE} = Potência de ruído (Emissão espontânea amplificada – ASE)
- G_{amp} = expressa o quanto a potência óptica de entrada foi elevada.

O parâmetro que trata o quanto o amplificador ótico acrescenta ao ruído do sinal amplificado denomina-se Figura de ruído (NF) e é dado simplifcadamente pela equação (78):

$$NF^L = \frac{1,66 \cdot 10^{-17} \cdot P_{ASE} \cdot \lambda^3}{(G_{AOF} - 1) \cdot B_0} \quad (78)$$

Estas soluções são observadas na introdução de sistemas WDM e DWDM e suas múltiplas portadoras

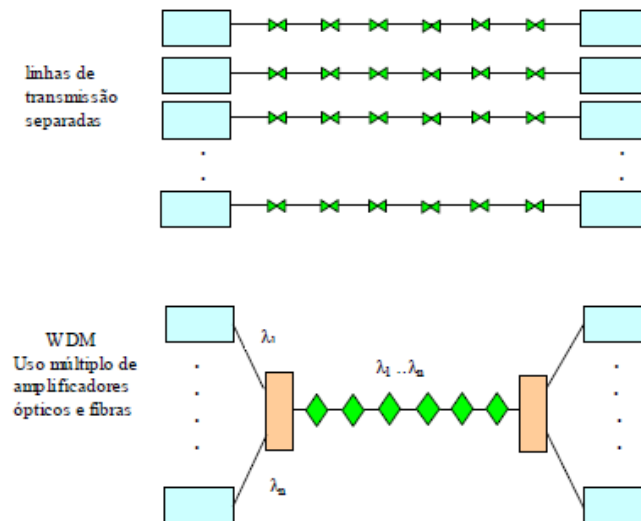
3.3.12 Sistema WDM

WDM é um conjunto de meios e equipamentos com capacidade para otimizar o uso de redes em fibras óticas, permitindo a inserção de mais de um sistema de telecomunicações em uma única fibra. Utiliza multiplexação ótica com diversos sinais de diferentes comprimentos de onda para este compartilhamento possui elevada flexibilidade para diversas aplicações existentes, como PDH e SDH, ATM e IP. Esta rede apresenta algumas vantagens como tráfego de qualquer tecnologia em seu sistema (uso de transponders) e possibilidade de utilização de

redes pre existentes em pontos de instalação. No entanto, como não existe um padrão no uso de aparelhos, estes ficam limitados ao tipo escolhido pela rede. WDM é demonstrado na

Figura 30

Figura 30 - WDM



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

Um sistema WDM necessita de uma definição de espaçamento entre os canais óticos nele contido. Desta maneira, sua capacidade fica limitada a este número, que pode variar de 200 GHz a 12,5GHz, limitado pelas normas G.694.1 (DWDM) e G.694.2 (CWDM) do ITU-T (TUDE, E, 2016).

- **CWDM** (*Coarse Wave Division Multiplex*): sua multiplexação ótica possui 200 GHz de espaçamento podendo variar a quantidade de canais de 4 a 16.
- **DWDM** (*Dense Wave Division Multiplex*): sua multiplexação ótica possui espaçamento que varia de 25 GHz a 100 GHz, com quantidade variável de canais de 16 a 128.
- **UDWDM** (*Ultra Dense Wave Division Multiplex*): sistema cuja multiplexação ótica possui espaçamento menor que 25 GHz e possui uma quantidade de canais superior a 128.

Tabela 8 - Comparação entre CWDM e DWDM

Características	CWDM	DWDM
Número de comprimentos de onda que podem ser combinados em uma única fibra	16	64
Faixa de comprimento de onda	1310 nm a 1610 nm	1492,25 nm a 1611,79 nm
Espaçamento entre canais	20 nm	100 GHz (0.8 nm)
Bandas ópticas utilizadas	O, E e C	S, C e L
Áreas de aplicações	Redes Metropolitanas	Aplicações ponto-a-ponto
Densidade, devido ao espaçamento entre os canais	Baixa	Alta

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

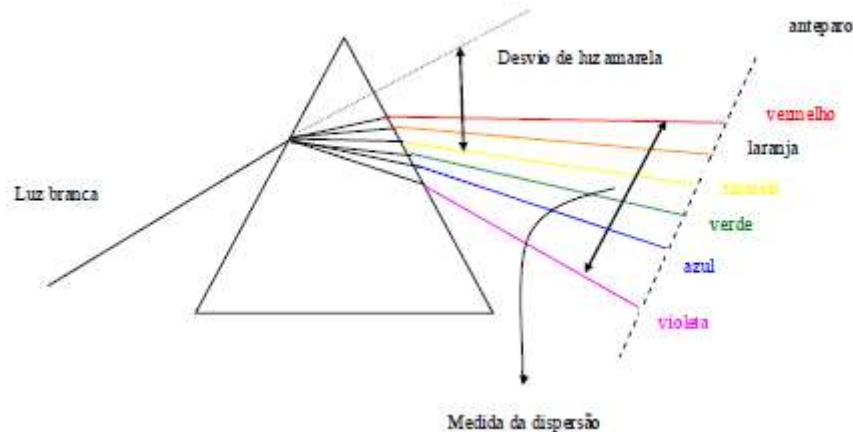
3.3.13 Dispersão

A velocidade das ondas de luz no vácuo é constante, todavia, a velocidade em um meio material varia com o comprimento de onda como já tratado anteriormente.

É chamado de dispersão a propriedade da luz percorrer um material com diferentes velocidades devido aos diferentes comprimentos de onda resultante.

O exemplo mais comum de observação deste fenômeno é utilizar um prisma: um raio de luz branca (mistura de todas as cores) percorre o vácuo e incide em um prisma. Como o índice de refração muda entre o vácuo e o prisma as ondas de diferentes velocidades são desviadas. Diz-se, então, que a luz foi dispersada em um espectro.

Figura 31 - Dispersão por meio de prisma



Fonte: (SILVEIRA, 2009).

Em geral, ocorre uma degradação de sinal resultante do fenômeno da dispersão. Esta degradação muitas vezes não pode ser totalmente compensada por um mero aumento de sinal. As componentes de frequência mais baixas podem chegar ao receptor em instantes diferentes das componentes de alta frequência desse pulso. Para comprovar a viabilidade do enlace sob o ponto de vista da dispersão devemos aplicar a equação (79):

$$L_t \leq \frac{0,31 \cdot 10^6}{D \cdot B \cdot \Delta\lambda} \quad (79)$$

Sendo:

- L_t = Comprimento Total do Enlace.
- D = Dispersão da Fibra em ps/nm.km.
- B = Taxa de transmissão em GBit/s.
- $\Delta\lambda$ = Largura Espectral da Fonte Óptica (nm).

