

Willian Sadaiti Muramoto

Estudo e Modelagem de Canal Óptico Atmosférico Utilizando o Lightsim como Plataforma de Simulação

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Engenharia de Computação.

Orientador: Edson Moschim

Campinas, SP
2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M931e Muramoto, Willian Sadaiti
Estudo e modelagem de canal óptico atmosférico
utilizando o Lightsim como plataforma de simulação /
Willian Sadaiti Muramoto. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Edson Moschim
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Comunicações óticas. 2. Turbulência atmosférica. 3.
Sistemas de comunicação por laser. I. Moschim, Edson. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Study and modeling of atmospheric optical channel using
lightsim as simulation platform

Palavras-chave em Inglês: Atmospheric turbulence, Optical Communications,
Optical communication systems, laser-based

Área de concentração: [Engenharia de Computação](#)

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

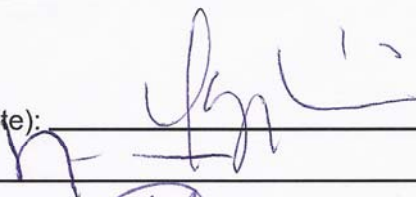
Banca examinadora: Sérgio Barcelos, Marcelo Luiz Francisco Abbade, Luiz
Carlos Kretly

Data da defesa: 18/07/2007

Programa de Pós-Graduação: [Engenharia Elétrica](#)

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO**Candidato:** Willian Sadaiti Muramoto**Data da Defesa:** 18 de julho de 2007**Título da Tese:** "Estudo e Modelagem de Canal Óptico Atmosférico Utilizando o Lightsim como Plataforma de Simulação"

Prof. Dr. Edson Moschim (Presidente):

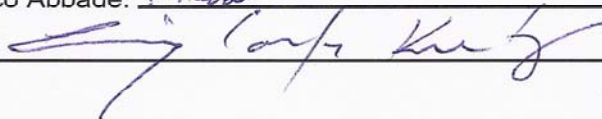


Dr. Sérgio Barcelos:

Prof. Dr. Marcelo Luís Francisco Abbade:



Prof. Dr. Luiz Carlos Kretly:



Willian Sadaiti Muramoto

Estudo e Modelagem de Canal Óptico Atmosférico Utilizando o Lightsim como Plataforma de Simulação

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Engenharia de Computação.

Aprovação em 18/07/2007

Banca Examinadora:
Edson Moschim, Dr
Sérgio Barcelos, Dr
Marcelo Luiz Francisco Abbade, Dr
Luiz Carlos Kretly, Dr

Campinas, SP
2007

*Aos meus pais, minha irmã e
minha namorada.*

Agradecimentos

Agradeço a todos aqueles que me auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho, em especial à minha namorada Juliana que esteve ao meu lado dando incentivos para continuar, aos meus pais que estão no Japão trabalhando para que eu possa ter condições de continuar, e meus parentes e amigos que me deram apoio nesta jornada. Um agradecimento especial ao meu orientador Edson Moschim e meu professor de graduação Luis Carlos Kakimoto, pela orientação e informações de como prosseguir. Agradeço ainda ao Nelson K. Sasaki pela ajuda dada na inserção dos modelos que realizei neste trabalho. À Biblioteca da PUC Minas de Poços de Caldas e seus funcionários, pelo espaço cedido para a redação desta dissertação. À CAPES pela bolsa de estudo fornecida, pois sem ela seria difícil o meu sustento neste período de desenvolvimento da tese. Um agradecimento a todos que poderiam ter me atrapalhado durante este processo e não o fizeram. E por fim, mas não menos importante, a Deus que permitiu minha existência e me deu a capacidade de aprender e continuar.

“Quem quer fazer alguma coisa, encontra um meio. Quem não quer fazer nada, encontra uma desculpa.”

Autor desconhecido.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo e simulações de um enlace atmosférico para comunicações ópticas e como os diversos fatores intrínsecos ao enlace podem influenciar na qualidade do sinal. O uso de um canal atmosférico para a propagação de um sinal óptico é chamado de FSO, Óptica do Espaço Livre, que é uma alternativa barata para enlaces de curto alcance, devido aos baixos custos no seu desenvolvimento, instalação e manutenção. A principal contribuição deste trabalho está na reunião dos modelos matemáticos que caracterizam o enlace óptico atmosférico.

Palavras-Chaves: FSO, Comunicações ópticas sem fio, Canal Atmosférico, modelagem computacional.

Abstract

This is a study and simulation on free space optical communication analyzing many factors that can influence the transmitted signal quality. The use of an atmospheric channel to propagate optical signal is called FSO, Free Space Optics, and it is a cheap alternative for low length paths, because the low cost in its development, installation and maintenance. The main contribution for this work are in group many characteristic equations for atmospheric optical links.

Key-words: FSO, Wireless Optical Communication, Atmospheric link, Computational modeling.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabela	xii
Glossário.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Sobre o trabalho:.....	1
1.2 Estudo da arte	1
2 Sistemas de Comunicações Ópticas FSO	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Sistema FSO Externo	3
2.3 Modelagem matemática do enlace óptico atmosférico.....	8
2.3.1 Efeitos geométricos	9
2.3.2 Efeitos Climáticos	13
2.3.3 Turbulência.....	22
3 Modelagem Computacional do Sistema.....	27
3.1 Introdução.....	27
3.2 Modelos dos componentes do projeto	27
3.2.1 Fonte de Dados e Gerador de Pulsos	28
3.2.2 Driver de corrente.....	29
3.2.3 Laser Semicondutor.....	31
3.2.4 Enlace Atmosférico	35
3.2.5 Fotodiodo.....	38
3.2.6 Filtros.....	40
3.3 Análise de desempenho	41
4 Simulações e Resultados	43
4.1 Introdução.....	43
4.2 Análise de atenuação do enlace	44
4.2.1 Atenuação geométrica	45
4.2.2 Perda por Dispersão.....	46
4.3 Análise de diagrama de olho	52
4.4 Análise de taxa de erro e relação sinal ruído	56
5 Conclusões.....	59
6 Referencia Bibliográfica.....	62
Apêndice A - Princípio das Comunicações Ópticas	65
Apêndice B - Valores Padrões dos Modelos Utilizados nas Simulações	80

Lista de Figuras

Figura 1 - Exemplo de utilização de uma rede FSO externa, acesso a ultima milha [21].....	4
Figura 2 - Resposta à luz pelos olhos humanos, mesmo que não haja resposta os olhos absorvem luz em comprimento de onda no infravermelho [20].....	5
Figura 3 - Dispositivo FSO ligando dois escritórios de direito, <i>Cadwalader, Wickersham & Taft</i> , separados em 100m em edifícios comerciais em <i>Manhatan</i> , link de 1.25Gb/s [21]...6	6
Figura 4 - Rede acoplada, à esquerda, e topologia em anel, à direita [14].....	7
Figura 5 - Configuração Ponto-Multi-Ponto, à esquerda, e Multi-Ponto-a-Ponto, à direita [14]7	7
Figura 6 - Esquema de um transceptor FSO <i>Single-Beam</i> da <i>LightPointe</i> [21].....	8
Figura 7 - Distribuição de Amplitude de um feixe gaussiano, com raio unitário.....	10
Figura 8 - Variação da amplitude com o aumento do raio do feixe	11
Figura 9 - Expansão do feixe de laser com a distância da fonte.....	12
Figura 10 - Atenuação versus umidade relativa	15
Figura 11 - Espalhamento de Rayleigh versus comprimento de onda	17
Figura 12 - Perdas por espalhamento de Mie seguindo os modelos de Kim e Kruse para o parâmetro 'q' [10].....	19
Figura 13 - Perdas por espalhamento causado pela chuva	20
Figura 14 - Perdas causadas por espalhamento devido à neve seca e neve úmida [10]	22
Figura 15 - Variância radial versus Cn^2 , para um trecho de 1000m e laser em 1550nm	24
Figura 16 - Atenuação causado pela cintilação em um trecho de 1km a um laser de 1550nm.25	25
Figura 17 - Variação do raio efetivo em função da turbulência, para distância de 1000m e laser de 1550nm	26
Figura 18 - Exemplo de trem de pulsos retangulares	28
Figura 19 - Declaração de variáveis de entrada do bloco <i>digital source</i>	29
Figura 20 - Trecho de código do bloco <i>current driver</i>	30
Figura 21 - Parte do código fonte do <i>DFB Laser</i> : Runge Kutta.....	32
Figura 22 - Parte do código fonte do <i>DFB Laser</i> : equações diferenciais.....	33
Figura 23 - Variação do número de portadores e da potência óptica com o tempo, interdependência de portadores e fótons causa oscilações de relaxação na potência.....	34
Figura 24 - Oscilações de Relaxação em pulso de laser.....	34
Figura 25 - Trecho de código fonte do <i>Atmosferic link</i>	37
Figura 26 - Trecho de código fonte do <i>PhotoDiode</i>	39
Figura 27 - Exemplo de diagrama de olho	41
Figura 28 - Janela de simulação do Lightsim com o diagrama de blocos do sistema FSO.....	43
Figura 29 - Valor da atenuação do enlace atmosférico	45
Figura 30 - Atenuação geométrica. (Comparação entre feixes divergentes e colimados)	46
Figura 31 - Atenuação atmosférica em função da visibilidade	48
Figura 32 - Variação da atenuação com a intensidade de chuva.	50
Figura 33 – Comparativo da atenuação por taxa de precipitação de neve	51
Figura 34 - Diagrama de olho para dia limpo com turbulência média e enlace de 500m	52
Figura 35 - Diagrama de olho para dia limpo com turbulência média e enlace de 1500m	53

Figura 36 - Diagrama de olho para dia nublado com visibilidade de 500m, com turbulência média e enlace de 1500m	54
Figura 37 - Diagrama de olho para um dia com muita neblina, enlace de 1000m e visibilidade de 100m	55
Figura 38 - Diagrama de olho para dia com muita neblina, enlace de 300m e visibilidade de 100m	55
Figura 39 – Taxa de erro e Relação sinal ruído para enlace com visibilidade de 1000m	57
Figura 40 – Taxa de erro e Relação sinal ruído para enlace com visibilidade de 1000m e laser com 785nm	58
Figura 41 - Telégrafo óptico de Claude Chappe [12].....	66
Figura 42 - Modelo do fotofone de A. G. Bell [12]	67
Figura 43 - Diagrama de Blocos de um enlace simples	69
Figura 44 - Pulso Retangular Ideal e Filtrado, bits 010.....	71
Figura 45 - Driver de Corrente	72
Figura 46 - Distribuição de energia em semicondutores com banda proibida direta	72
Figura 47 - Comparação entre LED e Diodo Laser.....	73
Figura 48 - Comparação entre espectros dos LEDs, Lasers Multimodos e Lasers Monomodos	74
Figura 49 - Exemplo de enlace óptico não guiado [15].....	75
Figura 50 - Circuito de ligação de um Fotodiodo: a) Circuito elétrico; b) Estrutura de um Fotodiodo PIN em um circuito elétrico; c) Estrutura de um Fotodiodo APD em um circuito elétrico	76
Figura 51 - Pré-Amplificador não inversor	78
Figura 52 -Tipos de filtro: a) filtro passa baixa; b) filtro passa alta; c) filtro passa banda.....	79
Figura 53 - Regenerador utilizando um Amplificador Operacional.....	79

Lista de Tabela

Tabela 1 - Valores para densidade de vapor saturado para diversos valores de temperatura....	15
Tabela 2 - Atenuação Atmosférica em função da visibilidade.....	47
Tabela 3 - Variação da atenuação por quilometro devido à precipitação em um enlace de 1km	49
Tabela 4 - Variação da atenuação devido a presença de neve (comparação entre neve seca e neve úmida)	51
Tabela 5 - Variação do BER em função do comprimento do enlace para visibilidade de 1000m e Laser em 1550nm	56
Tabela 6 - Variação do BER em função ao comprimento do enlace e visibilidade de 1000m e Laser em 785nm	57
Tabela 7 - Ganho APD e Comprimento de onda de alguns semicondutores	77

Glossário

FSO	–	Free-Space Optics	–	Óptica do Espaço Livre
PIN	–	Positive Intrinsic Negative	–	Fotodiodo com região intrínseca
APD	–	Avalanche Photo Diode	–	Fotodiodo de Avalanche
BER	–	Bit Error Rate	–	Taxa de Erro de Bit
SNR	–	Signal Noise Ratio	–	Relação Sinal Ruído
IR	–	Infra Red	–	Infra Vermelho
IrDA	–	Infrared Data Association	–	Associação de Dados de Infravermelho
LOS	–	Line of Sight	–	Linha de Visada

1 Introdução

1.1 Sobre o trabalho:

A principal contribuição deste trabalho está em agrupar os diversos modelos matemáticos para o enlace óptico atmosférico e inseri-los em um bloco de simulação do software Lightsim[®].

Esta dissertação está dividida da seguinte maneira: Um capítulo introdutório, no qual é apresentado um breve levantamento bibliográfico a respeito do tema abordado e a divisão do trabalho. O segundo capítulo apresenta os estudos desenvolvidos sobre o sistema de comunicação óptica sem fio, FSO, com o intuito de levantar as equações características do modelo de enlace atmosférico. O capítulo três apresenta a modelagem computacional dos blocos de simulação que fazem parte do sistema FSO.

O capítulo quatro aborda todas as simulações realizadas e os comentários e resultados obtidos em cada uma das simulações com o intuito de validar o modelo. E por fim, são apresentadas as conclusões quanto ao desempenho do sistema, dificuldades encontradas, comparações e propostas para trabalhos futuros.

1.2 Estudo da arte

Os sistemas de comunicação ópticos que utilizam feixes luminosos imerso no ar comunicando duas estações são chamados sistemas FSO, “Free Space Optics”. Nestes sistemas os sinais ópticos são colimados no ar e alinhados em visada direta de um transmissor a um receptor. Os lasers utilizados neste tipo de comunicação encontram-se no espectro do infravermelho, ou seja, lasers com comprimento de onda que vão desde 800nm a 1550nm [1], mas existem casos onde outros comprimentos de onda são utilizados, nos quais estão inclusos 690nm, 780nm e 10 μ m [2][3].

Os principais fenômenos que causam influências na qualidade do sinal são de origens climáticas (neblina, chuva e neve), constitucionais (vapor de água e gases que absorvem luz), térmicas (turbulência), luminosas (fontes luminosas geradoras de ruído) e geográficas (construções, obstruções físicas aleatórias). Destes, os principais obstáculos são neblina e turbulência, por causarem os efeitos mais complexos. Nos últimos 5 anos, alguns estudos com o intuito de desvendar e minimizar os efeitos desses fenômenos foram desenvolvidos. Um destes estudos foi conduzido por [Manor, H] e [Arnon, S] [4], realizado em 2003, que propunham utilizar o irradiações em *far-IR*, $10\mu\text{m}$, para suavizar os efeitos das condições climáticas. Ainda em 2003, foi coletado os primeiros resultados de testes de campo nas proximidades de Milão, Itália [5].

Em 2004, um estudo que envolvia simulações computacionais, propunha meios de prever a atenuação causada pela neblina baseado na equação de Mie [2]. Neste mesmo ano foi publicado um artigo sobre modelagem de canal, onde é relacionada a variação da taxa de erro com as diferentes condições atmosféricas [6]. Em 2005 foram publicados os resultados de um experimento prático de comparação entre sistemas FSO nas janelas de transparência atmosféricas de 800nm, 1600nm e $10\mu\text{m}$ sob diversas condições climáticas[7]. Em 2006, publicou-se resultados de experimentos utilizando amplificadores ópticos (EDFA, SOA) para acoplar e amplificar os sinais que havia passado por vários níveis de turbulência simulada [8].

Em fevereiro deste ano, ocorreu a publicação de um artigo que avalia a perda por cintilação, causada pela turbulência, em sistemas de comunicação óptica com detecção direta, neste artigo mostrou-se que cintilação moderada pode causar perdas consideráveis, mas que pode ser contornado utilizando uma codificação de canal [9].

Além destes, outros estudos, voltados à codificação de dados ou mercadológicos, foram publicados neste período, mas não fazem parte do escopo deste trabalho, o qual visa modelar o canal atmosférico.

2 Sistemas de Comunicações Ópticas FSO

2.1 Introdução

O FSO é uma tecnologia de comunicação óptica que utiliza o espaço livre como meio de propagação. Mesmo o conceito a respeito deste tipo de sistema sendo bastante simples, um feixe de laser proveniente de um transmissor óptico, propagado pelo ar quase sempre em linha de visada, e recebido por um receptor óptico [10], há diversas áreas que podem ser estudadas e pesquisadas, tais como: estimativa de canal e modelagem de ruído (para aplicação *indoor*), modulação e codificação, caracterização da transmissão atmosférica e modelagem de ruído para *outdoor FSO*, emissores e transmissores, arquitetura de rede, interconexões com outros sistemas, e aplicações em novos cenários [11].

2.2 Sistema FSO Externo

Desde os primórdios da comunicação óptica, o ar era utilizado como meio de propagação de sinal. Com o advento das fibras ópticas, o FSO deixou de ser intensamente estudado, devido ao aumento nos estudos das fibras, que no início apresentavam elevadas perdas intrínsecas [11] [12], as quais, atualmente, são quase nulas, tornando-as mais eficazes na transmissão de dados a elevadas taxas e longas distâncias.

Contudo, existem estudos voltados à utilização e comercialização de equipamentos de comunicação óptica FSO [1], conduzidos por empresas como a Light Pointe™, a fSONA™, e a FiberWork, que desenvolvem e comercializam equipamentos de comunicação óptica sem fio. A proposta comercial e tecnológica do sistema FSO tem como objetivo o que chamam de *the last mile*, ou tecnologia da última milha, uma alternativa de conectividade entre cliente e provedor [13] [14] [15].

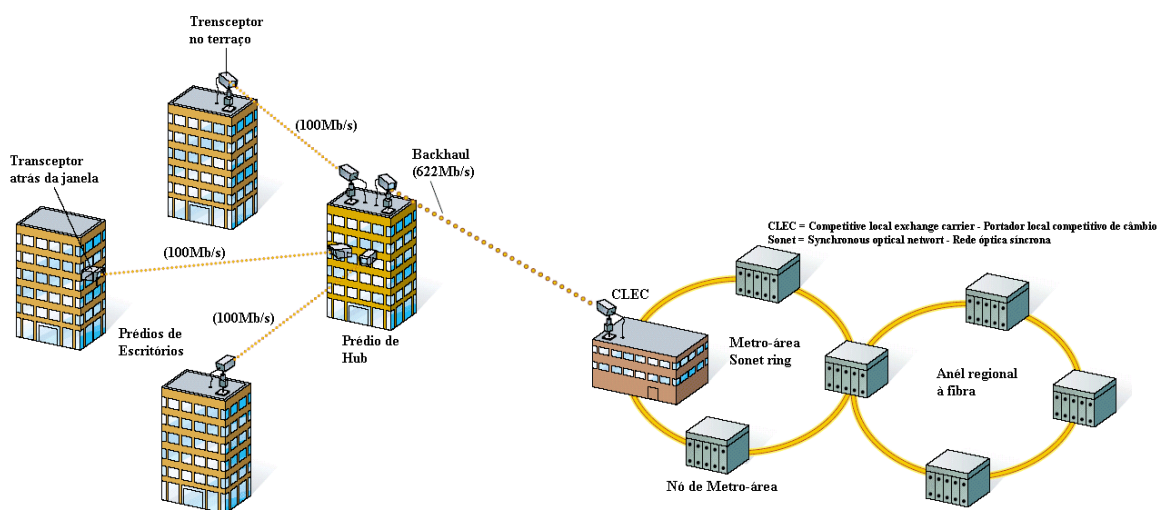


Figura 1 - Exemplo de utilização de uma rede FSO externa, acesso a última milha [21]

O sistema FSO apresenta diversas vantagens em sua utilização, as principais são: mobilidade do sistema, os transceptores podem ser instalados para prover conectividade temporária podendo posteriormente ser movido para outras localidades [16]; transparência a protocolo de dados [15], em alguns equipamentos os dados podem ser transmitidos no formato *fast-ethernet*, ethernet de 100Mb/s, ou *gigabit-ethernet*, ethernet de 1Gb/s, [17]; e segurança dos dados transmitidos, pois os não é possível interceptar e recuperar os dados de maneira indevida [18]. Algumas outras vantagens surgem quando comparada com transmissores de RF, pois o sistema FSO não possui regulamentação de frequência da portadora; as taxas de transmissão do sistema FSO podem chegar às mesmas aplicadas às fibras ópticas, o que não seria possível utilizando RF; além da segurança dos dados [19].

Em contra partida, os sistemas FSO possuem um grande número de desvantagens quanto à sua utilização, tais como: alta dependência das condições climáticas e visibilidade; estabilidade no alinhamento, pequenos abalos podem desalinhar os transceptores; temperatura ambiente, variações na temperatura no percurso do feixe podem causar perdas de potência óptica por cintilação; entre outros, como obstruções físicas do feixe, etc.