O sistema de transmissão por fibra ótica, por meio desta relação, pode ser considerado satisfatório se apresentar penalidade inferior a 1 dB.

4 PROJETO

4.1 PREMISSAS PARA O PROJETO DE RÁDIO ENLACE

Para exemplificar a teoria exposta neste trabalho, foi considerado 1 par de localidades para efeito de cálculo.

As premissas foram utilizadas para simplificar algumas situações e modelos para aprofundar-se em outros. Foram utilizadas as seguintes exposições:

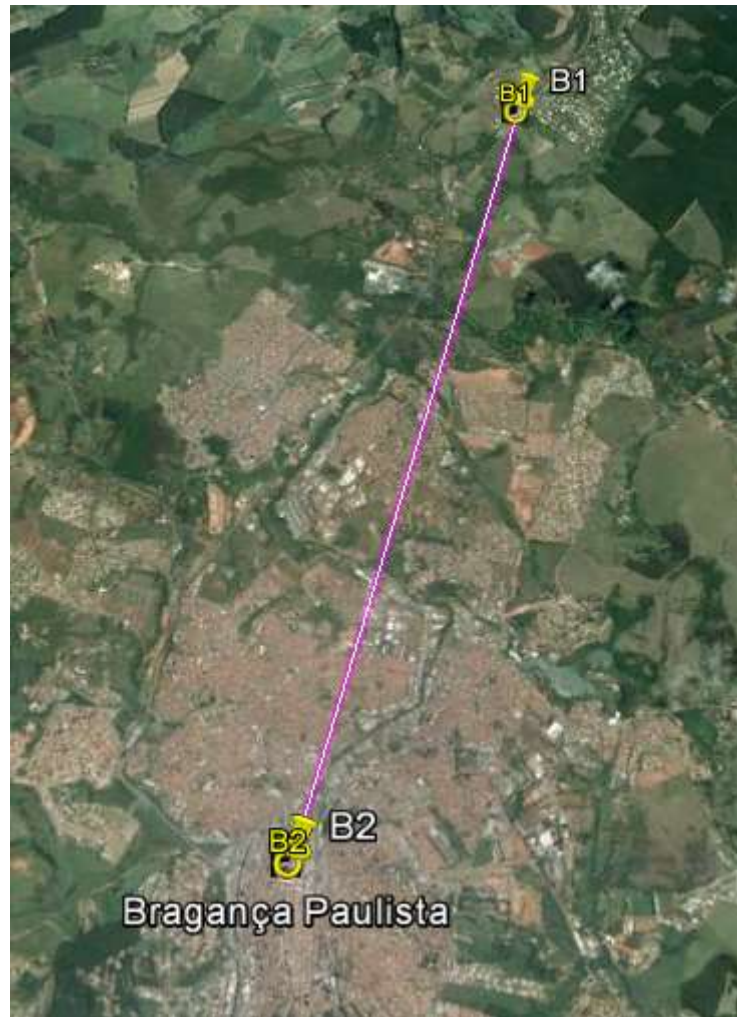
1. As localidades foram definidas não considerando características urbanas que as envolvem.
2. Não foi utilizado a rede de nenhuma prestadora de serviços existente, de modo a exemplificar a criação de uma rede própria.
3. As partes legais a que se refere o projeto foram simplificadas não considerado legislações específicas presente nas localidades escolhidas.
4. Os preços exemplificados no projeto foram baseados em valores reais do ano de 2014.
5. As localidades simulam a criação de enlaces de média distância (1 km a 30 km).
6. As antenas não têm perdas (toda a potência aplicada é radiada)
7. Não foram consideradas antenas de repetição entre os sites.
8. Valores com base em crescimento de vegetação ou presença de edificações foram desconsiderados.

4.1.1 Localidades

Estas são conforme coordenadas, ilustradas na Figura 32:

- **Link** – Bragança Paulista - B1 (22°53'5.73"S 46°32'19.38"O) - Bragança Paulista Centro - B2(22°57'9.56"S 46°32'32.46"O)

Figura 32 - Link Bragança Paulista



Fonte: (Google Earth, 2016).

A visão topográfica do enlace está representado pelas Figura 33 e Figura 34

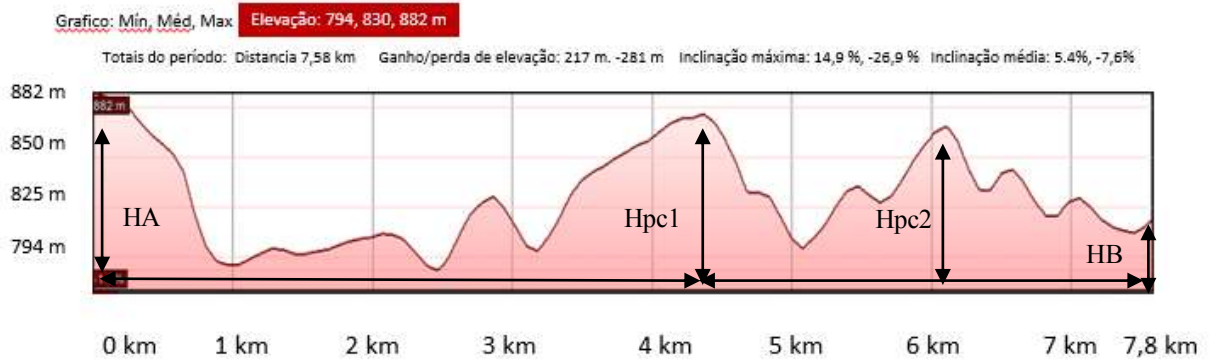
Figura 33 - Topografia Link Bragança Paulista



Fonte: (Produção do próprio autor utilizando Google Earth, 2016).

Os obstáculos críticos foram definidos como Hpc1 e Hpc2.

Figura 34 - Topografia Link Bragança Paulista e Valores



Fonte: (Produção do próprio autor utilizando Google Earth, 2016).