Como muitos dos fatores que influenciam na qualidade do sinal podem ocorrer de maneira aleatória, um fator comum de análise de sistemas FSO é a disponibilidade do sinal, que é a porcentagem do tempo em que o sistema permanece operante sem interrupções. Perdas de sinal podem ocorrer desde que idealmente a duração máxima das interrupções em relação ao tempo total de operação do sistema não ultrapasse 0.0001% em um ano. Do mesmo modo, a “viabilidade” esta relacionada com a disponibilidade de sinal. Um enlace FSO é viável desde que a disponibilidade do sinal local esteja dentro dos parâmetros previstos no projeto de implantação [16].

Uma outra desvantagem que requer um cuidado elevado na manipulação dos enlaces FSO é devido à emissão de laser de alta potência diretamente no ar, por isso existe o termo chamado “segurança dos olhos”, *Eye Safety*, pois exposição prolongada aos lasers podem causar sérios danos na visão das pessoas que manipulam este tipo de equipamento [20]. Por este motivo, os locais onde são instalados possuem acesso restrito à pessoal treinado. E as empresas que produzem estes tipos de equipamento utilizam-se de laser em comprimentos de ondas longe do espectro visível para reduzir ao máximo os possíveis danos a eventuais exposições aos feixes de laser. A Figura 2 apresenta a resposta e a absorção dos comprimentos de onda pelo olho humano.

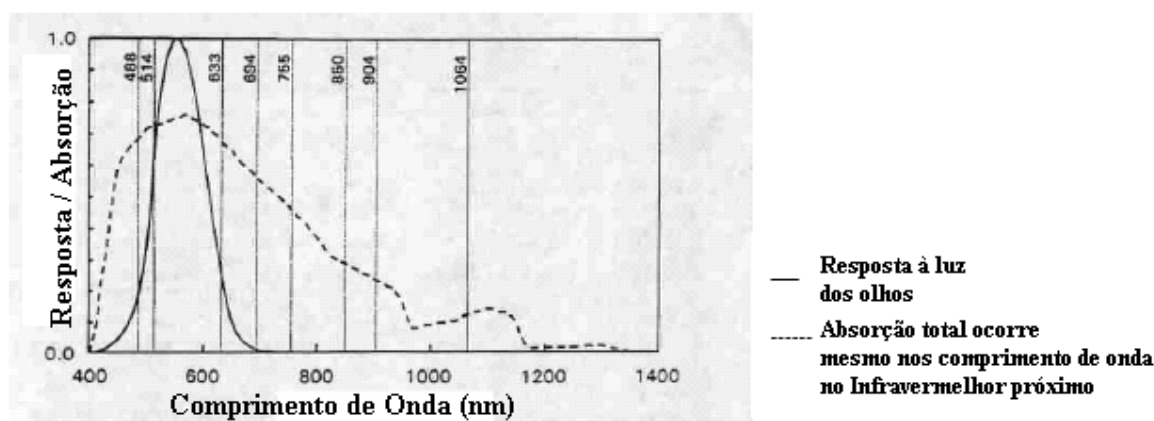


Figura 2 - Resposta à luz pelos olhos humanos, mesmo que não haja resposta os olhos absorvem luz em comprimento de onda no infravermelho [20]

Há atualmente espalhados pelo mundo diversos equipamentos FSO em operação. Muito embora os fenômenos climáticos interfiram violentamente na capacidade de transmissão, podem ser encontrados links FSO em Manhattan, Londres, China, entre outros [21] [15]. Abaixo é apresentada um exemplo de instalação FSO em Manhattan.



Figura 3 - Dispositivo FSO ligando dois escritórios de direito, *Cadwalader, Wickersham & Taft*, separados em 100m em edifícios comerciais em *Manhatan*, link de 1.25Gb/s [21]

A tecnologia FSO permite utilizar tanto enlaces ópticos ponto-a-ponto como outras configurações como acopladas, ponto-multiponto, múltiplo ponto-a-ponto, entre outros [14]. A Figura 4 e Figura 5 apresentam topologias de enlaces ópticos possíveis utilizando sistemas FSO.

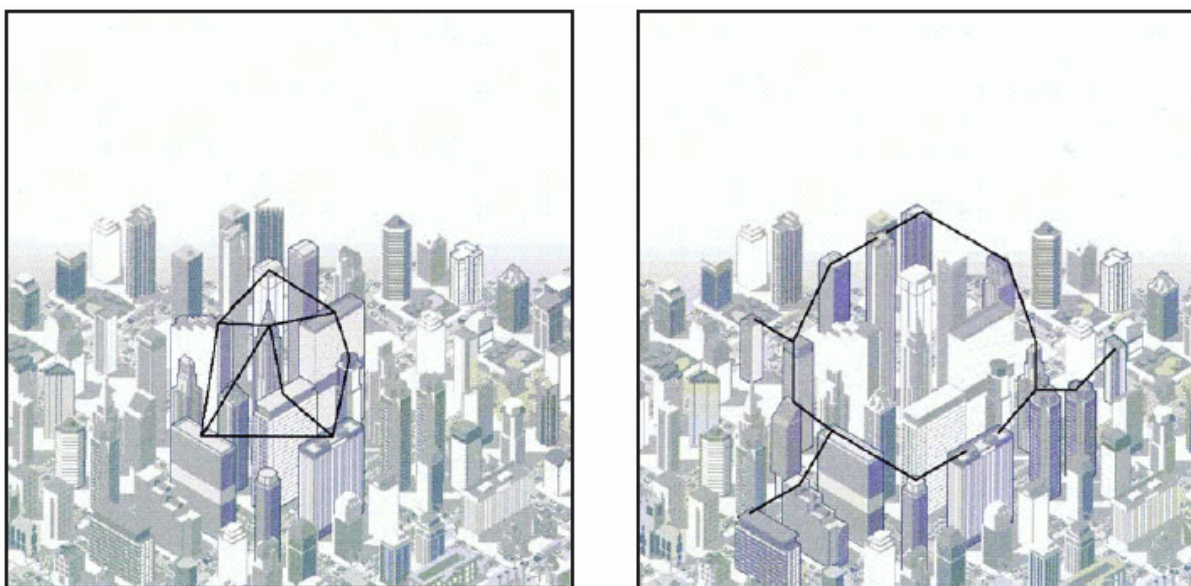


Figura 4 - Rede acoplada, à esquerda, e topologia em anel, à direita [14]

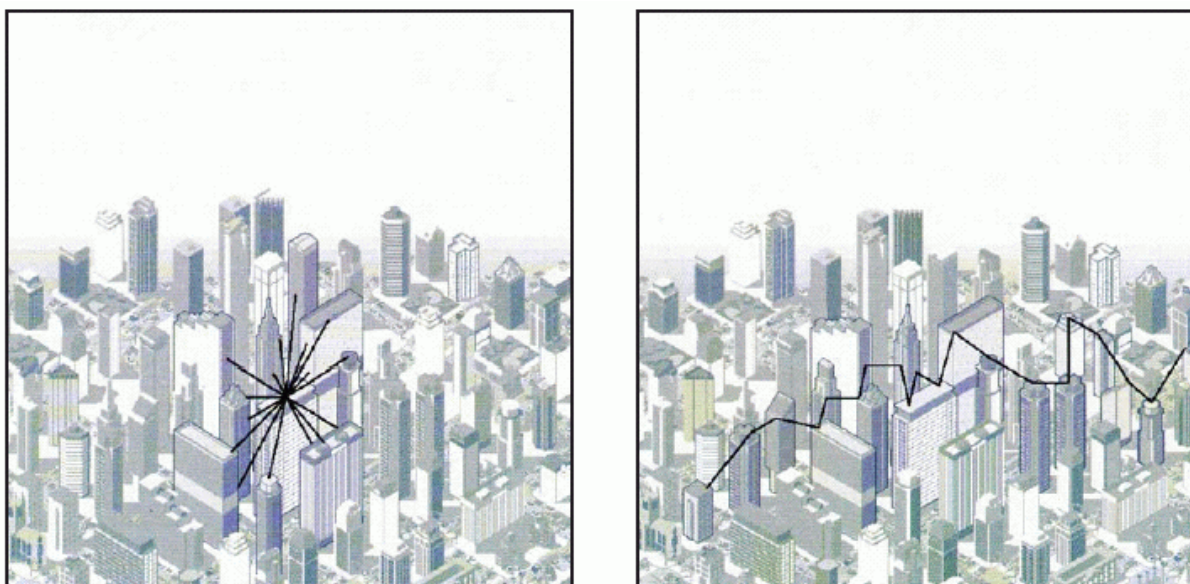


Figura 5 - Configuração Ponto-Multi-Ponto, à esquerda, e Multi-Ponto-a-Ponto, à direita [14]

O transceptor FSO é composto por um conversor eletro-óptico que converte sinais elétricos provenientes de uma fonte de dados em sinais ópticos emitidos no ar, e um conversor opto - elétrico que converte os sinais luminosos que chegam ao transceptor novamente em sinais elétricos. Uma alternativa é apresentada no exemplo da Figura 6, um sinal óptico

proveniente de um outro equipamento é amplificado e depois emitido no ar, e o sinal que chega pelo ar, é enviado por meio de uma fibra a um outro equipamento.

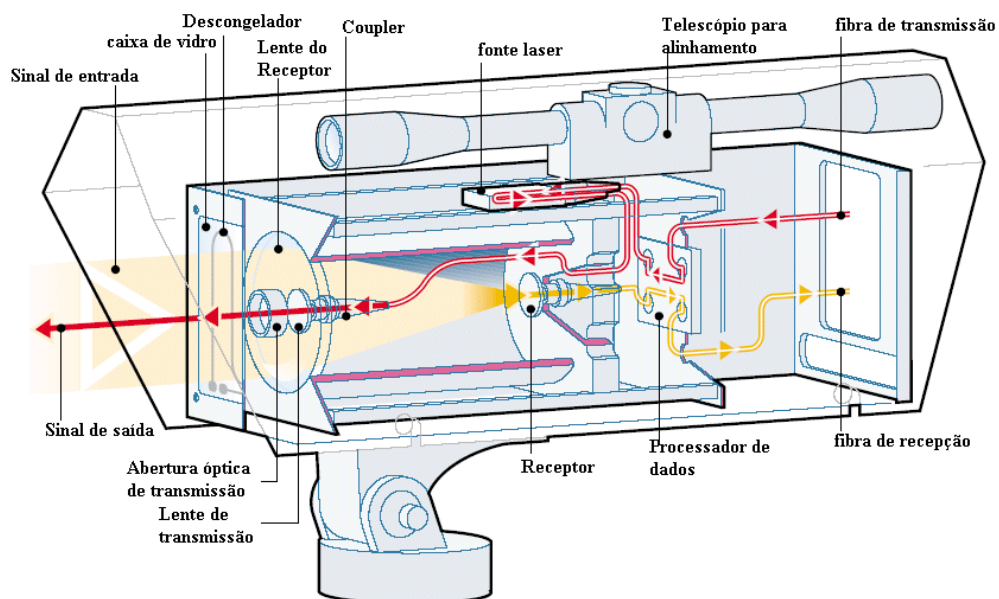


Figura 6 - Esquema de um transceptor FSO *Single-Beam* da *LightPointe* [21]

2.3 Modelagem matemática do enlace óptico atmosférico

A atmosfera possui diversos fatores que influenciam na intensidade do sinal óptico, desde a sua composição como as variações climáticas e térmicas que sofre. Isto sem considerar a geometria do feixe de luz, que diverge com o decorrer do percurso e sempre chega com diâmetro maior que o diâmetro da lente colocada no receptor. Em seqüência é descrito cada um destes fenômenos.

2.3.1 Efeitos geométricos

Usualmente um laser é caracterizado pela potência óptica emitida, a qual é referida como sendo toda energia existente na área de iluminação do feixe de luz. Com base nisso define-se a intensidade luminosa como sendo a derivada de superfície da potência óptica do laser (equação 2.1).

$$P = \int_s I(x, y, z) ds \quad (2.1)$$

Porém sabe-se que a relação entre campo elétrico e intensidade luminosa do laser é dada pela equação 2.2. Sendo assim a intensidade do laser pode ser obtido como sendo a equação 2.3.

$$|I(x, y, z)| = |A(x, y, z)|^2 \quad (2.2)$$

$$P = \int_s |A(x, y, z)|^2 ds \quad (2.3)$$

onde A é a amplitude do campo elétrico de um feixe de laser que apresenta uma distribuição gaussiana quanto ao seu perfil de propagação. Considera-se como sendo o raio do feixe a distância entre o ponto onde a amplitude do campo é máxima e o ponto onde ela decai para $1/e$ do máximo. Utilizando-se da solução aproximada da equação de onda do feixe de laser no espaço livre, obtém-se a equação 2.4 como sendo a amplitude do feixe no plano de lançamento, face da lente.

$$A(r, \varphi, 0) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_{f0}^2}\right) \quad (2.4)$$

onde A_0 é a amplitude no ponto $z=0$, r_{f0} é o raio inicial do feixe, r possui relação com x e y tal que $r^2 = x^2 + y^2$ [22].

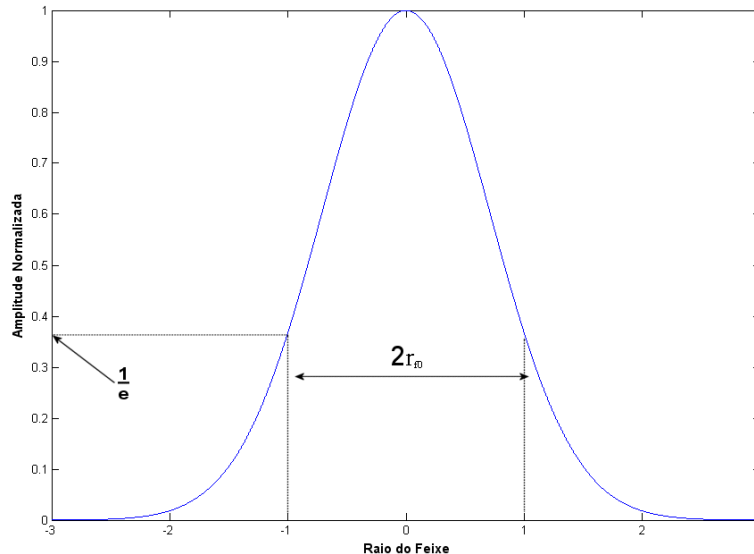


Figura 7 - Distribuição de Amplitude de um feixe gaussiano, com raio unitário

A Figura 7 apresenta o gráfico obtido pela equação 2.4 utilizando-se amplitude máxima com valor unitário e raio r_{f0} também unitário. Observa-se que o valor da curva, onde o raio vale 1, assume o valor de $1/e$ que é aproximadamente 0.3679.

Considerando-se que o valor do raio do feixe aumenta conforme a distancia da fonte, se não houver perdas no percurso, pela teoria da conservação de energia a amplitude do feixe deve diminuir de tal forma que a potência a um ponto z qualquer seja a mesma que a potência inicial. Assim sendo para um ponto arbitrário qualquer onde r_{fz} é o raio do feixe a uma distância z da fonte, aplicando-se a equação 2.4 à equação 2.3, obtém-se a equação 2.5 como sendo:

$$A(r, \varphi, z) = A_0 \left(\frac{r_{f0}}{r_{fz}} \right) \exp \left(- \frac{r^2}{r_{fz}^2} \right) \quad (2.5)$$

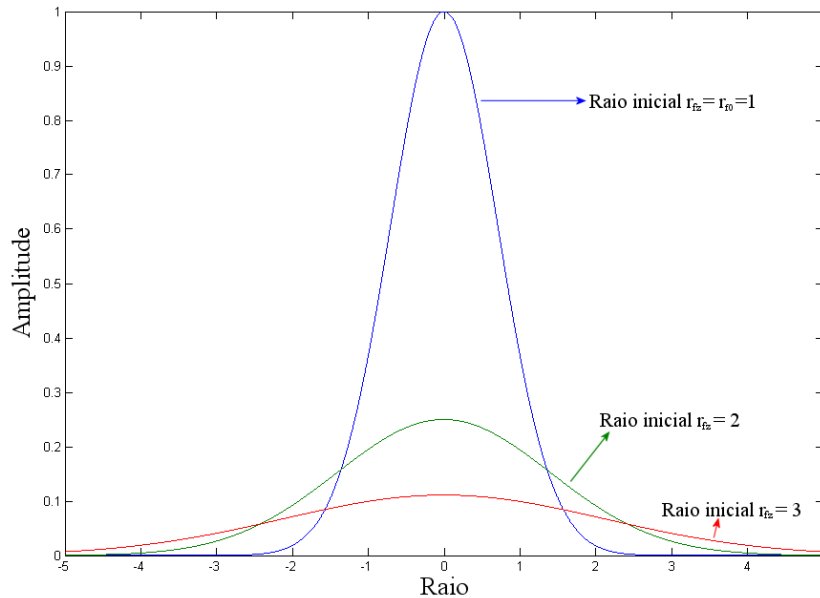


Figura 8 - Variação da amplitude com o aumento do raio do feixe

Quando o sinal laser é transmitido através do ar, o raio efetivo do feixe possui um aumento gradual com a distância percorrida e este aumento segue uma hipérbole segundo a equação 2.6 que, a longas distâncias, converge para uma reta de inclinação θ dada pela equação 2.7 [22].

$$r_{fe} = r_{f0} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi \cdot r_{f0}^2} \right)^2} \quad (2.6)$$

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot r_{f0}} \quad (2.7)$$

Este valor de θ é chamado abertura focal, comumente encontrado entre as especificações do FSO, que se refere ao ângulo de abertura do laser a longas distâncias. A Figura 9 apresenta-se um gráfico da evolução do raio r_{fe} e uma reta com o ângulo de inclinação θ .

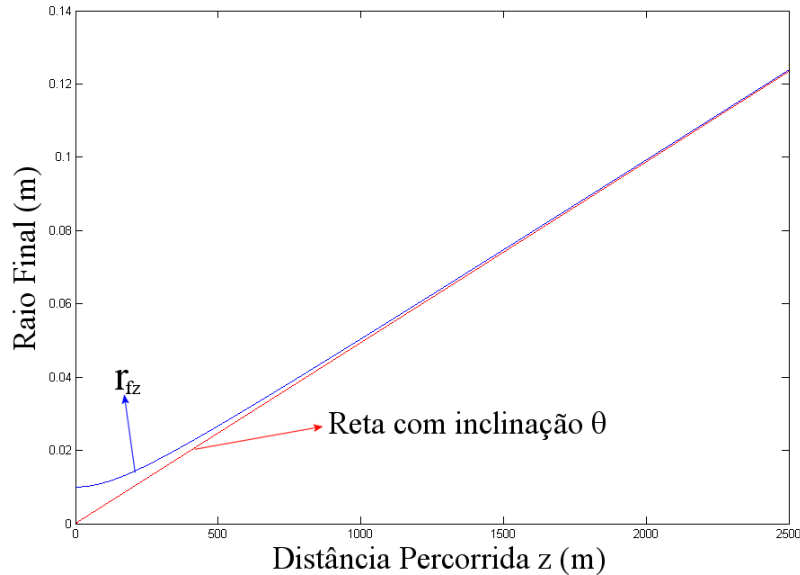


Figura 9 - Expansão do feixe de laser com a distância da fonte

Observa-se que, no início, o raio do feixe se expande vagarosamente, porém com o aumento da distância o raio começa a se aproximar da reta de inclinação θ . O gráfico apresentado pela Figura 9 foi gerado utilizando um comprimento de onda em $1.55\mu\text{m}$ e raio inicial r_{f0} igual a 1cm.

Na prática, os equipamentos FSO possuem sinal óptico com feixe divergente, com abertura focal dado em graus ou miliradianos. Desta maneira o raio final do sistema pode ser obtido por $r_{fz} = 0.5z \tan(\theta)$.

Para evitar perda de sinal por variações que ocorrem no alinhamento devido a pequenas oscilações mecânicas, o feixe óptico é lançado divergentemente no ar, fazendo a área iluminada pelo laser passar a ser maior que a lente do receptor. Por este motivo utiliza-se a equação 2.3 para calcular a energia coletada pela lente, a qual é dada pela equação 2.8 com os limites de integração alterados.

$$P_r = \int_0^{2\pi r_{lr}} \int_0^{\infty} |A(r, \varphi, z)|^2 r dr d\varphi \quad (2.8)$$

onde P_r é a potência óptica que chega ao receptor e r_{lr} é o raio da lente to receptor.

Assim as perdas totais por efeitos geométricos do laser no percurso são calculadas dividindo-se a potência óptica recebida pela potência óptica enviada pela fonte.

2.3.2 Efeitos Climáticos

As composições atmosféricas somada às variações dinâmicas que ocorre ao decorrer do tempo degradam a qualidade do sinal óptico, em parte absorvendo energia do campo elétrico do feixe bem como a desviando-o para outras direções fora da trajetória original do feixe de luz. Dentre todos os componentes químicos que compõem o ar os mais prejudiciais para o FSO são o H₂O e o CO₂, ambos no estado gasoso “visível”, isto é, neblina e fumaça respectivamente. Porém independente do estado físico da matéria, tudo que entrar no percurso do feixe óptico pode causar degeneração na qualidade do sinal.

A) Absorção Atmosférica

A energia dos sinais luminosos é deferentemente absorvida pelos elementos existentes no ar. A equação que relaciona o tipo de composto químico e a luz é dada pela equação 2.9 [1], apresentada abaixo:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad (2.9)$$

onde α é absorção atmosférica, k é a parte complexa do índice de refração, λ é o comprimento de onda do laser, σ_a é a absorção cruzada da seção, N_a é a concentração das partículas absorventes.

Devido à complexidade do ar, apenas alguns compostos são estudados na absorção atmosférica, e neste caso a água será estudada. Mesmo assim este estudo não é trivial, devem-

se conhecer dados como a umidade relativa e o valor da absorção cruzada. Reescrevendo a equação 2.9, obtém-se:

$$\alpha_{H_2O} = \frac{4\pi k_{H_2O}}{\lambda} N_{H_2O} \quad (2.10)$$

onde os valores de k_{H_2O} e N_{H_2O} são obtidos da equação que segue:

$$n^2 \equiv \frac{c}{v} = \frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0} \quad (2.11)$$

onde n é o índice de refração [30]. O índice de refração complexo pode ser dado por:

$$n^2(\omega) = 1 + \frac{Nq_e^2}{\varepsilon_0 m_e} \sum_j \frac{f_j}{\omega_{0j}^2 - \omega^2 + i\gamma_j \omega} \quad (2.12)$$

onde ε é a permissividade elétrica da água, μ é a permeabilidade da água, ω é a frequência angular da luz incidente, ω_{0j} é a frequência de oscilação da partícula j , f_j é a força de oscilação, q_e é a carga do elétron, m_e é a massa da partícula oscilante e N é o número de elétrons por unidade de volume que estão oscilando no meio. Pode-se observar que a parte complexa do índice de refração da água não é simples de se obter além de variar com o comprimento de onda.

A concentração de água no ar pode ser obtida a partir da umidade relativa que é obtida em função da densidade de vapor atual e saturada [23], como segue:

$$UR_{\%} = 100 \frac{d_{va}}{d_{vs}} \quad (2.13)$$

onde $UR_{\%}$ é a umidade relativa, d_{va} é a densidade de vapor atual e d_{vs} é a densidade de vapor saturado. Isolando a densidade atual e multiplicando o valor por $1e^{-6} \text{ m}^3/\text{g}$ obtém-se:

$$N_{H_2O} = UR_{\%} d_{vs} 1e^{-8} \quad (2.14)$$

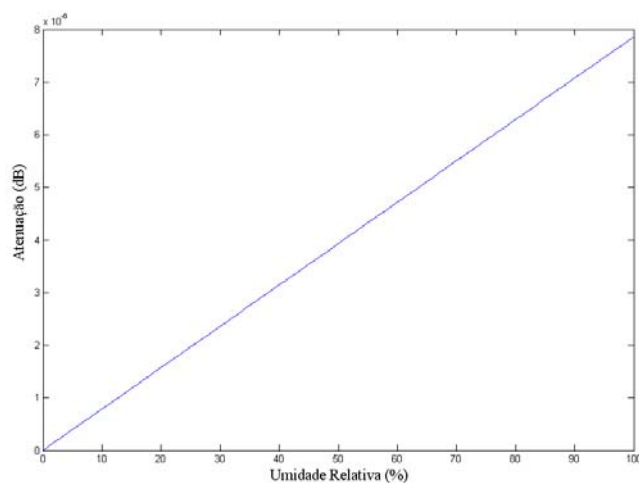


Figura 10 - Atenuação versus umidade relativa

A obtenção da densidade de vapor atual depende da densidade de vapor saturado. Os valores para esta são tabelados em função da temperatura ambiente [23], como segue:

Tabela 1 - Valores para densidade de vapor saturado para diversos valores de temperatura

Temperatura (°C)	Densidade de Vapor Saturado (g/m ³)
-10	2.36
0	4.85
5	6.8
10	9.4
11	10.01
12	10.66
13	11.35
14	12.07
15	12.83
20	17.3
25	23
30	30.4
37	44

Na prática a absorção atmosférica pode ser ignorada, pois as perdas causadas pelas outras perdas são relativamente maiores que as causadas pela absorção.

B) Espalhamento Atmosférico

O efeito de espalhamento da luz está relacionado com a capacidade de partículas alterarem o sentido de propagação dos feixes ópticos, que é resultado do efeito da difração, ocasionando, assim, perdas de percurso.

Os espalhamentos atmosféricos estão relacionados com a dimensão das partículas suspensas no ar. Dependendo do raio das partículas o tipo de espalhamento muda. O espalhamento predominante é obtida através do calculo $x_0=2\pi r/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda do laser no ar e r é o raio da partícula dispersa no ar. Existem três condições de espalhamento. A primeira é quando $x_0 \ll 1$ e neste caso o espalhamento predominante é o Espalhamento de Rayleigh. Quando o valor de $x_0 \approx 1$, o espalhamento dominante passa a se tornar o espalhamento de Mie. No caso de $x_0 \gg 1$ utiliza-se da óptica geométrica para tratar este caso em especial.

a. Espalhamento Rayleigh

Este espalhamento ocorre quando os feixes do laser sofrem alteração em seu sentido de propagação devido às oscilações de dipolos gerados pelos elétrons de moléculas irradiadas pela luz. A fórmula do espalhamento de Rayleigh é descrita na equação 2.15:

$$\sigma_s = \frac{fe^4\lambda_0}{6\pi\epsilon_0^2 m^2 c^4 \lambda^4} \quad (2.15)$$

onde f é a força da oscilação, e é a carga eletrônica, λ_0 é o comprimento de onda que corresponde à frequência natural $\omega_0=2\pi c/\lambda_0$, ϵ_0 é a constante dielétrica do meio, c é a constante da velocidade da luz, m é a massa das partículas oscilantes. Observa-se que a dependência da função em λ é de quarta ordem, assim a intensidade do efeito de espalhamento

de Rayleigh é fortemente ligado ao comprimento de onda, a um fator de $1/\lambda^4$ como mostra a Figura 11.

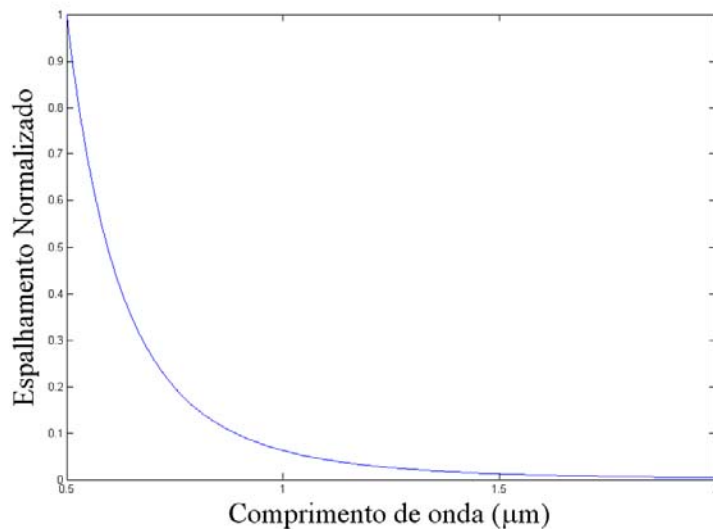


Figura 11 - Espalhamento de Rayleigh versus comprimento de onda

b. Espalhamento de Mie

O espalhamento de Mie é causado pela neblina e pela fumaça, sendo a principal fonte de atenuação no sinal óptico causado pelo meio atmosférico. Este efeito de espalhamento pode ser visível, isto é, quando o feixe é espalhado pode-se ver a sua trajetória. Um exemplo é quando se passa um spray no caminho de um laser visível, as partículas espalham a luz tornando possível a visualização do percurso do feixe de luz.

A atenuação causada pelo espalhamento de Mie é calculado em função da visibilidade atmosférica $[V]$, medida que determina a densidade da neblina ou fumaça do meio, o percentual de partículas de gotas de ar a céu limpo $[V\%]$, comprimento de onda de referência para a visibilidade utilizada $[\lambda_0]$, comprimento de onda na luz visível, e o comprimento de onda do laser $[\lambda]$. Tanto o comprimento de onda de referência quanto o comprimento de onda do laser são elevados a um coeficiente que varia com a visibilidade.

Existem dois modelos que calculam o valor deste coeficiente q , o modelo de Kim e o modelo de Kruse [10]. A equação abaixo apresenta a relação de atenuação e os valores de q possíveis:

$$\sigma_m = \frac{10 \log V_{\%}}{V} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^q \quad (2.16)$$

que, de maneira usual, é representado da seguinte forma:

$$\sigma_m = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^q \quad (2.17)$$

com λ expresso em nanômetros, os valores de q para o modelo de Kim é dado por:

$$q = \begin{cases} 1.6 \rightarrow V > 50km \\ 1.3 \rightarrow 6km < V < 50km \\ 0.585V^{1/3} \rightarrow V < 6km \end{cases} \quad (2.18)$$

enquanto que para o modelo de Kruse vale [10]:

$$q = \begin{cases} 1.6 \rightarrow V > 50km \\ 1.3 \rightarrow 6km < V < 50km \\ 0.16V + 0.34 \rightarrow 1km < V < 6km \\ V - 0.5 \rightarrow 0.5km < V < 1km \\ 0 \rightarrow V < 0.5km \end{cases} \quad (2.19)$$

Para comparar a variação da atenuação devido a cada um dos modelos segue a seguinte figura que apresenta os dois gráficos sobrepostos:

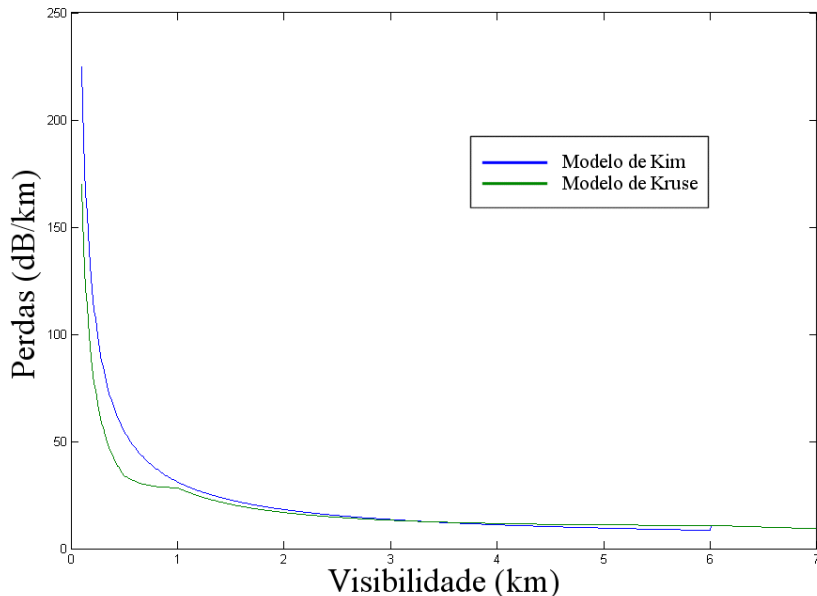


Figura 12 - Perdas por espalhamento de Mie seguindo os modelos de Kim e Kruse para o parâmetro 'q' [10]

Observa-se na Figura 12 que seguindo o modelo de Kim as perdas por espalhamento em local de neblina densa são relativamente maiores que o modelo apresentado por Kruse, essa diferença aumenta conforme o valor se aproxima de 0,5km de visibilidade. Em contrapartida após esse ponto as perdas se aproximam a ponto de inverterem as posições, quando a visibilidade aumenta para 3,5km, e aos 6km de visibilidade os dois modelos são idênticos. Quando os enlaces FSO estão em locais com freqüente neblina, necessita-se de enlaces menores, em torno de 200m de distância máxima para poder manter a disponibilidade de sinal acima de 99.99%.

É comum utilizar o modelo de Kim para o parâmetro 'q' no calculo das perdas causadas pelo espalhamento de Mie por apresentar uma curva mais suave.

c. Espalhamento devido às chuvas

Em dias chuvosos as gotas de chuva espalham o sinal do feixe como lentes suspensas no ar. Era comum utilizar o modelo do espalhamento de Mie para se calcular a perda do percurso causado pela chuva. Entretanto essa aproximação não é válida devido às dimensões das gotas de água serem muito maiores que o comprimento de onda. Existe, no entanto, existe a seguinte equação para se obter a atenuação causada pela chuva[10]:

$$\alpha_{chuva} = 1.076R^{2/3} \quad (2.20)$$

onde R é dado em mm/h e representa o volume de precipitação por unidade de tempo, a atenuação α_{chuva} é a perda do percurso e é dado em dB/km [10].

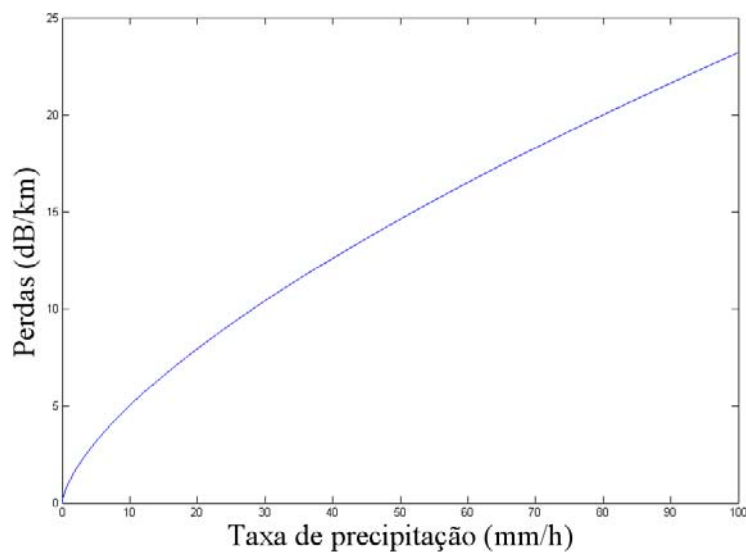


Figura 13 - Perdas por espalhamento causado pela chuva

d. Espalhamento devido à neve

A neve, igualmente como a água, possui a capacidade de atuar como lentes e espalhar a energia do feixe de laser. Mesmo que no Brasil existam poucos locais onde ocorram precipitações de flocos de neve, este fenômeno deve ser considerado.

Existem basicamente dois tipos de neve, a neve seca composta apenas de gelo, e a neve úmida, em que possui parte derretida. As equações que caracteriza as perdas causadas pela neve são descritas abaixo:

$$\alpha_{neve} = aS^b \quad (2.21)$$

onde S é a taxa de precipitação de neve e ‘ a ’ e ‘ b ’ são dados como sendo:

Para neve seca:

$$a = 5.42e^{-5}\lambda + 5.4958776 \quad b = 1.38 \quad (2.22)$$

Para neve úmida:

$$a = 1.023e^{-4}\lambda + 3.7855466 \quad b = 0.72 \quad (2.23)$$

onde λ é o comprimento de onda dado em nanômetros [10]. A Figura 14 mostra uma comparação entre os dois tipos de neve. Observa-se que a neve seca causa muito mais perdas que a neve úmida. Isso ocorre devido à constituição dos dois tipos de neve.

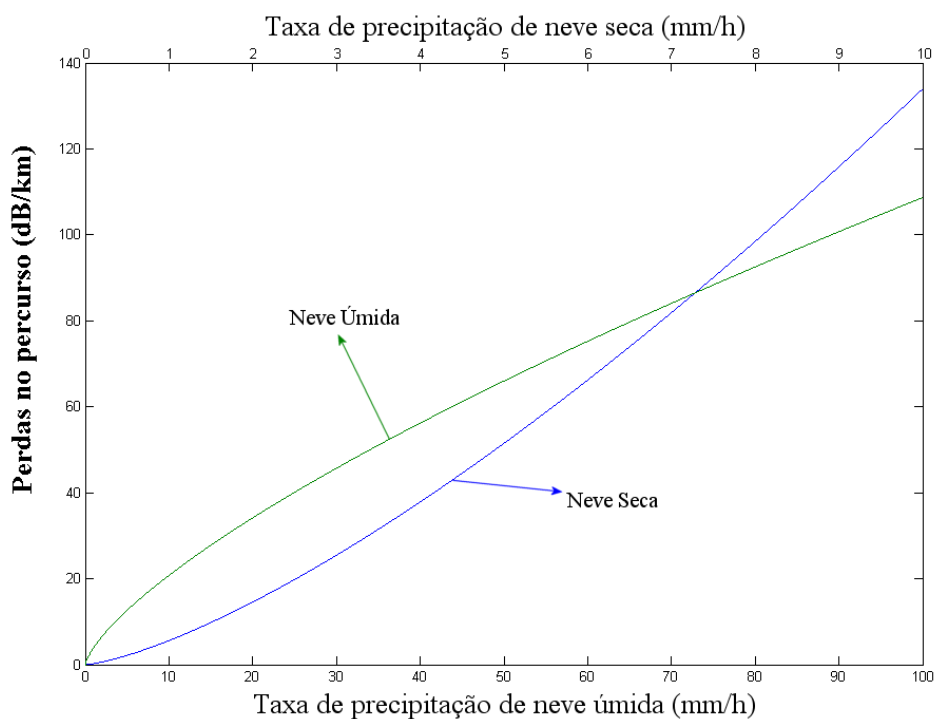


Figura 14 - Perdas causadas por espalhamento devido à neve seca e neve úmida [10]

Observa-se que dependendo do estado do tempo o tipo de espalhamento varia, uma chuva pesada, junto com neblina pode causar uma enorme atenuação no meio. E em países onde a neve é comum, uma nevasca pode bloquear o trânsito de informação no meio.

2.3.3 Turbulência

A turbulência atmosférica é um fenômeno aleatório causado por variações de temperatura que ocorrem no ar. Com o aumento da temperatura as moléculas que compõem o ar aumentam seu movimento e conseqüentemente ocasionando uma maior frequência nos choques entre as moléculas e, assim, acarretando em um maior aumento da distância entre as mesmas, tornando o ar mais rarefeito para um mesmo volume de ar mais frio.

A existência de células aleatórias de ar aquecido gera fontes de distorção luminosa causada por variações no índice de refração.

As degradações sofridas pelo sinal óptico ao trafegar por um meio turbulento alteram principalmente três características do sinal, a área da frente do feixe óptico junto ao receptor, a intensidade do sinal óptico e a abertura focal final do laser. Destes três efeitos o mais degradante é a variação na intensidade, chamado de cintilação.

A turbulência atmosférica é medida em função do coeficiente de estrutura do índice de refração, Cn^2 . Os valores típicos para este coeficiente variam de $10^{-17} \text{m}^{-2/3}$ para momentos de baixa turbulência, por volta do início da manhã e noite, e chega a $10^{-13} \text{m}^{-2/3}$ em momentos de elevadas turbulências atmosféricas, próximas ao meio dia e início do período da tarde [1].

A) Ondulação do feixe

Este efeito de turbulência é causado quando o feixe passa por uma região turbulenta com dimensões maiores que a própria dimensão do laser. Devido à relação entre as dimensões das células de turbulência utiliza-se da óptica geométrica para calcular a variação radial sofrida pelo feixe causando assim alteração na área efetiva do sinal de chegada, conforme dado a seguir:

$$\sigma_r = 1.83C_n^2 \lambda^{-1/6} L^{1/6} \quad (2.24)$$

onde L é o comprimento do enlace e λ é o comprimento de onda do laser. Observando a equação 2.24, é possível averiguar que a influência desse efeito é relativamente pequena e a dependência com o comprimento de onda indica que quanto maior for o comprimento de onda do laser menor será a variância [1].