4.2 RADIO ENLACE

O enlace pode ser resumido como a Tabela 9 - Dados do Projeto:

Tabela 9 - Dados do Projeto

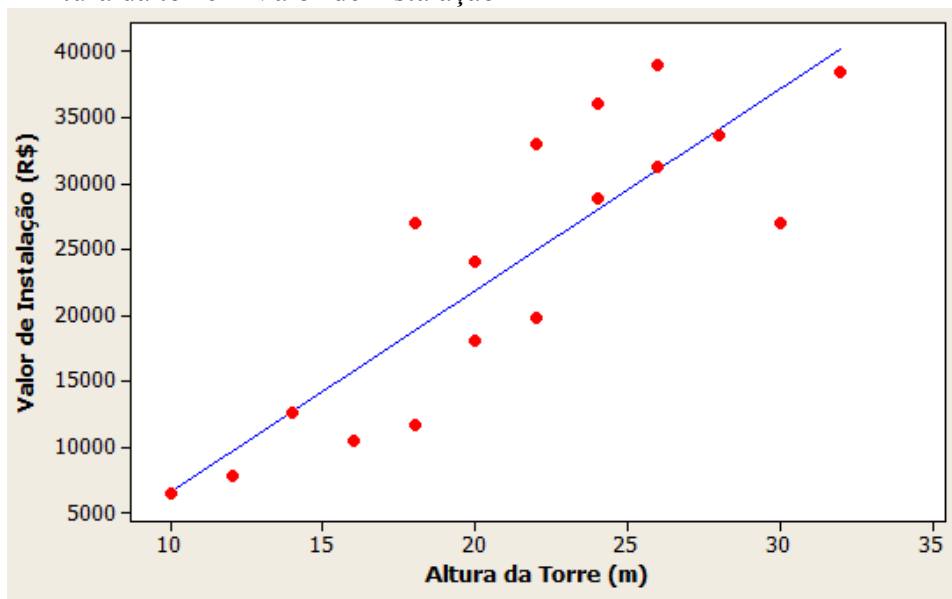
Características do Enlace	
Altura do ponto A	882 m
Altura do Ponto B	828 m
Distância Total	7,58 km
Distância A até obstáculo 1	4,37 km
Distância A até obstáculo 2	6,09 km
Distância B até obstáculo 1	3,21 km
Distância B até obstáculo 2	1,49 km
Altura do obstáculo 1	865 m
Altura do obstáculo 2	858 m
$k=4/3$	1,33
k_{minimo}	0,66

Fonte: Produção do próprio autor.

4.2.1 Altura da Torre

Para a definição da altura da torre de projeto foram estudados 36 orçamentos para a construção da mesma, as cotações foram obtidas através das empresas (HORTOTELECOM / JBT TELECOM). A torre usada como referência é feita de aço galvanizado, autoportante. O resultado em meio gráfico para diversos valores de altura resultante é expresso como a Figura 35 - **Altura da torre x Valor de instalação**:

Figura 35 - Altura da torre x Valor de instalação



Fonte: (Produção do próprio autor; Matlab, 2016).

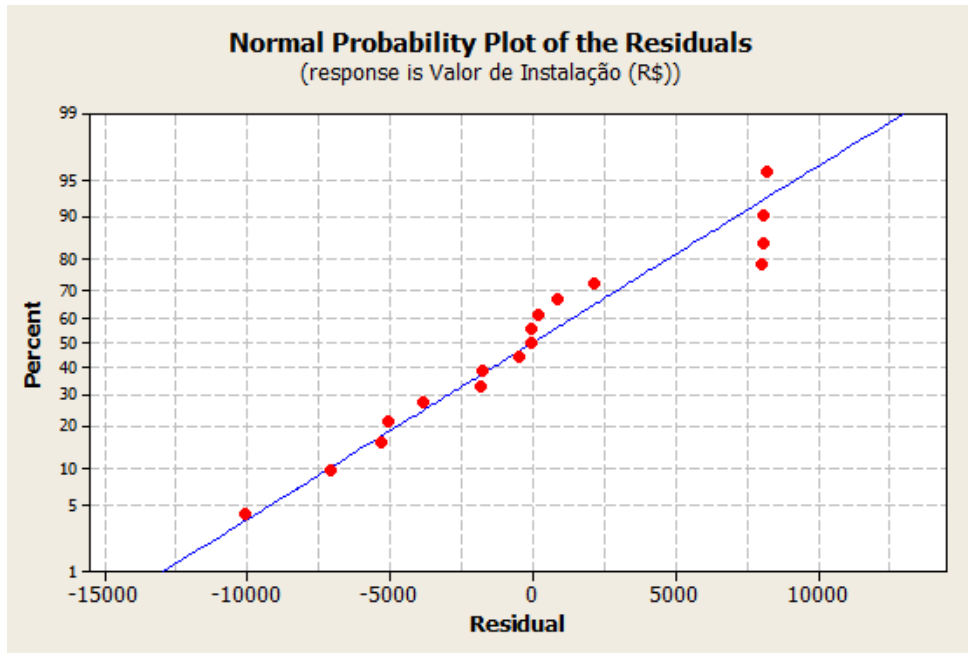
Para a análise de resíduos e verificação do coeficiente de regressão:

$$R^2 = 74,3\% \quad R^2(\text{ajustado}) = 72,6\%$$

O coeficiente de regressão (R^2) é uma medida de ajustamento de modelo estatístico linear. Este valor varia entre 0 e 1, indicando em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor (mais próximo de 1) melhor o modelo, ou maior a quantidade de fatores explicados pelo mesmo. Deste modo, 74,3% da amostra pode ser explicada pelo modelo.

Os resíduos da amostra afirmam estes valores, e torna possível o modelo ser adotado para referência neste estudo, conforme Figura 36 - Distribuição de resíduos.

Figura 36 - Distribuição de resíduos.



Fonte: (Produção do próprio autor utilizando Minitab, 2016).

Como a amostra de dados é mais homogênea entre as alturas de 10m a 26m, foi considerado para o projeto uma altura de antena que se encontre entre estes valores. A equação de valor de instalação pode ser então modelada como:

$$V_{\text{instalação(R\$)}} = -8698 + 1527 H_{\text{Antena}}$$

Para:

$$10\text{m} < H_{\text{Antena}} < 26\text{m}$$

Deste modo, uma aproximação de valores para altura da torre x valor de instalação pode ser expresso como a Tabela 10 - Custo de instalação x altura da torre

Tabela 10 - Custo de instalação x altura da torre

Valor de instalação	Altura da Torre (m)
R\$ 6.572,00	10
R\$ 8.099,00	11
R\$ 9.626,00	12
R\$ 11.153,00	13
R\$ 12.680,00	14
R\$ 14.207,00	15
R\$ 15.734,00	16
R\$ 17.261,00	17
R\$ 18.788,00	18
R\$ 20.315,00	19
R\$ 21.842,00	20
R\$ 23.369,00	21
R\$ 24.896,00	22
R\$ 26.423,00	23
R\$ 27.950,00	24
R\$ 29.477,00	25
R\$ 31.004,00	26

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

4.2.2 Cálculo Enlace

Para o primeiro obstáculo do percurso (obstáculo 1), utilizando como referência as equações (14) e (15):

$$H_{k\text{medio}} = \frac{d_1 \cdot d_2}{k \cdot 12,740} = \frac{4,37 \cdot 3,21}{1,33 \cdot 12,740} = 0,828 \text{ m}$$

$$H_{k\text{minimo}} = \frac{d_1 \cdot d_2}{k \cdot 12,740} = \frac{4,37 \cdot 3,21}{0,66 \cdot 12,740} = 1,67 \text{ m}$$