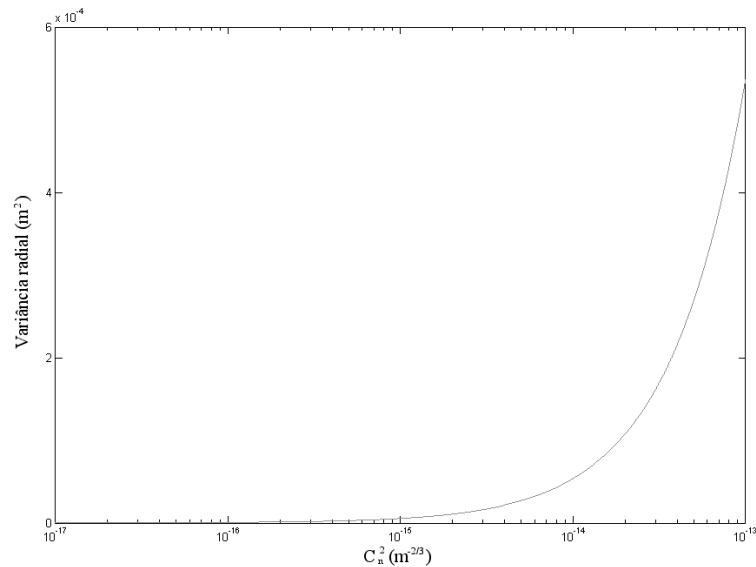


Figura 15 - Variância radial versus C_n^2 , para um trecho de 1000m e laser em 1550nm

A Figura 15 mostra como a variância radial aumenta em função da turbulência.

B) Cintilação

Esse é um efeito extremamente destrutivo para o sinal óptico que atravessa o ar. A existência da cintilação significa que interferências destrutivas ocorrem no interior do feixe de laser ocasionando a perda da informação no local afetado. As interferências causadas pela turbulência, mais especificamente a cintilação, possui posicionamento randômico, sendo necessário utilizar-se de processos probabilísticos para determinar a intensidade dos efeitos causados pela cintilação.

As flutuações causadas pela cintilação na intensidade do laser seguem uma distribuição log-normal com variância calculada em função do comprimento de onda e da distância entre fonte e receptor [1], conforme dado a seguir:

$$\sigma_i^2 = 1.23 C_n^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} L^{11/6} \quad (2.25)$$

No caso da existência de elevadas flutuações devido à turbulência, o cálculo da variância altera-se para:

$$\sigma_{elevado} = 1.0 + 0.86(\sigma^2)^{2/5} \quad (2.26)$$

Esta equação sugere que comprimentos de onda mais curtos sofrem menor influência da turbulência.

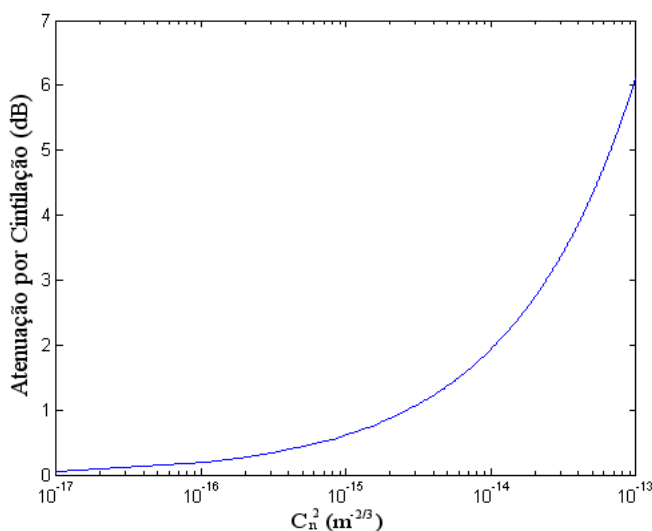


Figura 16 - Atenuação causado pela cintilação em um trecho de 1km a um laser de 1550nm

A Figura 16 apresenta a variação da atenuação gerada pela cintilação com o aumento da turbulência.

C) Abertura do feixe

Devido às variações térmicas o feixe de luz sofre uma expansão em seu raio efetivo, fenômeno este chamado “Abertura do feixe”. O valor desse aumento do raio é dado pela equação 2.27 [1], mostrada abaixo:

$$a_{ef} = 2.01\lambda^{-1/5} C_n^{2^{3/5}} L^{8/5} \quad (2.27)$$

A dependência do raio efetivo e o comprimento de onda não são fortes, e o aumento do raio do feixe é de poucos centímetros em um quilômetro como mostra a Figura 17.

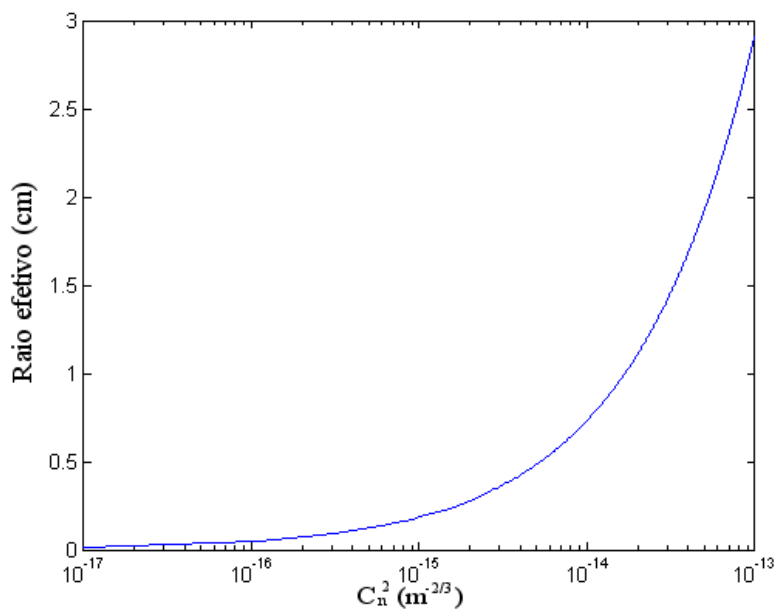


Figura 17 - Variação do raio efetivo em função da turbulência, para distância de 1000m e laser de 1550nm

É observada pela Figura 17 que quanto maior o efeito da turbulência maior o aumento do raio efetivo.

3 Modelagem Computacional do Sistema

3.1 Introdução

A modelagem computacional consiste em converter as equações matemáticas dos modelos para linguagens de programação. Uma vez programado computacionalmente, um modelo deve apresentar resultados numéricos próximos dos valores obtidos pelo equivalente físico que ele representa.

Neste capítulo propõe-se apresentar os modelos computacionais que serão utilizados nas simulações do sistema FSO externo.

3.2 Modelos dos componentes do projeto

Para realizar os testes e simulações num sistema FSO será necessária a programação dos modelos envolvidos no sistema. As simulações ocorrerão numa plataforma chamada Lightsim que ainda esta em desenvolvimento. Essa plataforma utiliza linguagem C++ em seus códigos fontes. Para a simulação será necessária a criação do modelo de uma fonte de dados, driver de corrente, laser semiconductor, enlace óptico atmosférico, fotodiodo e regeneradores.

3.2.1 Fonte de Dados e Gerador de Pulsos

No Lightsim a fonte de dados e o Gerador de Pulsos estão integradas em um único bloco chamado **fonte digital**. Este modelo possui como fonte de dados um vetor de bits que será transmitido a uma determinada taxa. Neste modelo, ainda, existe a possibilidade de se utilizar um vetor pseudo-aleatório de bits.

Quando a função “random” é escolhida os bits são obtidos pela função *rand()* que retorna um valor aleatório entre “0” e um valor máximo definido na biblioteca *stdio.h*. Para se obter o valor inteiro “0” ou “1” utiliza-se a expressão abaixo:

$$Bit = rand() \% 2; \quad (3.1)$$

onde *Bit* é a variável que receberá como valor ou ‘1’ ou ‘0’.

O valor de saída do modelo é definido a partir do tipo de pulso desejado. Como exemplo toma-se pulsos retangulares representando a seqüência 01011.

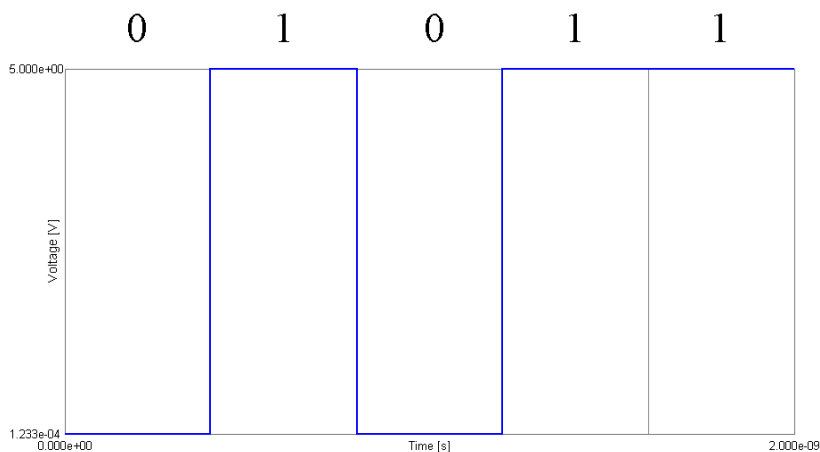


Figura 18 - Exemplo de trem de pulsos retangulares

Será utilizado o pulso retangular por ser o pulso mais simples. A expressão do pulso gerado é apresentada na equação 3.2.

$$V_{out} = \begin{cases} V_{hi}, p / Bit = 1 \\ V_{lo}, p / Bit = 0 \end{cases} \quad (3.2)$$

onde V_{hi} é o valor máximo de saída, definido pelo usuário; V_{lo} é o valor de tensão para níveis lógicos baixos. Abaixo é apresentada parte do código fonte deste bloco:

```
CreatePar_VALUE( &fBitRate, "Bit Rate: [bits/s]", 0, 100e9, 2.5e9 );
CreatePar_VALUE( &fVHi, "High Level Voltage: [V]", 0, 100, 5 );
CreatePar_VALUE( &fVLow, "Low Level Voltage: [V]", 0, 100, 0 );
CreatePar_SEQUENCE( fBitsSequence, "Bits Sequence:", "01", "101001101" );
CreatePar_OPTION( fRepeat, "Repeat:", 0, 2, "Yes", "No" );
CreatePar_OPTION( fPulseFormat, "Pulse Format:", 0, 5, "Rectangular", "Super
Gaussian", "Single Pole (RC)", "Solitronic", "Pre-Pulse" );
CreatePar_OPTION( fCoding, "Coding:", 0, 2, "NRZ", "RZ" );
```

Figura 19 - Declaração de variáveis de entrada do bloco *digital source*

O trecho de código fonte da Figura 19 apresenta a declaração de variáveis cujos valores são entradas do usuário. A função *CreatePar_VALUE()* é utilizada quando o usuário deve atribuir apenas um valor para uma variável, *CreatePar_SEQUENCE()* é utilizado quando se deseja que o usuário entre com uma seqüência de valores “pré-determinados” a uma determinada variável e *CreatePar_OPTION()* é utilizado quando o usuário somente pode escolher um valor de uma lista já existente.

3.2.2 Driver de corrente

O modelo de driver de corrente do lightsim converte de tensão para corrente elétrica com base nas equações 3.3 e 3.4:

$$\frac{dv_{out}}{dt} = (v_{in} - v_{out})2\pi f_{RC} \quad (3.3)$$

onde v_{in} é a tensão de entrada no driver, v_{out} é a tensão de saída, f_{RC} é a freqüência de corte do filtro RC interno. Para a obtenção do valor de tensão de saída do driver utiliza-se um

método numérico chamado Runge Kutta de 4º ordem. O valor de corrente na saída do driver é determinado como sendo:

$$i_{out} = v_{out}S + i_{bias} \quad (3.4)$$

onde S é a condutância do driver e i_{bias} é a corrente de base do driver, necessária para a polarização do laser.

O bloco do driver possibilita saída ideal, onde as capacitâncias parasitas são desprezadas. Deste modo a corrente de saída do driver passa a ser $i = v_{in}S + i_{bias}$.

```
double k1,k2,k3,k4;
dt = inputEvent.TimeStamp*1e-15 - Lt;
if(!strcmp(fIdeal, "No")){
    k1 = CalcVout( inputEvent.EData.Voltage, LVout );
    k2 = CalcVout( inputEvent.EData.Voltage, LVout + k1*dt/2 );
    k3 = CalcVout( inputEvent.EData.Voltage, LVout + k2*dt/2 );
    k4 = CalcVout( inputEvent.EData.Voltage, LVout + k3*dt );
    double NVout = LVout + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)*dt/6;
    LVout = NVout;
} else {
    LVout = inputEvent.EData.Voltage;
}
Lt = inputEvent.TimeStamp*1e-15;
...
double CModel::CalcVout(double Vin, double Vout)
{
    double T;
    T = 2*M_PI*fBandwidth;
    double aux = (Vin-Vout)*T;
    return aux;
}
```

Figura 20 - Trecho de código do bloco *current driver*

A Figura 20 apresenta parte do código fonte do driver de corrente, este código está realizando o Runge Kutta de 4º ordem para resolver a equação 3.3, observe que é necessário saber o último valor da tensão de saída, $LVout$, o valor atual, $inputEvent.EData.Voltage$, e o tempo decorrido entre a última interação e a atual, $dt = inputEvent.TimeStamp*1e-15 - Lt$. A função $CalcVout()$ é a representação computacional da equação 3.3.

3.2.3 Laser Semicondutor

Os lasers semicondutores são estruturas com a capacidade de emitir fótons quando polarizados. O modelo do laser possui três equações diferenciais conectadas que o caracteriza. É aplicado o método de Runge Kutta de quarta ordem para a obtenção dos valores numéricos. Abaixo seguem as equações características do laser [24]:

$$\frac{dS}{dt} = \left(G(N, S) - \frac{1}{\tau_p} \right) S + R_{sp} \quad (3.5)$$

$$\frac{dN}{dT} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_e} - G(N, S)S \quad (3.6)$$

onde S é o número de fótons gerados, N é o número de portadores, $G(N, S)$ é o ganho em função do número de fótons e o portadores, R_{sp} é o número de fótons gerador por emissão espontânea e τ_p e τ_e são o tempo de vida dos fótons e dos portadores respectivamente, I é a corrente injetada na cavidade e q é a carga de um elétron.

O ganho e o número de fótons gerados por emissão espontânea são calculados a partir das seguintes equações 3.7 e 3.8, respectivamente:

$$G(N, S) = \Gamma v_g a \left(\frac{N}{V} - \eta_0 \right) (1 - \varepsilon S) \quad (3.7)$$

$$R_{sp} = \beta_{sp} B \frac{N^2}{V} \quad (3.8)$$

onde Γ é o fator de confinamento, v_g é a velocidade de grupo definido por c/n_g , onde n_g é o índice de refração de grupo, a é coeficiente de ganho diferencial, V é o volume da cavidade ativa, η_0 é a densidade de portadores na transparência, ε é o fator de compressão do ganho, β_{sp} é fator de emissão espontânea e B é o coeficiente de recombinação radiativa.

A fase dos fótons é obtida por:

$$\frac{d\phi}{dt} = 0.5\beta_c \left(G(N,S) - \frac{1}{\tau_p} \right) \quad (3.9)$$

onde β_c é o fator de alargamento de linha.

```

double k1, k2, k3, k4;
double j1, j2, j3, j4;
double l1, l2, l3, l4;
double vg = LIGHT_SPEED/n_g;
dt = n_g*L/(2*LIGHT_SPEED);
k1 = CalcPhotons( lastS, lastN );
j1 = CalcCarriers( lastI, lastS, lastN );
l1 = CalcPhase( lastS, lastN );
k2 = CalcPhotons( lastS + k1*dt/2, lastN + j1*dt/2 );
j2 = CalcCarriers( lastI, lastS + k1*dt/2, lastN + j1*dt/2 );
l2 = CalcPhase( lastS + k1*dt, lastN + j1*dt );
k3 = CalcPhotons( lastS + k2*dt/2, lastN + j2*dt/2 );
j3 = CalcCarriers( lastI, lastS + k2*dt/2, lastN + j2*dt/2 );
l3 = CalcPhase( lastS + k2*dt, lastN + j2*dt );
k4 = CalcPhotons( lastS + k3*dt, lastN + j3*dt );
j4 = CalcCarriers( lastI, lastS + k3*dt, lastN + j3*dt );
l4 = CalcPhase( lastS + k3*dt, lastN + j3*dt );
double newS = lastS + (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4)*dt/6;
double newN = lastN + (j1 + 2*j2 + 2*j3 + j4)*dt/6;
double newFi = lastFi + (l1 + 2*l2 + 2*l3 + l4)*dt/6;

```

Figura 21 - Parte do código fonte do DFB Laser: Runge Kutta

A Figura 21 apresenta o cálculo da Runge Kutta de 4º ordem das equações diferenciais do laser semiconductor, as equações diferenciais estão apresentadas logo abaixo:

```

double CModel::CalcPhotons(double S_in, double N_in){
    double V, aux1, vg, G, Tao_p, R_sp, aux2;
    V = L*d*w;
    aux1 = N_in/V;
    vg = LIGHT_SPEED/n_g;
    G = Gama*vg*a*(aux1 - Eta_0);
    Tao_p = 1.0/(vg*(Alfa_int + Alfa_m));
    R_sp = Beta_sp*B*N_in*N_in/V;
    aux2 = (G - 1/Tao_p)*S_in + R_sp;
    return aux2;
}
double CModel::CalcCarriers(double I_in, double S_in, double N_in){
    double V, aux1, vg, G, Tao_e, aux2;
    V = L*d*w;
    aux1 = N_in/V;
    vg = LIGHT_SPEED/n_g;
    G = Gama*vg*a*(aux1 - Eta_0);
    Tao_e = (A_nr + B*aux1 + C*aux1*aux1);
    aux2 = I_in/(ELECTRON_CHARGE) - N_in*Tao_e - G*S_in;
    return aux2;
}
double CModel::CalcPhase(double S_in, double N_in){
    double V, aux1, vg, G, Tao_p, R_sp, aux2;
    V = L*d*w;
    aux1 = N_in/V;
    vg = LIGHT_SPEED/n_g;
    G = Gama*vg*a*(aux1 - Eta_0);
    Tao_p = 1.0/(vg*(Alfa_int + Alfa_m));
    aux2 = (1.0/2.0)*Beta_c*(G - 1/Tao_p);
    return aux2;
}

```

Figura 22 - Parte do código fonte do *DFB Laser*: equações diferenciais

Na Figura 22 as funções `CModel::CalcPhotons`, `CModel::CalcCarriers` e `CModel::CalcPhase` representam as equações de taxa do laser, ou seja, as equações diferenciais dos fótons, portadores e fase do laser respectivamente.

Do momento em que o laser é ligado até entrar em operação o sinal óptico sofre muitas oscilações que são chamadas de oscilações de relaxação. Durante a ocorrência das oscilações o sinal não deve ser enviado. A Figura 23 ilustra esse fenômeno.

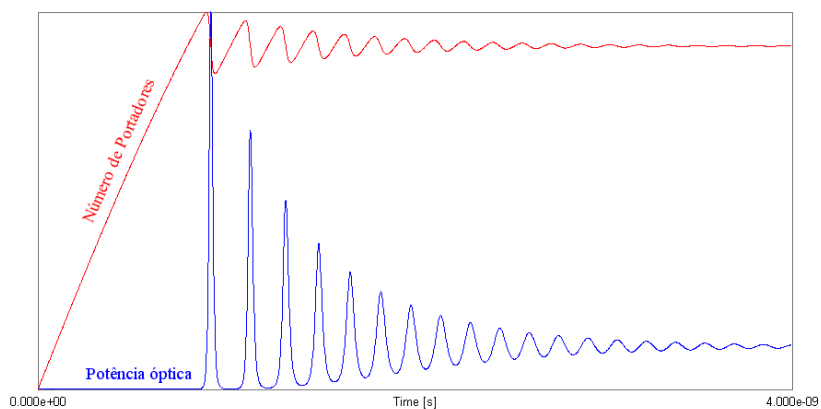


Figura 23 - Variação do número de portadores e da potência óptica com o tempo, interdependência de portadores e fótons causa oscilações de relaxação na potência.

Este fenômeno sempre ocorre, mas dependendo do tipo do laser e da forma do pulso as oscilações podem ser minimizadas. A Figura 24 apresenta um pulso retangular aplicado ao laser.

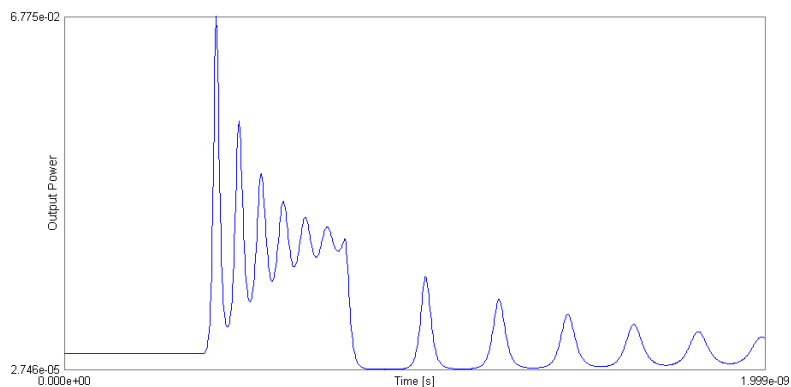


Figura 24 - Oscilações de Relaxação em pulso de laser

Observe que uma grande oscilação ocorre quando o laser recebe o pulso de modulação, e quando o pulso termina a potência cai causando novas oscilações.

3.2.4 Enlace Atmosférico

A potência de saída do enlace atmosférico é obtida pela soma de todos os efeitos que foram apresentados no capítulo 2. Assim as perdas totais no enlace são dadas por:

$$P_{out} = P_{in} \alpha_g \alpha_i \alpha_s \quad (3.10)$$

onde α_s é a atenuação por espalhamento total, α_g é a perda ocasionada pelo acoplamento geométrico, α_i representa o efeito da cintilação e P_{in} é a potência óptica emitida no ar.

A atenuação geométrica é obtida pela equação 2.8.

$$\alpha_g = \frac{\int_0^{2\pi r_r} \int_0^0 |A(r, \varphi, z)|^2 r dr d\varphi}{\int_0^{2\pi \infty} \int_0^0 |A(r, \varphi, z)|^2 r dr d\varphi} \quad (3.11)$$

Substituindo $A(r, \varphi, z)$ pelo valor dado na equação 2.5, tem-se:

$$\int_0^{2\pi r_r} \int_0^0 A_0^2 \frac{r_0^2}{r_z^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_z^2}\right) r dr d\varphi \quad (3.12)$$

Aplicando a integral em r tem-se:

$$\int_0^{2\pi} A_0^2 \frac{r_0^2}{4} \left(-\exp\left(-2 \frac{r^2}{r_z^2}\right) \right)_0^{r_r} d\varphi \quad (3.13)$$

Agora se aplica os limites de integração:

$$\int_0^{2\pi} A_0^2 \frac{r_0^2}{4} \left(1 - \exp\left(-2 \frac{r_r^2}{r_z^2}\right) \right) d\varphi \quad (3.14)$$

A integração em φ é trivial e dada por:

$$A_0^2 \frac{\pi r_0^2}{2} \left(1 - \exp\left(-2 \frac{r_{lr}^2}{r_z^2}\right) \right) \quad (3.15)$$

Aplicando agora os efeitos das turbulências e obtido a equação abaixo:

$$\alpha_g = \frac{\frac{\pi r_0^2}{2} \left(1 - \exp\left(-2 \frac{r_{lr}^2}{(r_z + a_{ef})^2}\right) \right)}{\left(\frac{\pi r_0^2}{2} + \sigma_r \right)} \quad (3.16)$$

A cintilação gera perda direta na potência óptica do laser. A equação da cintilação é dada por:

$$\alpha_i = \exp(-\sigma_i) \quad (3.17)$$

E a atenuação total causada pelo espalhamento é dada por:

$$\alpha_s = \exp(-(\alpha_{Mie} + \alpha_{Chuva} + \alpha_{Neve})L) \quad (3.18)$$

Nos dias onde não há chuva ou a neve os valores para α_{chuva} e α_{neve} passam a valer 0. Abaixo segue parte do código fonte do bloco atmosférico.

```

Loss = GeomLoss();
Loss *= SpreadLoss();
Loss *= CintilationLoss();
if(!strcmp(Cond,"Raining"))
    Loss *= RainingLoss();
if(!strcmp(Cond,"Snowing"))
    Loss *= SnowingLoss();
...
double CModel::SpreadLoss(){
    double b;
    if (Visibility < 6){
        b = (3.91/Visibility)*pow((Wavelength*1e9/550.0),-0.585*pow(Visibility, 1.0/3.0));
    }else if (Visibility > 50){
        b = (3.91/Visibility)*pow((Wavelength*1e9/550.0),-1.6);
    }else {
        b = (3.91/Visibility)*pow((Wavelength*1e9/550.0),-1.3);
    }
    double Alfa_Vis = exp(- b * Length * 1.0e-3);
    return Alfa_Vis;
}
double CModel::CintilationLoss(){
    double si2 = 1.23*Cn2*pow(2*M_PI/Wavelength,7.0/6.0)*pow(Length, 11.0/6.0);
    return exp(-sqrt(si2));
}
double CModel::RainingLoss(){
    double arain = 1.076*pow(mmph,2.0/3.0)*Length*1e-3;
    arain = pow(10,-arain/10);
    return arain;
}
double CModel::SnowingLoss(){
    double a, b;
    if(!strcmp(Snow,"Wet")){
        a = 1.023e-4*Wavelength + 3.7855466;
        b = 0.72;
    } else {
        a = 5.42e-5*Wavelength + 5.4958776;
        b = 1.38;
    }
    double asnow = a*pow(mmph,b)*Length*1e-3;
    asnow = pow(10,-asnow/10);
    return asnow;
}

```

Figura 25 - Trecho de código fonte do *Atmosferic link*

Na Figura 25 as funções $CModel::SpreadLoss()$, $CModel::CintilationLoss()$, $CModel::RainingLoss()$, $CModel::SnowingLoss()$ e $CModel::GeomLoss()$ são respectivamente as equações das perdas por espalhamento de Mie, cintilação, espalhamento pela chuva, espalhamento pela neve e perda geométrica. Observa-se que os espalhamentos pela chuva e pela neve apenas são calculados quando a variável *Cond* indicar *Raining* ou *Snowing*.

3.2.5 Fotodiodo

A corrente gerada pelo fotodiodo é dada por:

$$I_p = RP_{in} \quad (3.19)$$

onde R é a responsividade do fotodiodo, e é dada por:

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta\lambda}{1.24} \quad (3.20)$$

A responsividade muda de um fotodiodo do tipo PIN para um APD pela equação:

$$R_{APD} = MR_{PIN} \quad (3.21)$$

Abaixo segue o trecho de código que representa as equações 3.19, 3.20 e 3.21.

```

dt = inputEvent.TimeStamp*1e-15-Lt;
double R = fgain*inputEvent.OData.Wavelength*feta*ELECTRON_CHARGE/
(LIGHT_SPEED*PLANCK_CONSTANT);
double Iin = inputEvent.OData.Amplitude*R;
double Inoise;
double SNR;
if(!strcmp(AddNoise, "Yes")) Inoise = Noise(Iin);
else Inoise = 0.0;
double Iout = Iin + Inoise;
double vout = Iout*fRload;
Lt = inputEvent.TimeStamp*1e-15;
if(!strcmp(AddNoise, "Yes"))SNR = 20*log10(sqrt((Iin/Inoise)*(Iin/Inoise)));
else SNR = 20*log10(1e100);

```

Figura 26 - Trecho de código fonte do *PhotoDiode*

Na Figura 26 a função *Noise()* é calculado o ruído total existente no fotodiodo. Este é composto por três fontes de ruído inerente à eletrônica do fotodiodo, estas fontes de ruídos são: ruído balístico, ruído térmico e o ruído causado pela corrente de escuro [14].

Um dos ruídos é causado pela corrente de escuro e é dado por:

$$\sigma_d^2 = 2qI_d B_e \quad (3.22)$$

onde σ_d^2 é a variância da corrente causada pela corrente de escuro, I_d . q é a carga do elétron e B_e representa a banda elétrica do fotodiodo. A corrente de escuro é gerada aleatoriamente dentro do dispositivo com a ausência do sinal incidente, assim mesmo que nada seja transmitida, uma pequena corrente ruidosa é gerada.

A outra fonte de ruído é o ruído *shot*, ou ruído balístico, o qual é uma fonte de ruído gerada pela aleatoriedade dos fótons que incidem no fotodiodo:

$$\sigma_s^2 = 2qI_p B_e \quad (3.23)$$

onde I_p é a corrente foto gerada pelo sinal incidente.

Por ultimo o ruído Térmico causado pela agitação térmica dos elétrons internos ao dispositivo:

$$\sigma_i^2 = \frac{4k_bTB_e}{R_l} \quad (3.24)$$

onde k_b é a constante de Boltzmann e R_l é a resistência de carga do sistema.

O ruído total gerado pelo fotodiodo é dado por $\sigma_{total}^2 = \sigma_d^2 + \sigma_p^2 + \sigma_i^2$. O valor da corrente de ruído gerada pelo fotodiodo é dado por um valor aleatório entre $\pm\sigma_{total}$ calculado em função de uma distribuição normal de corrente.

Utilizando a função $rand()$ obtém os valores aleatórios necessários para se obter a corrente de ruído.

A tensão de saída do foto diodo é dada por:

$$V_{out} = (i_{out} + i_{noise})R_l \quad (3.25)$$

Onde i_{noise} é a corrente de ruído.

3.2.6 Filtros

Os filtros elétricos analógicos podem ser construídos utilizando circuitos RC, RL, RLC ou apenas LC. O filtro mais simples é o filtro RC passa baixa de primeira ordem. A equação deste filtro é dada por:

$$\frac{dv_{out}(t)}{dt} = \frac{2\pi}{f_{3dB}} (v_{in}(t) - v_{out}(t)) \quad (3.26)$$

onde f_{3dB} é a frequência de corte do filtro, $v_{in}(t)$ é a tensão na entrada do filtro e $v_{out}(t)$ é a tensão de saída. Se o filtro possuir uma ordem maior, a tensão de saída de um filtro passa a ser à entrada do outro filtro. O modelo de um filtro ativo é semelhante ao do filtro passivo, a diferença encontra-se em um ganho que multiplica o valor da saída do filtro.

3.3 Análise de desempenho

Uma vez que se tenha obtido os sinais elétricos no receptor, existem técnicas de se avaliar a qualidade do mesmo. Uma das técnicas comumente utilizada para se analisar a desempenho de um sistema é observar a relação sinal ruído do sinal, SNR, este valor é dado por [24]:

$$SNR = 20 \log_{10} \left(\frac{V_m}{\sigma_v} \right) \quad (3.27)$$

onde V_m é a tensão média do sinal, e σ_v é o desvio padrão do sinal.

Existe também o diagrama de olho, o qual consiste na sobreposição de curvas de modo a obter a visualização de um “olho” formado pelos pulsos. Abaixo segue um exemplo de um diagrama de olho:

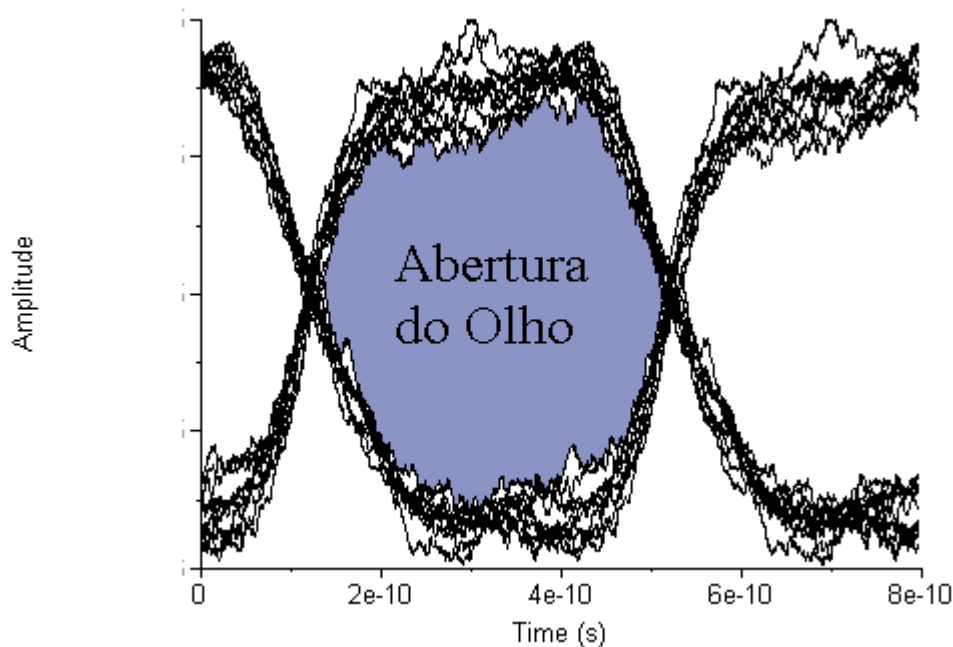


Figura 27 - Exemplo de diagrama de olho

Quanto maior for à área da abertura do olho maior é a qualidade do sinal.

Existe também o BER, *bit error rate*, o qual representa o número total de bits enviados com erro. O BER desejado na maioria dos sistemas de comunicação é na ordem de $1e-9$, ou seja, um bit com erro em um bilhão de bits enviados.

Quando se utiliza simulação, o envio de bits necessários para se obter o valor da taxa de erro pode demorar muitas horas. Assim existe um cálculo com base na função estatística Q que resolve este problema, [25].

$$BER = Q\left(\frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 - \sigma_0}\right) \quad (3.28)$$

onde m_1 é a média de valores no nível lógico '1', m_0 é a média de valores no nível lógico '0', σ_1 é o desvio padrão do nível lógico '1', e σ_0 é o desvio padrão dos valores no nível lógico '0'.

A função estatística Q é definida como sendo:

$$Q(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2}\right) d\xi \quad (3.29)$$

Esta equação pode ser simplificada quando $a \geq 3$ da seguinte maneira:

$$Q(a) = \frac{1}{a\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{a^2}{2}\right) \quad (3.30)$$

A função estatística Q é idêntica à função de erro complementar, $erfc(x)$.

4 Simulações e Resultados

4.1 Introdução

As simulações foram realizadas na plataforma lightsim e as conclusões foram obtidas com base nos diagramas de olho, BER, SNR e a atenuação total do enlace. Diversas condições atmosféricas foram consideradas nestas simulações.

O diagrama de blocos utilizado no software lightsim é mostrado na Figura 28 , onde são apresentadas a janela do aplicativo de simulação e o diagrama de blocos montados na área de trabalho do software de simulação.

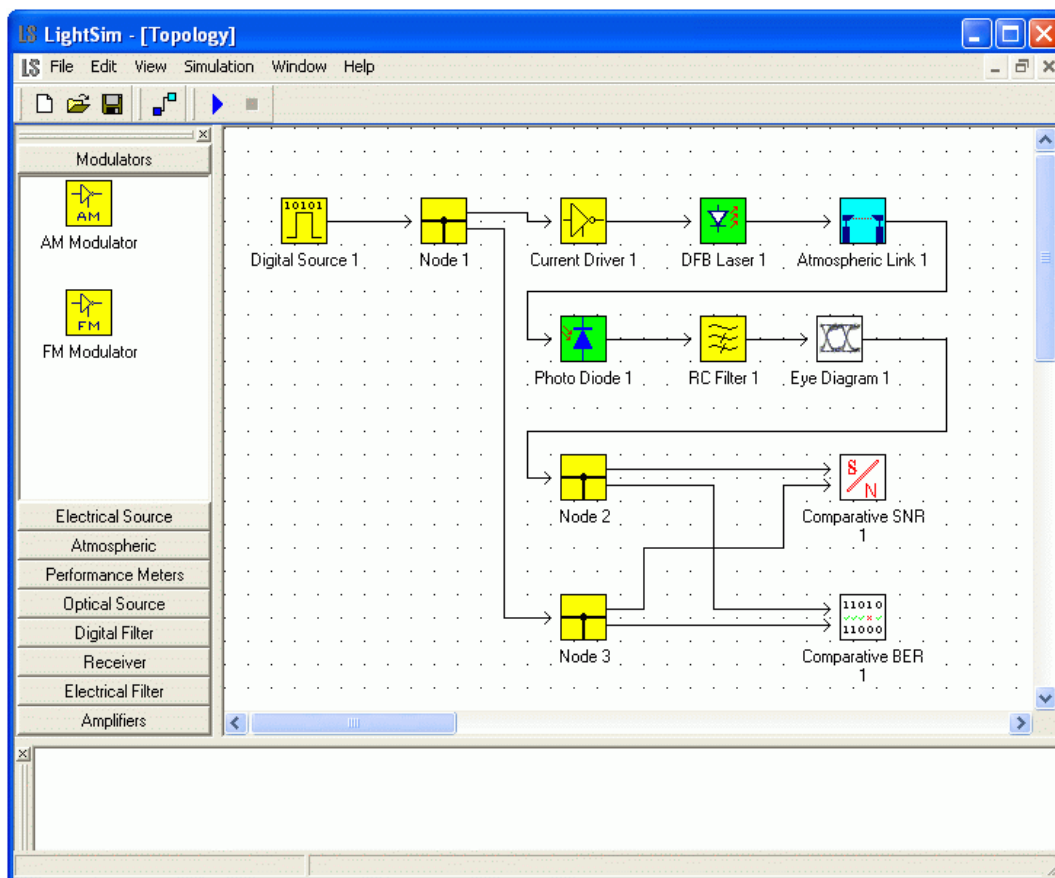


Figura 28 - Janela de simulação do Lightsim com o diagrama de blocos do sistema FSO

No lightsim cada bloco apresenta uma cor diferente para classificar os modelos como dispositivos elétricos, ópticos, enlaces, e analisadores de desempenho.

Os blocos em amarelos representam dispositivos eletrônicos, como as fontes digitais, drivers de corrente, filtros elétricos, moduladores, etc. Os blocos em verde são dispositivos com características ópticas, como os lasers, fotodiodos, leds, amplificadores ópticos, etc. Em azul apresentam-se os enlaces ópticos, como o link atmosférico e as fibras. Os blocos na cor branca são analisadores de desempenho e não introduz variação nos sinais.

Os blocos de suporte ao enlace óptico, isto é, fonte digital, driver, laser, fotodiodo, e filtro, serão ajustados com seus valores típicos que serão alterados quando necessário com os devidos comentários.

4.2 Análise de atenuação do enlace

Uma simulação típica de desempenho de enlace consiste em caracterizar as atenuações ópticas que ocorrem em seu percurso. No caso de FSO as variações ocorrem devido às variações atmosféricas, como ditas no Capítulo 2, com o intuito de validar os modelos matemáticos do enlace atmosférico. Nesta parte da simulação foi utilizado laser com comprimento de onda em 1550nm, e realizaram-se variações nos valores da distância, visibilidade, condições de chuva, condições de neve.

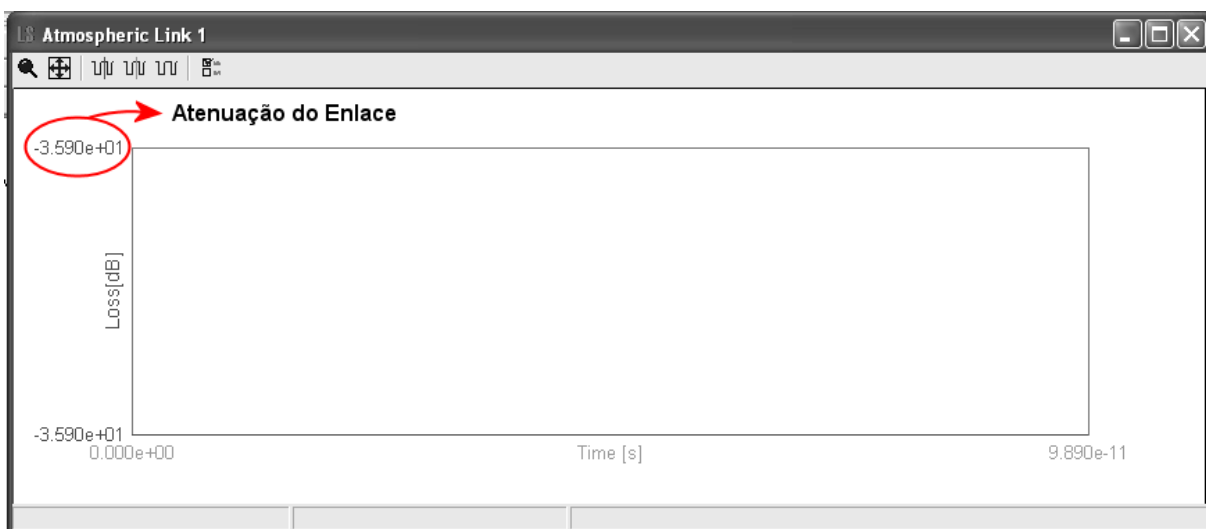


Figura 29 - Valor da atenuação do enlace atmosférico

Os valores da atenuação do enlace atmosférico são obtidos diretamente a partir do gráfico *Loss* do bloco *Atmospheric Link*, o valor da atenuação esta marcada na Figura 29 o qual é utilizado nas subseções seguintes para preencher as tabelas e criar os gráficos que foram gerados no Matlab a partir dos dados obtidos do Lightsim com o intuito de validar o modelo.

4.2.1 Atenuação geométrica

Esta simulação visa mostrar a variação da perda geométrica em função da distância. Para isto o bloco atmosférico é configurado com visibilidade máxima, maior que 50km, com tempo limpo, isto é, sem chuva e neve, para minimizar o efeito de espalhamento atmosférico. Reduz-se ao mínimo o efeito de turbulência, tornando assim a atenuação dependente apenas da geometria do feixe.