Substituindo valores nas equações (16),(17) e (18) :

$$100\%R_F = 547,72 \sqrt{\frac{4,37 \cdot 3,21}{f(4,37 + 3,21)}}$$

$$60\%R_F = 0,6 * 547,72 \sqrt{\frac{4,37 * 3,21}{f(4,37 + 3,21)}}$$

Considerando a frequência mínima como sendo 11 GHz para premissa de projeto.

$$100\%R_F = 547,72 \sqrt{\frac{4,37 * 3,21}{11 * (4,37 + 3,21)}} = 6,981$$

$$60\%R_F = 0,6 * 547,72 \sqrt{\frac{4,37 * 3,21}{11 * (4,37 + 3,21)}} = 4,188$$

$$H_{ckmedio} = H_{kmedio} + 60\%R_F = 4,188 + 1,67 m = 5,856 m$$

$$H_{ckminimo} = H_{kminimo} + 100\%R_F = 6,981 + 8,28 m = 15,261 m$$

Partindo dos mesmos cálculos para o Obstáculo 2:

$$H_{kmedio} = \frac{d_1 \cdot d_2}{k \cdot 12,740} = \frac{6,09 * 1,49}{1,33 * 12,740} = 0,536 m$$

$$H_{kminimo} = \frac{d_1 \cdot d_2}{k \cdot 12,740} = \frac{6,09 * 1,49}{0,66 * 12,740} = 1,079 m$$

$$100\%R_F = 547,72 \sqrt{\frac{6,09 * 1,49}{10^4 * (6,09 + 1,49)}} = 5,993 m$$

$$60\%R_F = 0,6 * 547,72 \sqrt{\frac{6,09 * 1,49}{10^4 * (6,09 + 1,49)}} = 3,596 m$$

$$H_{ckm\u00e9dio} = H_{km\u00e9dio} + 60\%R_F = 3,596 + 1,079 \text{ m} = 4,676 \text{ m}$$

$$H_{ckm\u00ednimo} = H_{km\u00ednimo} + 100\%R_F = 5,993 + 0,536 \text{ m} = 6,529 \text{ m}$$

Desta maneira, para o obst\u00e1culo 1, conforme Tabela 11 - Caracter\u00edsticas finais do enlace - Obst\u00e1culo A.:

Tabela 11 - Caracter\u00edsticas finais do enlace - Obst\u00e1culo A.

60 % raio de Fresnel no ponto cr\u00edtico	R _F 60%	4,189
100 % raio de Fresnel no ponto cr\u00edtico	R _F 100%	6,981
Corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para K=4/3	H _{km\u00e9dio}	0,882
Corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para K=m\u00ednimo	H _{km\u00ednimo}	1,67
60% do raio de Fresnel + corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para K=4/3	H _{ckm\u00e9dio}	5,856
100% do raio de Fresnel + corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para Km\u00ednimo	H _{ckm\u00ednimo}	15,261

Fonte: (Produ\u00e7\u00e3o do pr\u00f3prio autor, 2016).

Ao repetir os c\u00e1lculos para o obst\u00e1culo 2 s\u00e3o obtidos os seguintes valores de modelo, conforme Tabela 12 - Caracter\u00edsticas finais do enlace - Obst\u00e1culo .

Tabela 12 - Caracter\u00edsticas finais do enlace - Obst\u00e1culo B

60 % raio de Fresnel no ponto cr\u00edtico	R _F 60%	3,596
100 % raio de Fresnel no ponto cr\u00edtico	R _F 100%	5,993
Corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para K=4/3	H _{km\u00e9dio}	0,536
Corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para K=m\u00ednimo	H _{km\u00ednimo}	1,079
60% do raio de Fresnel + corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para K=4/3	H _{ckm\u00e9dio}	4,676
100% do raio de Fresnel + corre\u00e7\u00e3o da curvatura da Terra para Km\u00ednimo	H _{ckm\u00ednimo}	6,529

Fonte: (Produ\u00e7\u00e3o do pr\u00f3prio autor, 2016).

Para o c\u00e1lculo de altura das antenas, considerando os piores casos para obst\u00e1culos 1 e 2:

Para K_{m\u00e9dio}

$$h_B = \frac{d(H_{pc} + h_{ckm\u00e9dio} - HB) - d_2(HA + h_A - HB)}{d_1}$$

Para $K_{\text{mínimo}}$

$$hB = \frac{d(Hpc + h_{ck\text{mínimo}} - HB) - d2(HA + hA - HB)}{d1}$$

Sendo considerado o mínimo para o projeto uma antena em hA de 10 m e máxima de 26m, conforme Tabela 13:

Tabela 13 - Altura da Antena (Obstáculo A + B)

Antena A (m)	Antena B (m)			
	Obstáculo 1		Obstáculo 2	
	$K=4/3$	$K_{\text{mínimo}}$	$K=4/3$	$K_{\text{mínimo}}$
10	12,73	11,06	26,85	25,28
11	11,99	10,33	26,6	25,03
12	11,26	9,59	26,36	24,79
13	10,52	8,86	26,11	24,54
14	9,79	8,12	25,87	24,3
15	9,05	7,39	25,62	24,06
16	8,32	6,65	25,38	23,81
17	7,58	5,92	25,13	23,57
18	6,85	5,18	24,89	23,32
19	6,12	4,45	24,64	23,08
20	5,38	3,72	24,4	22,83
21	4,65	2,98	24,16	22,59
22	3,91	2,25	23,91	22,34
23	3,18	1,51	23,67	22,1
24	2,44	0,78	23,42	21,85
25	1,71	0,04	23,18	21,61
26	0,97	-0,69	22,93	21,36

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016)

Observa-se que devido a uma limitação imposta pela altura necessária para a antena em B, os valores em A podem ser descartados.