Em geral os feixes ópticos de um sistema FSO são divergentes, contudo é possível utilizar feixes colimados para aumentar a distância máxima alcançável. Porém as utilizações de feixes colimados tende a possuir maior susceptibilidade à vibrações mecânicas aplicadas às estruturas de sustentação dos equipamentos.

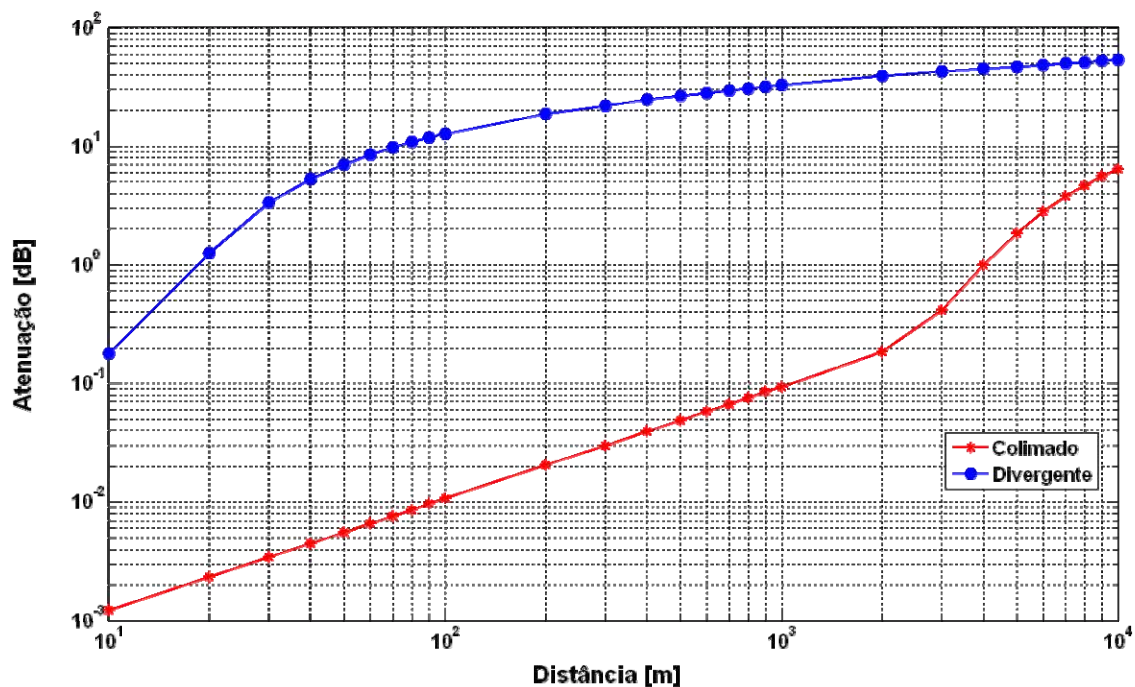


Figura 30 - Atenuação geométrica. (Comparação entre feixes divergentes e colimados)

Os gráficos da Figura 30 mostra as variações que ocorre na perda causada pela captação do feixe óptico pela lente do receptor. Observe que a partir de 2000m ocorre uma descontinuidade das perdas do feixe colimado (compare com o gráfico da Figura 9), o que é devido ao raio do feixe se tornar maior que o raio da lente da recepção, ocasionando assim uma variação repentina na atenuação do sinal. O feixe divergente possui uma abertura focal grande o suficiente a ponto de o raio ultrapassar rapidamente o raio da lente, ocasionando perda maior.

4.2.2 Perda por Dispersão

Para esta simulação o bloco atmosférico é configurado com um enlace de 1000m e é variado o valor da visibilidade para avaliar o efeito do espalhamento de mie, causado pela neblina. Este efeito é caracterizado seguindo os dados da *International Visibility Codes for Weather Conditions e Precipitation*, Tabela 2, que fui utilizado para validar o modelo.

Tabela 2 - Atenuação Atmosférica em função da visibilidade

Visibilidade	Atenuação Tabelada
50km	0.06 dB/km
23km	0.19 dB/km
20km	0.22 dB/km
18.1km	0.24 dB/km
10km	0.44 dB/km
5.9km	0.96 dB/km
4km	1.62 dB/km
2.8km	2.58 dB/km
2km	3.96 dB/km
1.9km	4.22 dB/km
1km	9.26 dB/km
770m	12.65 dB/km
500m	20.99 dB/km
200m	59.57 dB/km
50m	271.65 dB/km

Para comparar os dados da Tabela 2 com o modelo utilizado foram realizadas diversas simulações no lightsim e a cada simulação era extraído o valor da atenuação do gráfico de atenuação do bloco atmosférico. Em seguida é mostrada a representação gráfica desta comparação:

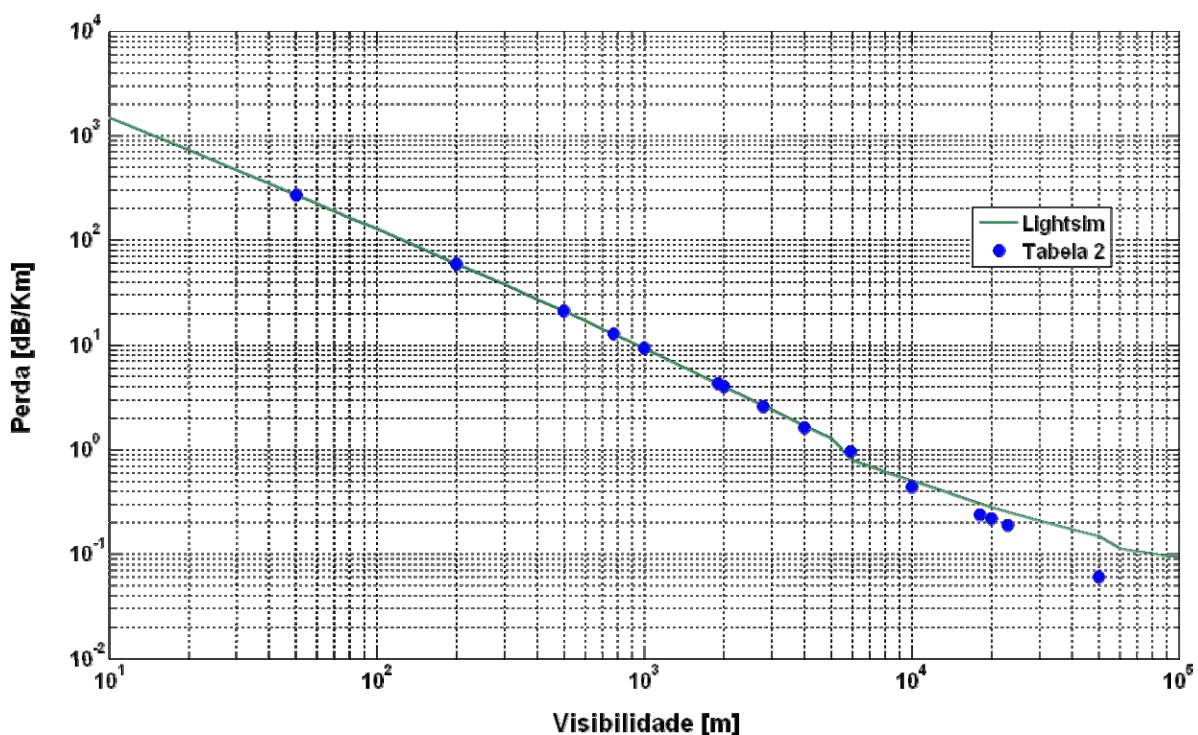


Figura 31 - Atenuação atmosférica em função da visibilidade

As discontinuidades ocorrem devido ao modelo do espalhamento de mie, onde o valor do coeficiente q varia com o valor da visibilidade. Pode-se observar que os valores da atenuação modelada possuem pouca variação quando comparado com os valores da Tabela 2. Os pontos que apresentam erros ocorrem devido a outras perdas do sistema, como geométrica e turbulência.

Uma outra possibilidade para o modelo do FSO é simular as perdas geradas pela chuva onde as gotas de água comportam-se como lentes esféricas que desviam parte da energia do sinal para outras direções. Os valores das perdas apresentada pelo lightsim para este caso estão apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Variação da atenuação por quilometro devido à precipitação em um enlace de 1km

Taxa de precipitação (mm/h)	Atenuação (dB/km)
1	1.17E+00
2	1.81E+00
3	2.34E+00
4	2.81E+00
5	3.24E+00
6	3.65E+00
7	4.03E+00
8	4.40E+00
9	4.75E+00
10	5.09E+00
20	8.03E+00
30	1.05E+01
40	1.27E+01
50	1.47E+01
60	1.66E+01
70	1.84E+01
80	2.01E+01
90	2.17E+01

Pela Tabela 3 é observada que ocorrem alterações com a intensidade da chuva, porém este valor é apenas uma parte do valor real das perdas geradas em uma situação de chuva, isto porque existe uma variação da visibilidade com o aumento da intensidade da precipitação, a qual foi desprezada nesta simulação.

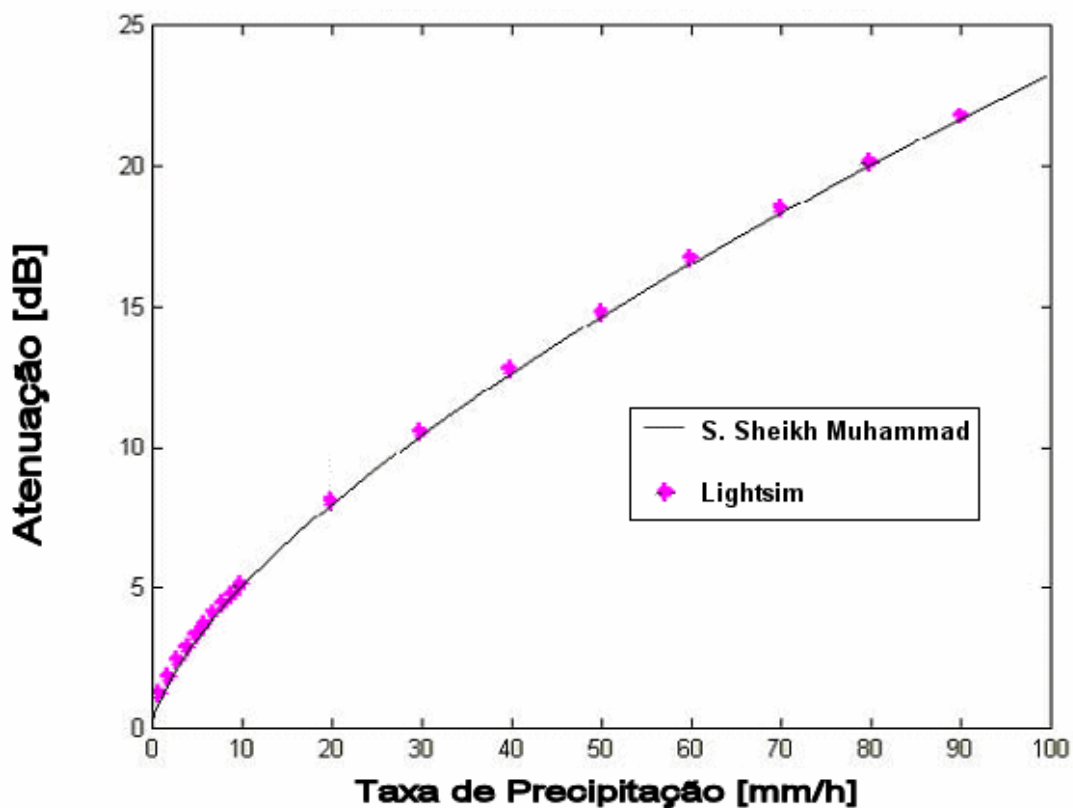


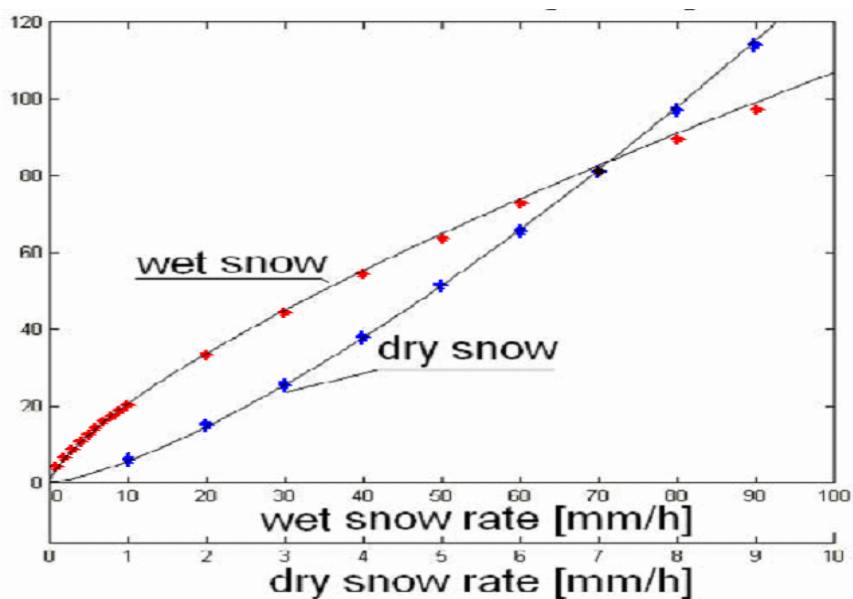
Figura 32 - Variação da atenuação com a intensidade de chuva.

A Figura 32 são mostrados os resultados obtidos pelo lightsim em comparação com os resultados obtidos por [S. Sheikh Muhammad] [10], é possível verificar que existe um pequeno erro entre os valores do obtidos por Muhammad e os obtidos pelo lightsim, isto ocorre devido à sobreposição dos efeitos de geometria do feixe, turbulência e visibilidade os quais não são nulos. O mesmo tipo de simulação é realizada em situações onde ocorre precipitação de neve, neste caso a atenuação passa a ser como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Variação da atenuação devido a presença de neve (comparação entre neve seca e neve úmida)

Taxa de precipitação (mm/h)	Atenuação devido à neve úmida (dB/km)	Atenuação devido à neve seca (dB/km)
1	3.88E+00	5.59E+00
2	6.33E+00	1.44E+01
3	8.45E+00	2.51E+01
4	1.04E+01	3.73E+01
5	1.22E+01	5.10E+01
6	1.39E+01	6.53E+01
7	1.55E+01	8.07E+01
8	1.70E+01	9.70E+01
9	1.85E+01	1.14E+02
10	2.00E+01	1.31E+02
20	3.28E+01	3.43E+02
30	4.39E+01	6.00E+02
40	5.40E+01	8.93E+02
50	6.34E+01	1.22E+03
60	7.23E+01	1.56E+03
70	8.08E+01	1.93E+03
80	8.89E+01	2.32E+03
90	9.67E+01	2.73E+03

Observa-se que a atenuação causada pela neve seca é superior ao gerado pela neve úmida, como apresentado no Capítulo 2, isto ocorre devido à velocidade da precipitação da neve seca ser menor aumentando assim o tempo em que fica no percurso do sinal.

**Figura 33 – Comparativo da atenuação por taxa de precipitação de neve**

No gráfico da Figura 33 é realizada a comparação dos dois tipos de neve com os resultados obtidos por [S. Sheikh Muhammad] [10]. Existe um pequeno erro

encontrado entre a curva do artigo de Muhammad e os obtidos por meio do lightsim este erro pode ter ocorrido por erros nas precisões dos valores bem como na sobreposição dos gráficos.

4.3 Análise de diagrama de olho

Nesta etapa de simulação será realizado a análise dos diagramas de olho do enlace FSO em diversas condições atmosféricas. Primeiramente será analisada um dia de tempo limpo, visibilidade de 9900m, feixe colimado, turbulência em $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, fotodiodo do tipo PIN, resistência de carga de 50Ω e ruídos do receptor .

Primeiramente utilizaremos um enlace de 500m, que gera a seguinte figura:

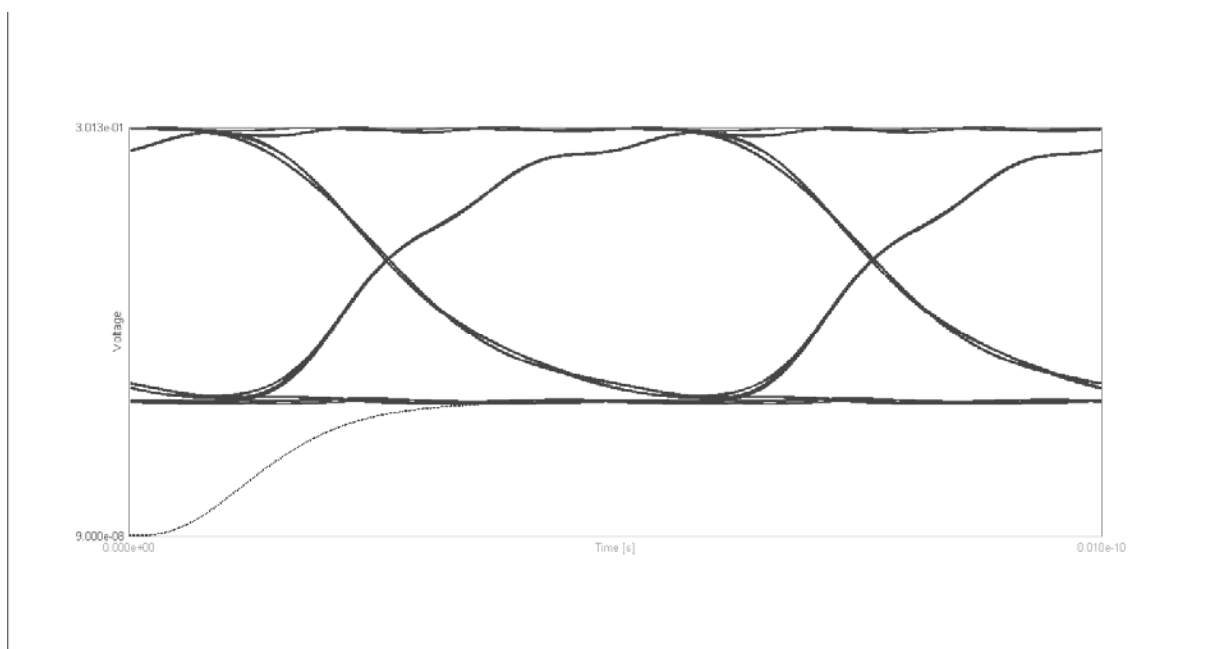


Figura 34 - Diagrama de olho para dia limpo com turbulência média e enlace de 500m

Observa-se que a 500m de distância o sistema apresenta um sinal bem limpo. Devido ao valor inicial para os cálculos, existe uma curva inicial que vai de zero até o valor mínimo, a qual pode ser desprezada, pois representa um tempo de “*warm up*” dos cálculos do fotodiodo.

Aumentando o enlace para 1500m, a curva do diagrama de olho passa a ser:

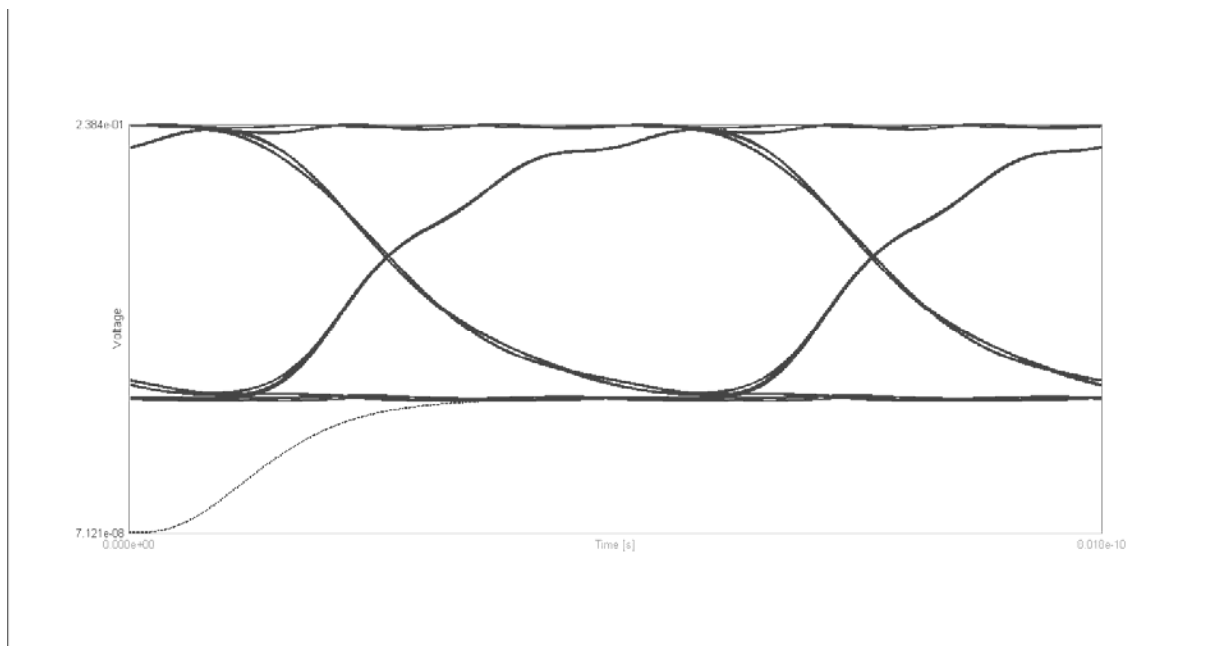


Figura 35 - Diagrama de olho para dia limpo com turbulência média e enlace de 1500m

Note que mesmo com um aumento de enlace para 1500m o diagrama ainda apresenta uma curva bem limpa e semelhante ao apresentado pela curva da Figura 34, quando os transceptores estavam próximos, a única diferença esta nos níveis de tensão.