Com base no preço obtido pela modelagem, considerando os piores casos, neste caso para $k=4/3$. Os tamanhos de antenas foram descrito com base em valores inteiros conforme Tabela

Tabela 14 - Altura das Antenas (A+B) e seu Custo Total de implantação

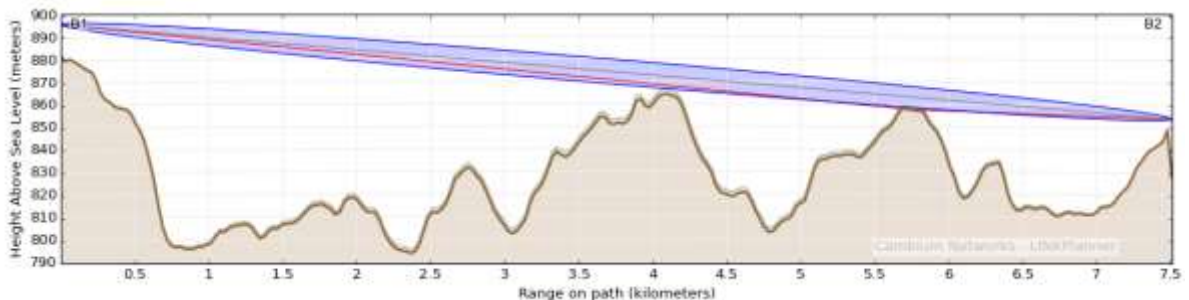
Antena A (m)	Antena B (m)	Custo Antena A + B (R\$)
10	27	-
11	27	-
12	27	-
13	27	-
14	26	43684
15	26	45211
16	26	46738
17	26	48265
18	25	48265
19	25	49792
20	25	51319
21	25	52846
22	24	52846
23	24	54373
24	24	55900
25	24	57427
26	23	57427

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

Confirmando que os valores ideais de altura de antena são para A e B, respectivamente, 14 m e 26 m (Valor total igual a R\$ 43.684,00). Deve-se considerar que para a execução deste projeto é necessário considerar uma margem sobre o crescimento vertical do ambiente (Árvores, Prédios e outras obstruções).

Utilizando o Software para Simulação do enlace com visibilidade direta, o seguinte resultado demonstra o impacto dos pontos críticos no projeto, o que corrobora o projeto inicial, visualizados na Figura 37:

Figura 37 - Perfil do enlace



Fonte: PTP LinkPlanner Cambium Networks ®

Um fato que merece atenção: para o projeto não foi considerado margem de segurança para operação por se tratar de um cálculo para estimativa monetária mínima. Se colocado em pratica é claramente necessário o uso de uma margem.

4.2.3 Limites de Potência e Transferência De Dados

Os limites de potência devem ser também satisfeitos e para isso foi traçado uma comparação superficial entre diferentes sistemas de antenas (Utilizando €1 – R\$ 3,8408 cotação do euro (Comercial) - 20/06/2016 16h59 Banco Central) conforme Tabela 15 - **Comparação de Valores:**

Tabela 15 - Comparação de Valores:

Nome	Preço (€ / R\$)	Frequência de Operação (GHz)
PowerLOG® 10800	1798 / 6905,76	1 ~ 8
LEAX Arkivator Telecom HAE-antenna 11GHz	1998 / 7673,92	10 ~ 12
PowerLOG® 70180	1998 / 7673,92	0,7 ~ 18
FreeMile 1Ft Dish	2769 / 10635,18	24

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

Para dar continuidade ao projeto, Para a análise, foi escolhido o equipamento: LEAX Arkivator Telecom HAE-antena 11 GHz, e utilizando a equação (21).

$$AT = A_o + A_{ab} + A_{rmf} + A_{ga} + A_{gb} + a_{ftTx} + a_{fRx} + a_{tob} - (G_{Atx} + G_{Arx})$$

Para atenuação em espaço livre:

$$A_o = 92,44 + 20\text{Log}(d) + 20\text{Log}(f)$$

$$A_o = 92,44 + 20\text{Log}(7,58) + 20\text{Log}(11)$$

$$A_o = 130 \text{ dB}$$

E demais fatores:

- $A_{ab} = 0$ Valor considerado desprezível para este caso.

- $Arm_f = 0$ Ramificação inexistente neste caso.

Para as guias de onda do sistema foram considerados os equipamentos dos fornecedores e Radiall® e FLEXWELL®, mais precisamente do modelo elíptico.

Assim o modelo FLEXWELL EP105 foi escolhido (Utilizando 3,3781 cotação do dólar (Comercial) - 20/06/2016 16h59 Banco Central). O modelo tem atenuação de 2.92 dB/100 m.

A Tabela 16 exemplifica o caso:

Tabela 16 - EP105 FLEXWELL

Tabela de Preços (U\$ - R\$)		
Comprimento (m)	Valor (R\$/m)	Total
14	523,28	7.325,92
26	523,28	13.605,28

Fonte: (PASTERNAK, 2016)

Deste modo, foi considerado como atenuação

$$A_{ga} = 2,92 \frac{\text{dB}}{\text{m}} \cdot 14_{\text{[m]}} = 0,41 \text{ dB}$$

$$A_{gb} = 2,92 \frac{\text{dB}}{\text{m}} \cdot 26_{\text{[m]}} = 0,76 \text{ dB}$$

Para a atenuação dos circuladores, filtros e duplexadores a perda por inserção um valor de 3,5 de cada lado (transmissão e recepção será utilizado) foi considerado. Este valor é causado pela inserção dos elementos para isolamento do circuito e consequente duplexação, possibilidade de recepção e transmissão.

$$A_{fTx} = 3,5 \text{ dB}$$

$$A_{fRx} = 3,5 \text{ dB}$$

Para transmissor e receptor o equipamento Lumina® Banda Larga 11 GHz foi utilizado.

Para o ganho das antenas:

$$AT = 130 + 7 + 0,41 + 0,76 + 0 + 0 + 0 - (30,1 + 30,1)$$

$$AT = 77,97$$

Utilizando modulação 4 QAM:

$$P_{rx} = P_{tx} - AT$$

$$P_{rx} = 25 - 77,97 = -52,97 \text{ dBm}$$

Para um aumento na confiabilidade do enlace, o cálculo pode ser feito com uma margem de 35 dB como segurança, resultando em:

$$P_{rx} = P_{lim} + M$$

$$P_{rx} = -89 + 35 \quad)$$

$$P_{rxlim} = -54$$

Deste modo a antena utilizada seria adequada ao caso

O valor total da execução do projeto pode ser resumida conforme a Tabela 17:

Tabela 17 - Valor do projeto de Rádio Enlace.

VALOR TOTAL	
DESCRIÇÃO	VALOR (R\$)
Antena 1	7.673,92
Antena 2	7.673,92
Torre A + B	43.684,00
Guia de Onda 1	7.325,92
Guia de Onda 2	13.605,28
Transmissor/ Receptor 1	8.561,27
Transmissor/ Receptor 2	8.561,27
Licença para operar em cidade com mais de 500 Habitantes	1.600,00
TOTAL	98.685,58

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

Atualmente, segundo a Anatel, o valor máximo permitido em dBi para cidades acima de 500 habitantes é de 26. Acima deste valor uma licença deve ser emitida e anualmente renovada, com custo aproximado de R\$ 1600,00 (Resolução 365, Artigo 39 - Valor ano 2014). Outra restrição importante com relação à legislação Brasileira é que para vender serviços de acesso (como no caso de um provedor de acesso) é necessário obter uma licença SCM, que além das taxas e da burocracia é concedida apenas a empresas do ramo de telecomunicações. Sem a licença, você pode apenas criar links para uso interno (como ao interligar dois escritórios de uma mesma empresa, por exemplo), sem vender acesso à web. (MARIMOTO E. CARLOS, 2008)

4.3 RADIO ENLACE EM SATÉLITE

Para o caso em questão foi desenvolvido um estudo rápido sobre azimute e elevação dos pontos B1 e B2 para um satélite hipotético localizado em longitude $\phi=65^\circ\text{O}$.