Levando o sistema a uma situação mais extrema, reduz-se a visibilidade para 500m e coloca-se o comprimento do enlace a 1500m. A figura abaixo mostra o novo diagrama de olho.

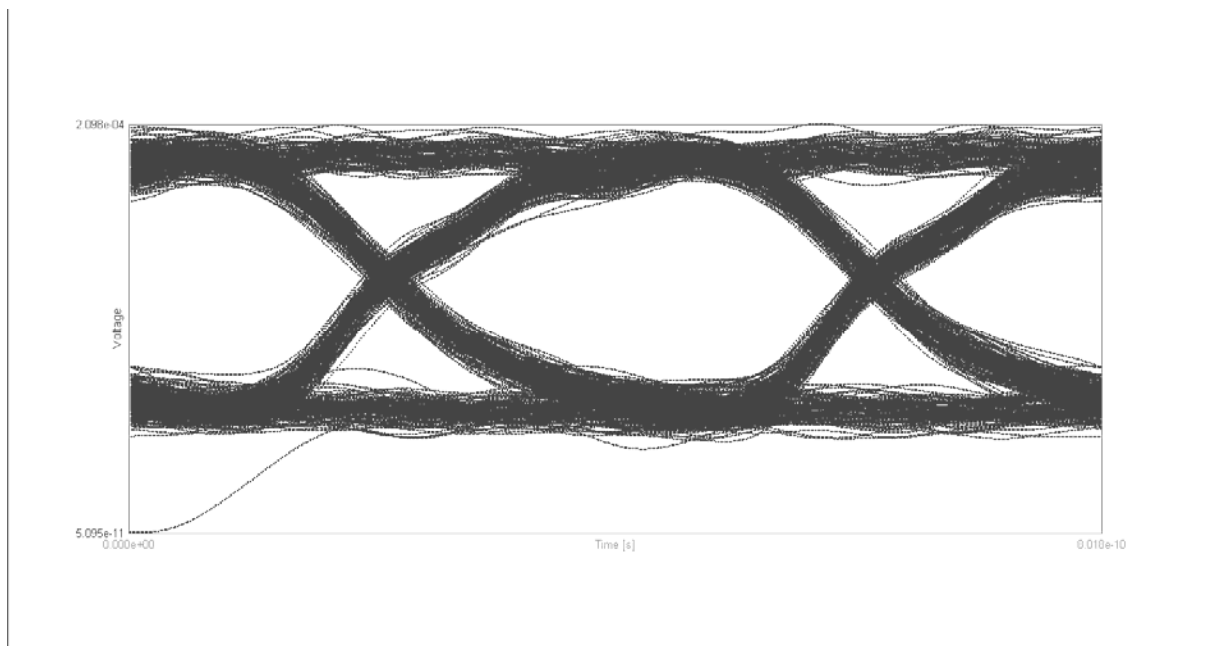


Figura 36 - Diagrama de olho para dia nublado com visibilidade de 500m, com turbulência média e enlace de 1500m

Observe que o sinal começa a ficar mais ruidoso nesta situação, devido ao aumento da perda e com isso reduzindo a relação sinal ruído. Mesmo assim, entretanto, o sinal é ainda reconhecido.

Colocando o sistema em uma situação mais extrema, reduzindo a visibilidade para 100m e um enlace de 1000m. Nesta situação o diagrama de olho passa a ser como apresentado na Figura 37:

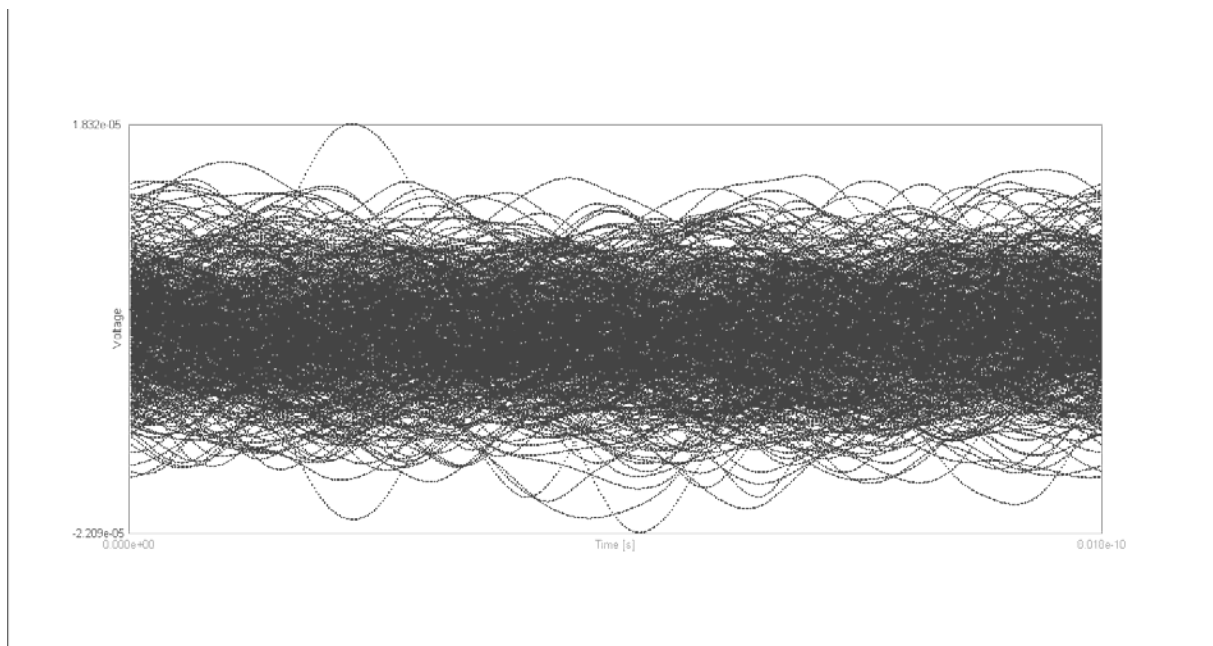


Figura 37 - Diagrama de olho para um dia com muita neblina, enlace de 1000m e visibilidade de 100m

Observa-se que nesta condição de simulação é impossível reconhecer o sinal. Para esta condição de visibilidade é necessário ou reduzir o comprimento do enlace, para que a potência mínima atinja o fotodiodo, ou substituir o fotodiodo do tipo PIN por um APD. Para se provar isto realiza-se uma nova simulação com um enlace mais curto, como apresentado no gráfico abaixo:

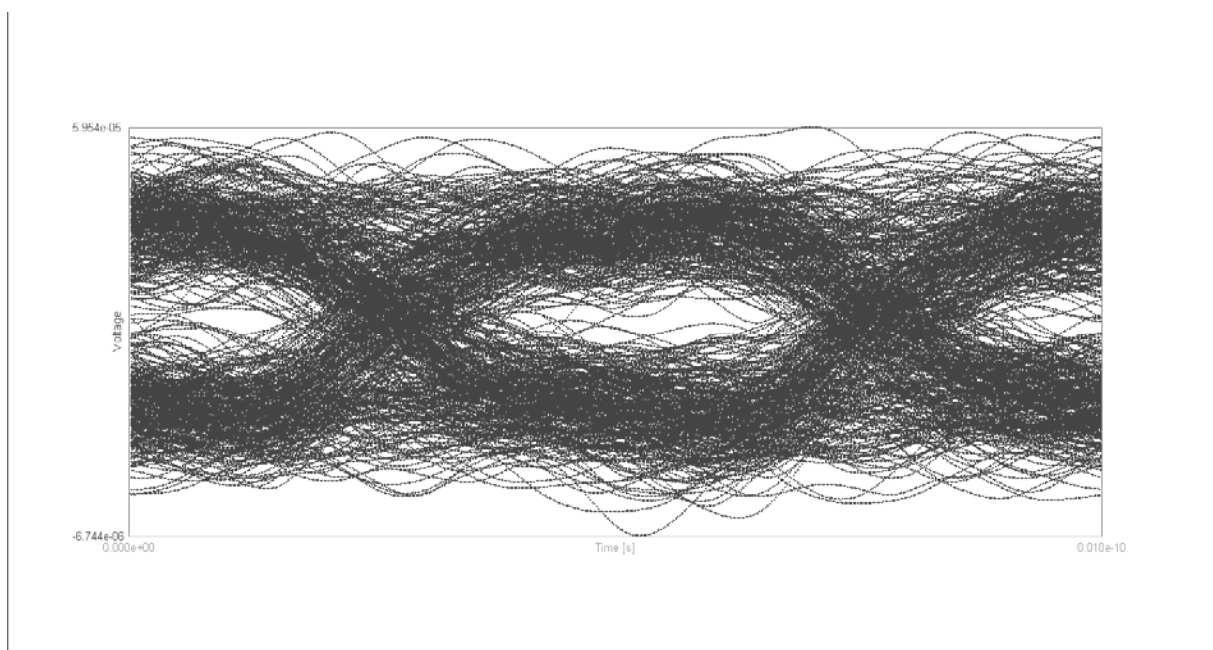


Figura 38 - Diagrama de olho para dia com muita neblina, enlace de 300m e visibilidade de 100m

Como se pode ver na Figura 38, para se obter um sinal com um pouco de abertura de olho foi necessário reduzir o enlace para 300m, e mesmo assim o sinal se encontra muito ruidoso.

Fisicamente o único valor que não é possível manipular em um sistema FSO é a distância entre os dispositivos, sendo assim a eletrônica deve prever situações extremas ou simplesmente garantir um determinado valor máximo de atenuação, ou seja, o range dinâmico dos transceptores.

4.4 Análise de taxa de erro e relação sinal ruído

Mantendo a mesma configuração do caso anterior (feixe colimado, turbulência em $10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, fotodiodo do tipo PIN, resistência de carga de 50Ω e ruídos do receptor), pode-se obter a curva da relação sinal ruído e da taxa de erro do sistema. Primeiramente será abordado um enlace com visibilidade de 1000m e em seguida um com visibilidade de 500m. Os dados obtidos serão dispostos em tabelas e gráficos comparativos entre a relação sinal ruído e a taxa de erro.

Tabela 5 - Variação do BER em função do comprimento do enlace para visibilidade de 1000m e Laser em 1550nm

Comprimento do enlace (m)	BER	SNR(dB)
3200	6.27e-22	24.83
3300	2.48e-17	24.05
3400	3.68e-13	23.00
3500	1.03e-9	21.68
3600	4.49e-7	20.12
3700	3.61e-5	18.40
3800	7.68e-4	16.54

Observe que a variação da taxa de erro é bem abrupta com o comprimento do enlace. Em um dia de visibilidade de 1000m a taxa de erro, BER, passa de 6.27e-22 para 7.68e-4 em menos de mil metros. Esta variação fica mais visível quando a representação é gráfica.

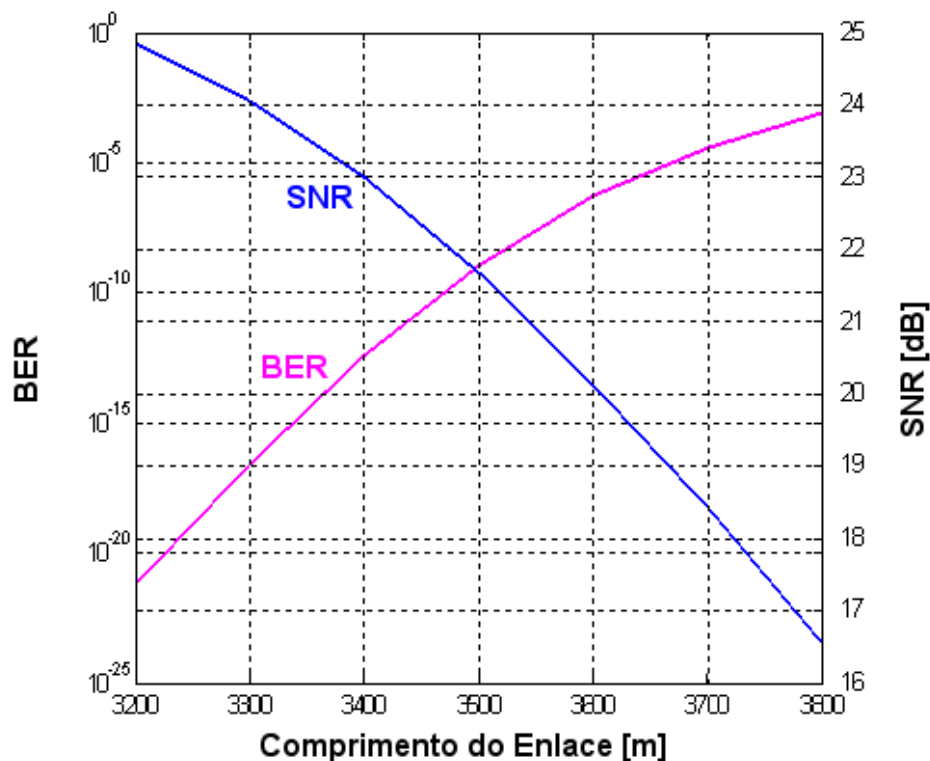


Figura 39 – Taxa de erro e Relação sinal ruído para enlace com visibilidade de 1000m

Observe no gráfico que conforme o BER aumenta, a SNR decai. Quando o enlace está a 3600m a taxa de erro está próximo de 10^{-9} e uma relação sinal ruído é de aproximadamente 21dB. Esta é a máxima distância que se poderia alcançar nas configurações utilizadas.

Tabela 6 - Variação do BER em função ao comprimento do enlace e visibilidade de 1000m e Laser em 785nm

Comprimento do enlace (m)	BER	SNR(dB)
2200	6.72e-35	28.08
2300	1.09e-27	27.20
2400	5.49e-20	25.82
2500	2.62e-13	23.92
2600	1.80e-8	21.61
2700	2.17e-5	19.03
2800	1.46e-3	16.29

Observa-se que a taxa de erro e a relação sinal ruído ficam drasticamente piores com a mudança do comprimento de onda do laser utilizado.

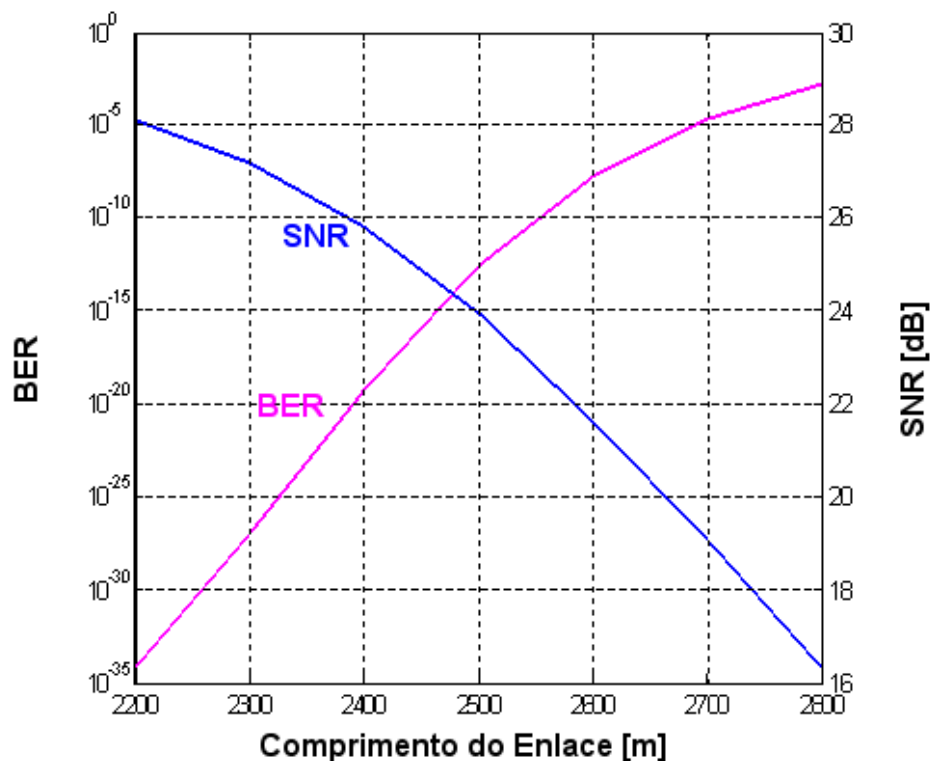


Figura 40 – Taxa de erro e Relação sinal ruído para enlace com visibilidade de 1000m e laser com 785nm

Observe que a Figura 40 apresenta curvas semelhantes ao encontrados na Figura 39. Note também que a alteração do comprimento de onda do laser alterou as máximas distâncias alcançáveis pelo enlace óptico, isto ocorre pela dependência do comprimento de onda nos valores de atenuação do canal.

5 Conclusões

Este trabalho visou modelar e simular um sistema de comunicações ópticas ponto a ponto pelo espaço livre, com o intuito de se obter o comportamento do sinal sob o efeito de diversas variações climáticas sobrepostas, e com isso verificar o grau de atenuação obtido no enlace. As equações utilizadas no bloco atmosférico seguiram principalmente os modelos propostos em [22] e [10].

Um das principais contribuições deste trabalho foi a reunião de diversos modelos matemáticos existentes para um enlace óptico atmosférico. Dentre eles a equação de propagação do feixe responsável pela perda geométrica, as equações dos espalhamentos de Mie, Rayleigh e espalhamento geométrico, bem como os efeitos da Turbulência. Alguns destes modelos encontram-se inseridos no bloco *Atmospheric Link* do software Lightsim.

Todos os efeitos dos fenômenos atmosféricos e geométricos estudados que podem influenciar na qualidade do sinal se sobrepõem, mesmo fenômenos como chuva ou neve podem ser sobrepostos à neblina, com tudo, não é possível sobrepor efeitos de chuva sobre a neve bem como não é possível a sobreposição dos tipos de neve. Em algumas das simulações realizadas neste experimento pôde-se ver uma pequena sobreposição de efeitos em um pequeno trecho que apresentou uma discrepância causada por perdas de captação da energia luminosa pelas lentes e turbulência atmosférica sobre o efeito da visibilidade, vide Figura 31.

Pode-se comprovar através das simulações como a atenuação de um feixe divergente possui pior acoplamento de energia que um feixe colimado, isto ocorre devido ao aumento acelerado do raio de um feixe divergente. Por este motivo, a uma mesma distância um feixe divergente apresenta sempre um raio maior que a de um feixe colimado e conseqüentemente maior perda associada à captação de energia pela lente do receptor. Comprovou-se também que a neblina possui um efeito considerável na intensidade do sinal e uma grande dependência com o comprimento de onda do laser. Estes fenômenos foram comprovados pelas simulações realizadas nas seções 4.2.2 e 4.4. Dentre os fenômenos atmosféricos avaliados pelas

simulações o que apresentou um maior valor de atenuação foi a gerada pela neve seca, isto ocorre pelo fato da neve seca possuir menor densidade podendo pairar por mais tempo no ar e com isso interferir na propagação do sinal óptico.

Nas análises de desempenho, diagrama de olho, BER e SNR, o resultado depende muito mais do nível de atenuação do enlace do que o tipo de atenuação propriamente dito. Esta afirmação é válida para as simulações realizadas, o modelo do enlace atmosférico introduz apenas atenuação ao sistema. Por este motivo que nestas simulações foi variado apenas à distância e a visibilidade. Em um sistema real não existe estática nas condições atmosféricas, sendo assim o desempenho varia de hora para hora, e acarreta em variações da qualidade do sinal para o sistema como um todo.

Nas simulações com o diagrama de olho foi possível observar a redução na qualidade do sinal elétrico obtido pelo fotodiodo. Como a energia que chegava ao foto diodo era muito pequena, a intensidade do ruído passava a ser de mesma grandeza que a intensidade do sinal. Assim se a atenuação do enlace é baixo, como exemplo o caso de visibilidade elevada, o diagrama de olho apresenta um bom traço para diferentes comprimentos de enlace atmosférico, Entretanto quando visibilidade decai para 500m ou menos o efeito do ruído do fotodetector começa a ser perceptível pelo diagrama de olho.