Deste modo para os pontos do link:

- **Link** – Bragança Paulista - B1 ($\phi_{B1S} = 22^\circ53'5.73''\text{S}$ $\theta_{B1S}=46^\circ32'19.38''\text{O}$) - Bragança Paulista Centro - B2($\phi_{B2S} = 22^\circ57'9.56''\text{S}$ $\theta_{B1S}=46^\circ32'32.46''\text{O}$)

Utilizando as equação (27) para azimute(33), para elevação e convertendo os valores em decimais:

- B1: $\phi_{B1S} = 22^\circ53'5.73''\text{S}$ $\theta_{B1S}=46^\circ32'19.38''\text{O}$, ou $\phi_{B1S}= -22,8849250$
 $\theta_{B1S}=-46,53871667$

Para o azimute:

$$A' = \tan^{-1} \left(\frac{\tan|65 - 22,8849250|}{\sin(46,53871667)} \right)$$

$$A' \cong 51,2398^\circ \text{ O}$$

Para o hemisfério sul e estação a leste do satélite:

$$A = 360^\circ - A'$$

$$A = 360^\circ - 51,2398$$

$$A = 308,7602^\circ$$

Para a elevação:

$$E = \tan^{-1} \left(\frac{r_s - r \cos \theta \cos |\varphi_s - \varphi|}{r \sin [\cos^{-1} (\cos \theta \cos |\varphi_s - \varphi|)]} \right) - \cos^{-1} (\cos \theta \cos |\varphi_s - \varphi|)$$

$$E = \tan^{-1} \left(\frac{42164,2 - 6378,16 \cos 46,53871667 \cos |65 - 22,8849250|}{6378,16 \sin [\cos^{-1} (\cos 46,5381667 \cos |65 - 22,8849250|)]} \right) - \cos^{-1} (\cos 46,5381667 \cos |65 - 22,8849250|)$$

$$E \cong 7,09^\circ$$

- B2: $\phi_{B2S} = 22^\circ 57' 9.56'' S$ $\theta_{B1S} = 46^\circ 32' 32.46'' O$ ou $\phi_{B2S} = -22,95265556^\circ$ $\theta_{B1S} = -46,54235000^\circ$

$$A' = \tan^{-1} \left(\frac{\tan |65 - 22,95265556|}{\sin 46,54235000} \right)$$

$$A' = 51,716^\circ$$

Para o hemisfério sul e estação a leste do satélite:

$$A = 360^\circ - A'$$

$$A = 360^\circ - 51,716$$

$$A = 308,284^\circ$$

$$E = \tan^{-1} \left(\frac{42164,2 - 6378,16 \cos 46,54235000 \cos|65 - 22,95265556|}{6378,16 \sin[\cos^{-1}(\cos 46,54235000 \cos|65 - 22,95265556|)]} \right) - \cos^{-1}(\cos 46,54235000 \cos|65 - 22,95265556|)$$

$$E \cong 7,09^\circ$$

Aplicando o valor encontrado na relação:

$$d = \sqrt{1,8185 \cdot 10^9 - 537,859 \cdot 10^6 \sin[E + \sin^{-1}(0,15127 \cos E)]}$$

$$d = 40899,18 \text{ km}$$

Para a potência de subida (*Uplink*):

$$RPR_S = 147,15 + \psi_S - 20 \log(f_u) + RGT_u - 10 \log(B) - BO_i \quad (80)$$

Utilizando valores padrões para análise:

- Densidade de fluxo de potência de saturação padrão: $\psi_S = -86 \text{ dBw} / \text{m}^2$.
- Frequência de transponder do satélite = 6,125 GHz.
- Fator de Mérito (RGT_S) = 3,5 dB/K

$$RPR_S = 147,15 - 86 - 20 \log(6,125) + 3,5 - 10 \log(36) - 0 \quad (81)$$

$$RPR_S \cong 33,34 \text{ dB}$$

Analogamente para a descida (*Downlink*):

$$RPR_d = 76,16 + EIRP_d - 20 \log(d_d \cdot f_d) - A_{ad} - 10 \log(B) - BO_o \quad (82)$$

Sendo a frequência padrão de descida do satélite é próxima a 3 GHz.

$$RPR_d = 76,16 + 30,1 - 20 \log(40899,18 \cdot 3,9) - 10 \log(36) \quad (83)$$

$$RPR_d \cong 11,08 \text{ dB} \quad (84)$$

$$RPR_{Total} = 10 \log \left[\left(10^{\frac{RPR_s}{10}} \right)^{-1} + \left(10^{\frac{RPR_d}{10}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (85)$$

$$RPR_{Total} = 10,82$$

Claramente demonstrando a limitação causada pela descida neste enlace.

Para a potência de transmissão:

$$P_{T/p} = EIRP_{u/p} - G_T \quad (86)$$

$$P_{T/p} = 35,21 - 30,1 \quad (87)$$

$$P_{T/p} = 5,11 \text{ dBW ou } 12,6 \text{ W}$$

4.4 FIBRA ÓTICA

Utilizando as mesmas premissas para o cálculo do rádio enlace e utilizando como limitante inferior a velocidade de transmissão obtida pelo rádio de 8 Mbps.

A fibra utilizada para este caso: **Corning® SMF-28® Ultra Optical Fiber**.(preço baseado no mesmo modelo):

Custo US\$ 0,18/km ou R\$ 0,58/km (cotação Banco Central US\$ 1 = R\$ 3,2367 [02/07/2016])

Transmissor: **V7-WDM-0110AD** (preço baseado no modelo C-GLC-FE-100BX-D de mesma faixa de operação).

Custo: £ 96,24 ou R\$ 410,87 (cotação Banco Central £ 1 = R\$ 4,2693 [02/07/2016])

Transmissor: **UVOT-EX15** (Preço obtido com base na compra por uma empresa de telecomunicações de grande porte).

Custo: US\$ 1.250,00 ou R\$ 4.040,00 (cotação Banco Central US\$ 1 = R\$ 3,2367 [02/07/2016])

O transmissor **V7-WDM-0110AD** não suporta a transmissão com comprimento de onda de 1550 nm, no entanto como receptor é compatível com este comprimento e atua de forma superior ao equivalente **UVOT-EX15**. Deste modo o projeto utilizou as características de

transmissão e recepção de equipamentos distintos que tem como possibilidade a atuação em conjunto.

Dados técnicos do enlace de fibra ótica (Utilizando UVOT-EX15 na configuração de transmissor e V7-WDM-0110AD como receptor).

As características gerais estão demonstradas na Tabela 18.

Tabela 18 - Requisitos do projeto de fibra ótica.

Requisitos do sistema	
Taxa de Transmissão	155 Mbps
Penalidades de dispersão admissíveis (Pd)	1 dB
Fibra Ótica	
Tipo da fibra	Monomodo
Atenuação (1550 nm)	$\alpha_{\max} = 0,18 \text{ dB / km}$
Dispersão Cromática (1550 nm)	$D = 18 \frac{\text{ps}}{(\text{nm.km})}$
Transmissor Ótico	
Largura Espectral	4 nm
Tipo	<i>Laser</i>
Ptx	-14 dBm
Receptor Ótico	
Tipo	Fotodiodo Avalanche
Sensibilidade	-32 dBm
Outros	
Conectores	$\alpha_c = 0,5 \text{ dB por conector}$
Emendas	$\alpha_e = 0,1 \text{ dB por emenda}$
Máxima Dispersão	$D = 3200 \text{ ps}$

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

4.4.1 Cálculo Por Atenuação

- $L_t = 7,58 \text{ km}$ (Comprimento total do cabo).
- Fibra ótica com $U_c = 0,18 \text{ dB / km} = 1,36 \text{ dB}$.
- $N_{\text{con}} = 4$ (número de conectores).
- $U_{\text{con}} = 0,5$ (Perda por conector).
- $N_s = 2$ ($7,58/4 = 1,89$).
- $U_s = 0,1$ perda por emenda.
- $M =$ Margem de 3 dB

Utilizando as equações (19),(20) e (21) para balanceamento de atenuação:

$$P_{tx} - N_{CON} \cdot U_{CON} - N_s \cdot U_s - U_c \cdot L_t - P_{Rx} - M > 0$$

$$P_{tx} - 4 \cdot 0,5 - 2 \cdot 0,1 - 1,36 + 32 + \text{Margem (3 dB)} > 0$$

$$-14 - 2 - 0,2 - 1,36 + 35 > 0$$

$$13,44 > 0$$

Para a Sensibilidade do receptor:

$$P_r = -14 - 2 - 0,2 - 1,36$$

Assim:

$$P_r = -17,56 > -32$$

Comportamento da distância:

$$P_t - N_{CON} \cdot U_{CON} - N_s \cdot U_s - U_c \cdot L_t - P_r > 0$$

$$P_t - 4 - \frac{L_t}{4} \cdot 0,1 - 0,18 \cdot L_t - P_r > 0$$

$$L_t \leq \frac{X \cdot 4 - 16}{0,82}, \quad \text{onde } X = P_t - P_r$$

Deste modo:

$$L_t \leq \frac{18.4 - 16}{0,82}$$

$$L_t \leq 52,49 \text{ km}$$

4.4.2 Cálculo por Dispersão

A verificação pela dispersão máxima passa a ser:

$$L_t \leq \frac{0,31 \cdot 10^6}{D \cdot B \cdot \Delta\lambda}$$

$$L_t \leq \frac{0,31 \cdot 10^6}{18.4 \cdot 155 \cdot 10^{-3}}$$

$$L_t \leq 27,78 \text{ km}$$

O que demonstra a veracidade das premissas.

Para o valor de mão de obra foi utilizado o orçamento (valor pago) por uma empresa de telecomunicações de grande porte em um projeto. A mão de obra é um valor que considera o preço da fibra somado ao valor de fusão da mesma e taxa cobrada profissional. Os dados estão expressos na Tabela 19.

Material + Mão de obra = R\$ 27,57 por metro

Tabela 19 - Resumo de custos fibra ótica

VALOR TOTAL	
Equipamento Transmissor	R\$ 4.040,00
Equipamento Receptor	R\$ 410,00
Material + Mao de Obra	R\$ 208.980,60
TOTAL	R\$ 213.430,60

Fonte: (Produção do próprio autor, 2016).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta uma comparação de caso específico (Estado de São Paulo, cidade de Bragança Paulista) entre as tecnologias supracitadas com valores reais de mercado. O valor para o rádio enlace para o caso foi de R\$ 98.685,58 enquanto para a fibra ótica R\$ 213.430,60. Uma relação de valor em que o rádio enlace tem um custo total em torno de 46% da fibra ótica.

Este trabalho também apresentou os principais modos de enlace para transferência de informações a distância, propostos para atuarem como manual básico para estudo de viabilidade inicial de um projeto e estimativa de valores monetários iniciais.

Constatou-se que o projeto de fibra ótica é uma alternativa mais cara em relação ao rádio enlace em um valor de aproximadamente R\$ 25.000,00 / km, não incluído valores de equipamento, mesmo após os avanços tecnológicos alcançados na última década em relação as fibras e tecnologias de transmissão a *laser*, no entanto, com transmissão de dados superior. Deste modo, a fibra ótica, com estabilidade superior e maior velocidade de propagação de dados, fica em segundo plano quanto ao custo de implantação e, assim, radio enlaces tornam-se uma escolha mais desejável a pequenas e medias empresas.

Através de um software foi possível verificar a veracidade de algumas premissas do projeto de rádio e a possibilidade técnica do mesmo. O projeto pode ser desenvolvido futuramente encontrando uma relação entre o valor dos equipamentos de transmissão e sua velocidade em relação a distância necessária, encontrando um valor ótimo para definir até qual distância o uso de fibra ótica se torna mais barato e eficiente do que sua contraparte, o rádio.

Segundo a comparação entre as duas tecnologias, o fator determinante para a diferença de valores é “custo de mão de obra de instalação” em fibras óticas, valor que se provou responsável por praticamente 80% do custo total do projeto. Caso este valor seja reduzido, o custo total é de forma direta impactado, tornando-o virtualmente superior em velocidade de transmissão e custos.

REFERÊNCIAS

- AFL. **Alumacore optical ground wire (opgw)**, Disponível em: <[https://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/OPGW/Alumacore-Cable/AlumaCore-Optical-Ground-Wire-\(OPGW\).aspx](https://www.aflglobal.com/Products/Fiber-Optic-Cable/OPGW/Alumacore-Cable/AlumaCore-Optical-Ground-Wire-(OPGW).aspx)> Acesso em: 26 jun. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro, 2002.
- CARVALHO, A. G. **Eletrônica**: telecomunicações. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.
- Comparação CWDM x DWDM**. Disponível em: . <http://www.gta.ufjf.br/grad/04_1/wdm/comparacao.html> Acesso em: 26 jul. 2016.
- FURUKAWA CERTIFIED PROFESSIONAL (FCP), MF101. **Introdução à tecnologia de redes**, Curitiba: Furukawa Industrial S.A, 2014.
- FURUKAWA CERTIFIED PROFESSIONAL (FCP), MF102. **Acessórios e equipamentos para redes**, Curitiba: Furukawa Industrial S.A, 2014.
- FURUKAWA CERTIFIED PROFESSIONAL (FCP), MF103. **Cabeamento estruturado metálico**, Curitiba: Furukawa Industrial S.A, 2014.
- FURUKAWA CERTIFIED PROFESSIONAL (FCP), MF104. **Cabeamento estruturado óptico**, Curitiba: Furukawa Industrial S.A, 2014.
- GOMES G. G. R.* **Sistemas de radioenlaces Digitais**: terrestres e por satélite. São Paulo: Editora Erica, 2013. 352p.
- KEISER, G. **Comunicações por fibras ópticas**, 4 ed. LOCAL: Nova Iorque: Editora Mcgraw-Hill, 2014. 696p
- MACHADO, R. **Comunicação de dados. LOCAL**: UFSM. 2012
- MANITO, R. da R. **Estudo da viabilidade de radio enlace**, 2010, 80 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MARIMOTO, E.C. **Redes guia prático**, 2 ed. LOCAL: GDH Press e Sul Editores, 2011. 560 p.
- MIRANDA, J. B. **Ampli optico**, 2016. Disponível em: <http://www.spw.cl/05mar07_mobile/Transporte/AMPLI_OPTICO.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2016.
- MIYOSHI, E.M.S, C. A. **Projetos de sistemas rádio**. São Paulo: Editora Érica, 2002. 534p.

MONTE, P. Z. **Estudo teórico sobre radio enlace de microondas e estudo de caso**. 2010. 72 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) – Universidade Cidade de São Paulo, São Paulo. 2010.

MUNDO TELECOMUNICACIONES, **Zona de fresnel**, 2010. Disponível em: <<http://www.mundotelecomunicaciones1.blogspot.com.br/2014/10/zona-de-fresnel.html>>, Acesso em: 06 mar. 2016.

NASSAR, C. **Telecommunications demystified**. LOCAL Illinois: LLH Technology Publishing. 2001. 376p.

PÁDUA, F. de. **Teleprocessamento**, 2007. Disponível em: <http://www.getec.cefetmt.br/~fabiano/Automacao_H26/16026_Modulo-4.pdf>, Acesso em: 11 jun. 2016.

P. W. ATKINS, **Princípios de química**, 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 1999. 114 p.

PASTERNAK. **Flexible rg214 coax cable double shielded with black PVC jacket**. 2012. Pasternack Enterprises All Rights Reserved. Disponível em: <<http://www.pasternack.com/flexible-0.425-rg214-50-ohm-coax-cable-pvc-jacket-rg214-u-p.aspx>> Acesso em: 16 fev. 2016.

R. PASCHOTTA, **Tutorial: fiber amplifiers**, 2016. Disponível em: <http://www.rp-photonics.com/tutorial_fiber_amplifiers.html> Acesso em: 25 jul. 2016.

RAMOS. F., 2013. **Correccion de la altura de los obstáculos**, 2013. Disponível em: <<http://www.radioenlaces.es/articulos/correccion-de-la-altura-de-los-obstaculos>> Acesso em: 15 mar. 2016.

SANTANA. **Uso de regressão linear para prever cenários**, 2016. Disponível em: <www.fisica.ufs.br/egsantana/cinematica/regresion/regresion.htm> Acesso em: 25 jul. 2016

SILVEIRA, J. G; BALBINOT, R. **Comunicações ópticas**. LOCAL: EDITORA, 2009. 66 p. Serie Comunicações Óticas, v. 1.

ADEETC, **Sistemas de telecomunicações II**, 2005. Disponível em: <http://www.deetc.isel.ipl.pt/sistemastele/ST2/arquivo/sebenta/STII_2.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2016.

SKLAR, B. **Digital Communications: fundamentals and applications**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall. 1076p.

TUDE, E. **Tutoriais Regulamentação**, 1999. Disponível em: <http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialleg/pagina_3.asp> Acesso em: 13 mar. 2016.

TUDE, E. **Tutoriais Transmissão**, 2004. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialrdig/default.asp>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

APÊNDICE A – Amplificadores Óticos

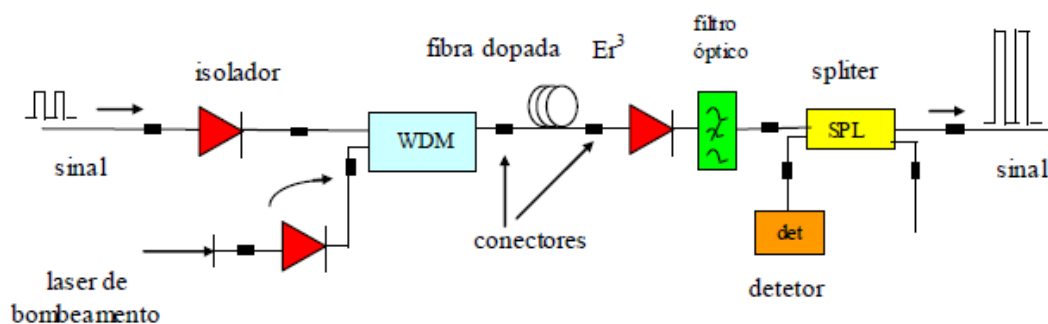
Um Amplificador Ótico a Fibra (AOF) é composto por um pequeno comprimento de fibra, um multiplexador (WDM) e um *laser* de alta potência (dezenas de miliwatts). Dependendo da sua região de operação o elemento da qual é dopada a fibra varia, sendo:

- Na região de 1550 nm - Érbio/Itérbio
- Na região de 1300 nm - Neodímio /Praseodímio

A fibra dopada é o núcleo do amplificador, ou seja, onde os mecanismos de amplificação atuam. Para a ativação dos íons presentes na fibra, é utilizado a energia fornecida pelo *laser* (conhecido como *laser* de bombeamento). Este tipo de *laser* emite energia em comprimento de onda que são absorvidos pelos íons da fibra, excitando-os (saindo do estado natural para níveis energéticos mais elevados). Na transição de estados de energia, um fóton de comprimento na faixa de 1550 nm é introduzido na região de emissão. Quando estimulados por fótons do sinal a ser amplificado, os íons retornam definitivamente para a região normal de operação e emitem a energia retida sob forma luminosa no mesmo comprimento de onda do sinal.

Alguns íons retornam espontaneamente ao estado natural, emitindo uma energia luminosa não combinada com o sinal introduzido. Esta energia luminosa também é amplificada e é conhecida como Emissão Espontânea Amplificada (ASE), constituindo um ruído ótico que acompanha o sinal, demonstrado na Figura 38:

Figura 38 - Modelo de um sistema AOF



Fonte: (SILVEIRA, 2009)