As simulações realizadas para a obtenção da relação sinal ruído e da taxa de erro teve também o intuito de averiguar a dependência do comprimento de onda do laser utilizado na qualidade do sistema. Foi possível verificar que a utilização de um laser em 785nm acarreta na redução das máximas distâncias possíveis para o enlace atmosférico.

Pode-se concluir a partir deste trabalho que um sistema FSO pode ser empregado em diversas condições atmosféricas. Tanto isso é verdade que muitas empresas que produzem sistemas de comunicação óptica pelo espaço livre cujas especificações incluem apenas o alcance para determinados ranges dinâmicos do equipamento e não específico para um determinado tipo condição atmosférica.

Existem na atualidade muitos estudos nos sistemas de comunicação óptica sem fio voltado para sistemas móveis em rede local, ou seja, redes locais semelhantes ao sistema WiFi

porém com enlaces ópticos, com estas técnicas seria possível a independência no posicionamento das estações de uma rede local. Sistemas AdHoc ópticos, no qual uma rede de computadores ou sensores podem criar uma rede do tipo AdHoc utilizando enlaces ópticos curtos. Entre outros avanços tecnológicos ficam como propostas para futuros trabalhos em comunicações ópticas pelo espaço livre.

6 Referencia Bibliográfica

- [1] Heinz Willebrand, Baksheesh S. Ghuman, *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*, Sams Publishing, 2002
- [2] Alnaboulsi, Maher C.; de Fornel, Frederique. *Fog attenuation prediction for optical and infrared waves*. Optical Engineering, Volume 43, Page 319, 2004.
- [3] Alan Harris, James J. Sluss, Jr., Hazem H. Refai. *Free-space optical wavelength diversity scheme for fog mitigation in a ground-to-unmanned-aerial-vehicle communications link*. Optical Engineering, Volume 45, Issue 8, August 2006
- [4] Manor, H., Arnon, S. *Performance of an optical wireless communication system as a function of wavelength*. Applied optics, Volume 42, Issue 21, Page 4285, Jul 2003
- [5] D'Amico, M, Leva, A, Micheli, B. *Free-space optics communication systems: First results from a pilot field-trial in the surrounding area of Milan, Italy*. IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS, Volume 13, Issue 8, Page 305, August 2003
- [6] Jaruwatanadilok, S, Ketprom, U, Kuga, Y, Ishimaru, A. *Modeling the point-to-point wireless communication channel under the adverse weather conditions*. IEICE TRANSACTIONS ON ELECTRONICS, Volume E87C, Issue 9, Page 1455, September 2004
- [7] Colvero, CP, Cordeiro, MCR, de Faria, GV, von der Weid, JP. *Experimental comparison between far- and near-infrared wavelengths in free-space optical systems*. IEEE MICROWAVE AND OPTICAL TECHNOLOGY LETTERS, Volume 46, Issue 4, Page 319, August 2005
- [8] Abtahi, M, Lemieux, P, Mathlouthi, W, Rusch, LA. *Suppression of turbulence-induced scintillation in free-space optical communication systems using saturated optical amplifiers*. JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, Volume 24, Issue 12, Page 4966, December 2006
- [9] Perlot, N. *Evaluation of the scintillation loss for optical communication systems with direct detection*. OPTICAL ENGINEERING, Volume 46, Issue 2, February 2007.
- [10] S. Sheikh Muhammad, P. Köhldorfer, E. Leitgeb, *Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Link*. Institute of Broadband Communication, TU Graz, Austria. IEEE, 2005

- [11] Lucas de Nardis, *Wireless Optical Communications Part I, Telecommunication Engineering, School of Engineering, University of Rome La Sapienza, Italy*. May. http://www.comlab.uniroma3.it/cincotti_courses/Wireless_Optical_Comms_I.pdf, 2006
- [12] Mike Nofziger, *Optical Communications. Página da internet, College os Optical Sciences*, <http://www.optics.arizona.edu/nofziger/UNVR195a/Class13/C13P1.htm>, Agosto 2006,
- [13] E. Leitgeb, J. Bregenzer, P. Fasser, M.Gebhart. *Free Space Optics – Extension to Fiber-Networks for the Last Miles*. Graz, Austria. *IEEE*, 2002
- [14] Vaidyanathan Ramasarma, *Free Space Optics: A Viable Last-Mile Solution*, *Bechtel Telecommunications Technical Journal*, December 2002
- [15] Dominic O'Brien, *Free Space optical links for broadband wireless communication*, *University of Oxford*, November 2003
- [16] P. B. Harboe, J. R. Souza. *Sistemas Ópticos no Espaço Livre: Estudo da Viabilidade de Implantação em Cidades Brasileiras*. XX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações. Rio de Janeiro, RJ, Outubro 2003
- [17] *fSONA, SONAbeam series Datasheet, fSONA Systems Ltd, July 2005*, <http://www.fsona.com>
- [18] Dave Steinke, *Free-Space Optics: A Viable, Secure Last-Mile Solution?*, As part of the Information Security Reading Room, SANS Institute, February 2003
- [19] Ahmet Akbulut, H. Gokhan Ilk, Fikret Ari, *Design, Availability and Reliability Analysis on an Experimental Outdoor FSO/RF Communication System*, *Ankara University, Faculty of Engineering, Electronics Engineering Department*, ICTON, *IEEE*, 2005
- [20] Scott Bloom, Eric Korevaar, John Schuster, Heinz Willebrand. *Understanding the performance of free-space optics [invited]*. *Optical Society of America. Journal of Optical Networking*. Vol. 2, No. 6, June 2003
- [21] Heinz A. Willebrand, Baksheesh S. Ghuman, *Fiber Optics Without Fiber*, *IEEE Spectrum*, August 2001
- [22] Geraldo J. V. Segatto, *Modelamento e Análise de Desempenho de Sistemas de Transmissão Óptica pela Atmosfera*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Unicamp, Junho de 1996
- [23] Carl R. Nave, *Relative Humidity*, Pagina da Internet, *hyperphysics*, Agosto de 2006, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/relhum.html>
- [24] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication System, Third Edition*, *John Wiley & Sons, Inc. Wiley Interscience*, 2002

- [25] GIOZZA, W. F.; CONFORTI, E.; WALDMAN, H. *Fibras ópticas: tecnologia e projetos de sistemas*. Rio de Janeiro, EMBRATEL; São Paulo, Makron, McGraw-Hill, 1991
- [26] José A. J. Ribeiro, *Comunicações Ópticas*, Editora Érica, 2003
- [27] Joseph C. Palais, *Fiber Optic Communication, Second Edition, Prentice-Hall International Editions, 1988*
- [28] MRV Communications, Inc. TereScope™ 155 Protocol Independent Series datasheet. Internet, <http://www.mrv.com>, April, 2004
- [29] *Light Pointe Communication Inc. LightLite™ 100 & 100E datasheet. Internet, <http://www.lightpointe.com>, May, 2006*
- [30] Eugene Hecht, *Optics, Second Edition. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Adelphi University, 1989*
- [31] John Crisp, *Introduction to Fiber Optics, Second Edition, Newnes, 2001*
- [32] William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in C The Art of Scientific Computing, Second Edition, Cambridge University Press, 2002*

Apêndice A - Princípio das Comunicações Ópticas

Considerando-se as comunicações ópticas como o processo de transmissão de informação através de sinais luminosos pode-se dizer que estas possuem sua origem em tempos bem remotos, pois desde que os homens começaram a se comunicar existiu a necessidade de transmitir suas mensagens a longas distâncias e a altas velocidades. Neste princípio distante, as fontes luminosas existentes eram a luz do sol, a luz de fogueiras e mesmo as fumaças com essas fontes as mensagens chegavam a que estivesse olhando então os códigos de sinais foram desenvolvidos em conjunto a essas técnicas. Historicamente um dos primeiros equipamentos desenvolvidos propriamente para o envio de mensagens luminosas a longas distâncias foi o Telegrafo Óptico, criado e por Claude Chappe em 1791, que consistia em grandes torres com antenas que mudavam de posição conforme as palavras eram transmitidas, dentro destas torres um grupo de pessoas ficava de prontidão observando as demais torres para propagar os sinais que vinham de torres próximas.



Figura 41 - Telégrafo óptico de Claude Chappe [12]

Anos mais tarde em 1865, Henry Christopher Mance construiu o heliógrafo um aparelho que se utilizavam espelhos para refletir a luz solar a grandes distâncias carregando consigo informações em código telegráfico. Posteriormente no ano de 1880 Alexander Graham Bell e Charles Tainter inventaram o Fofone um aparelho capaz de converter as vibrações vocais em sinais luminosos com auxílio de espelhos, a detecção do sinal era realizado com um dispositivo a base de Selênio, e seu primeiro teste foi realizado a uma distância de 213 metros, em [12] existe citações de jornais em que relatou-se a capacidade de se ouvir sons provenientes de raios invisíveis na região do final do espectro do vermelho.

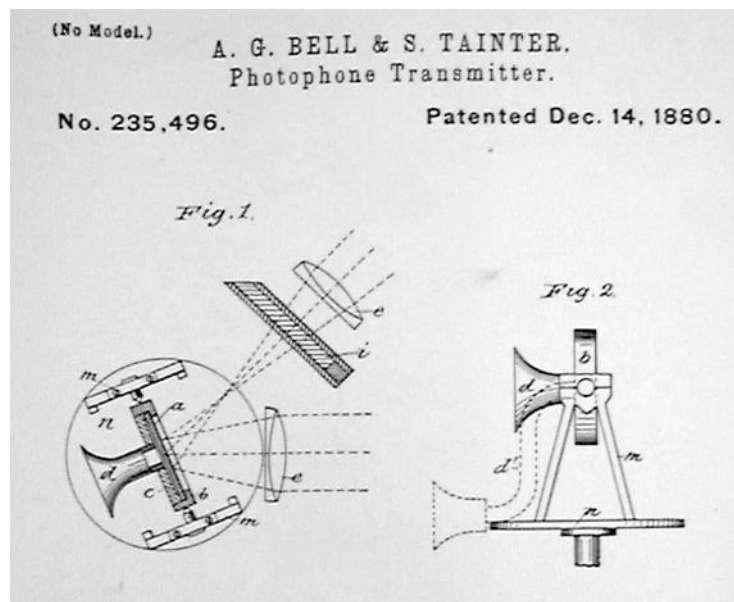


Figura 42 - Modelo do fotofone de A. G. Bell [12]

Alguns anos antes, meados de 1850, foram realizados experimentos de confinamento da luz por meio da Reflexão Total da luz e baseado neste principio em meados de 1900 foram desenvolvidos os primeiros estudos no desenvolvimento da fibra de vidro, porém essas fibras possuíam elevadas perdas em seu interior, cerca de 1000dB/km, apenas em 1966 foi proposto o desenvolvimento de fibras de vidro com baixas perdas, esta proposta foi realizada por Kao e Hockham [12], desde então muitos avanços nas comunicações ópticas ocorreram, descobriu-se que as principais causadoras das atenuações nas fibras eram impurezas existentes no material e não parte de suas características físicas, as primeiras fibras multimodos foram desenvolvidas com núcleo de 62.5 micrometros, nos anos 80 fibras monomodos estavam sendo amplamente utilizadas em conjunto de lasers de 1330nm, com o advento dos lasers de 1550nm desenvolveu-se as fibras de dispersão deslocada empurrando o ponto de dispersão nula de 1330nm para 1550nm onde a atenuação era mínima, a partir de 1987 desenvolveram-se os amplificadores a fibra dopada com Érbio isso possibilitou a propagação de sinal a centenas de quilômetros com amplificadores ópticos a cada 80km em media, atualmente as perdas em uma fibra monomodo operando em 1550nm estão em 0.2dB/km.

Como uma alternativa ao sistema de comunicação sem fio com base em RF, tecnologias sem fio ópticas vêm sendo estudadas e desenvolvidos nestas ultimas décadas. Estas alternativas foram propostas pelo fato dos sistemas RF possuírem alguns inconvenientes

quanto à capacidade de causar e sofrer interferência Eletro Magnética, necessitarem de requisitos legais para serem implantados e ainda possuem a característica de não serem sistemas seguros, pois se pode interceptar o sinal em qualquer parte do percurso do sinal.

Os estudos dos canais ópticos não guiados abrangem diversas áreas de estudo, como [11]:

Redes ópticas internas: onde os estudos enfocam a estimativa do canal e a modelagem do ruído;

Modulação e codificação;

Caracterização das características atmosféricas e a modelagem do ruído;

Emissores e receptores;

Estrutura de rede e a interconexão com outros sistemas;

Novos cenários de aplicação;

Existem praticamente dois tipos de canais ópticos não guiados, os canais externos, que dependem da linha de visada para instanciar uma comunicação entre dois pontos distantes, e os sistemas de redes locais IR, que em sua maioria utiliza comunicação difusa. As comunicações ópticas sem fio externam consistem em unir dois nós de uma rede por meio de uma linha de visada ligando emissor e receptor, o canal não guiado envolvido neste tipo de comunicação pode ser a atmosfera, telhados de edifícios, a água, enlaces submarinos, e o espaço comunicação de satélites geo-estacionários. As redes locais ópticas sem fio, utilizam-se de tecnologias de infravermelho, como o IrDA, neste caso o sinal óptico é difundido no meio para que exista uma redução nas obstruções do sinal.

A.1 – Dispositivos Ópticos

Em enlaces ópticos ponto a ponto, dependendo da distância entre os pontos, poucos dispositivos são necessários para efetuar a transmissão de informação, isso a configuração mais comum mostrada na Figura 43.

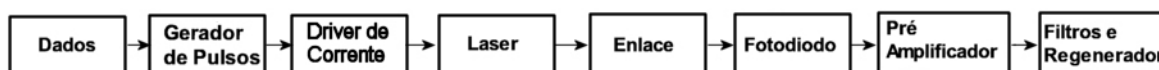


Figura 43 - Diagrama de Blocos de um enlace simples

Este diagrama de blocos representa um enlace ponto a ponto entre dois nós simples um contendo uma fonte de dados e outro contendo o receptor. Observa-se que cada bloco possui uma função e características próprias que serão analisadas a seguir.

A.1.1 – Fonte de Dados

Uma fonte de dados representa toda informação que se deseja transmitir a um determinado destinatário, estas informações são geradas e armazenadas no formato de bits, que por sua vez, são convertidos em pulsos elétricos onde um determinado valor elétrico representa o nível lógico alto, '1', e outro valor representa o nível lógico baixo, '0'. As seqüências de bits geradas e transmitidas são expressas como um número binário compostos apenas por uns e zeros, por exemplo, 100101110101101001.

A taxa com a qual os bits são enviados ao formatados é chamada de *taxa de bits*, esta informa quantos bits são enviados em por unidade de tempo, conseqüentemente Período de duração do bit.

$$B = \frac{1}{T} \quad (\text{A.1})$$

A.1.2 – Gerador de Pulsos

Os Geradores de Pulso tem como função converter informações binárias em pulsos elétricos. Os sinais elétricos gerados neste bloco podem ser de diferentes formatos, tais como: retangular, pré-pulso, pós-pulso, super Gaussiano e Solitônico.

A.1.2.1 – Pulsos Retangulares

Estes pulsos simples são os mais facilmente gerados. Os pulsos retangulares apresentam tempo de subida e de decida são infinitesimalmente pequenos, cada pulso gerado ocupa totalmente o período de duração de um bit. Em dispositivos reais esse tempo de subida pode não ser pequeno o suficiente, isto devido a capacitâncias parasitas intrínsecas ao sistema. Neste caso o pulso real comporta-se como que filtrado por um circuito RC equivalente, neste caso o tanto o tempo de subida como o tempo de decida sofrem deformações em função de exponenciais, equações A.2 e A.3 respectivamente.

$$v_o = v_{\max} \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \right) \quad (\text{A.2})$$

$$v_o = v_{\max} \exp\left(\frac{-t}{RC}\right) \quad (\text{A.3})$$

Onde t é o tempo, R é a resistência equivalente, C e a capacitância equivalente, v_o é a tensão de saída e v_{\max} é o maior valor que o sistema pode assumir. A Figura 44 apresenta a diferença básica entre as duas formas de ondas retangulares, observa-se que o pulso filtrado apresenta um tempo de subida e decida suavizado pelas exponenciais descritas nas equações A.2 e A.3.

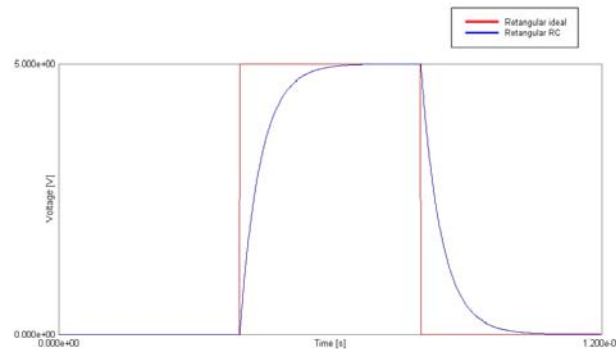


Figura 44 - Pulso Retangular Ideal e Filtrado, bits 010

Os pulsos retangulares podem ser do tipo RZ (*return to zero*) ou NRZ (*non-return to zero*). Estes tipos diferem quanto ao tempo de ocupação dos pulsos no nível lógico '1'. Quando o pulso é RZ após uma determinada fração do tempo de duração do bit '1' o mesmo retorna ao nível de energia mais baixo, e quando o pulso é NRZ essa fração do tempo é integral. É comum utilizar pulsos RZ em comunicações ópticas para evitar saturação do receptor quando uma seqüência muito grande de '1s' ocorre, e também para auxiliar no envio de um sinal de relógio, pois sempre o sinal estará pulsado.

A.1.3 – Driver de Corrente

São dispositivos eletrônicos ativos com a função de amplificar corrente, estes drivers são necessários, pois as correntes utilizadas para alimentar um laser semiconductor são maiores que as fornecidas pelos circuitos digitais utilizados nos geradores de pulso. Os drivers de correntes podem ser construídos discretamente com dispositivos eletrônicos, bem como podem vir integrados com o próprio laser. Além da corrente que ira modular a fonte óptica, o driver, fornece uma corrente inicial de polarização para o laser entrar em regime.

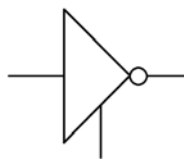


Figura 45 - Driver de Corrente

Os circuitos de polarização dos lasers apresentam capacitâncias parasitas intrínseca, que combinados com o amplificador de corrente geram um filtro RC equivalente. Este filtro suaviza os pulsos de entrada tornando sua transição mais lenta.

A.1.4 – Laser

Lasers são dispositivos eletros-ópticos, isto é, componentes capazes de converter sinais elétricos em sinais ópticos. Em comunicações ópticas além dos lasers utilizam-se também os LEDs como fonte óptica.

Os lasers comumente utilizados em fotônica são compostos por elementos semicondutores que possuem a bandas de energia eletrônicas em disposição bem distinta, isto é, a banda de energia proibida é direta [26] ou seja quando a banda e o momento estão alinhados, Figura 46, a diferença de energia entre a camada de valência e a camada de condução determina o comprimento de onda que será emitido pelo laser, equação A.7.

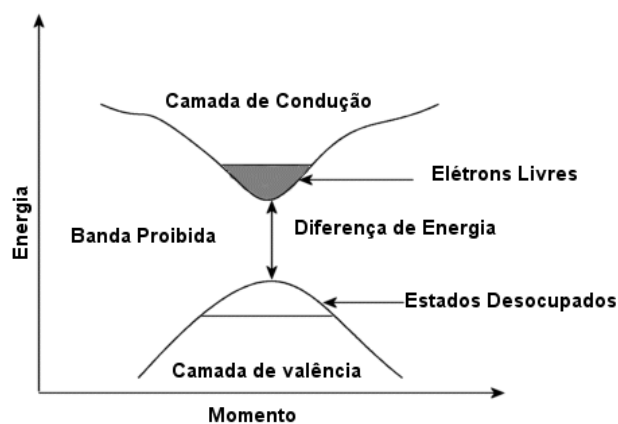


Figura 46 - Distribuição de energia em semicondutores com banda proibida direta

$$\lambda = \frac{hc}{W_g} \quad (\text{A.7})$$

Onde, λ representa o comprimento de onda dado em metros, h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e W_g é a diferença de energia entre as camadas de condução e valência dado em Joules.

Nos sistemas FSO externos são utilizados lasers semicondutores, por possuírem uma potência óptica de saída maior que os LED. Já em sistemas de rede local, o uso de LEDs pode ser uma alternativa economicamente viável, pelos fatores de atenuação encontrados em locais fechados. Comercialmente os comprimentos de onda dos empregados nos transmissores são de 850nm e 1330nm.

A opção de se utilizar lasers ao invés de um leds em equipamentos FSO pode ser visto na Figura 47, onde é mostrado a diferença entre a potência emitida por um laser e a emitida por um led.

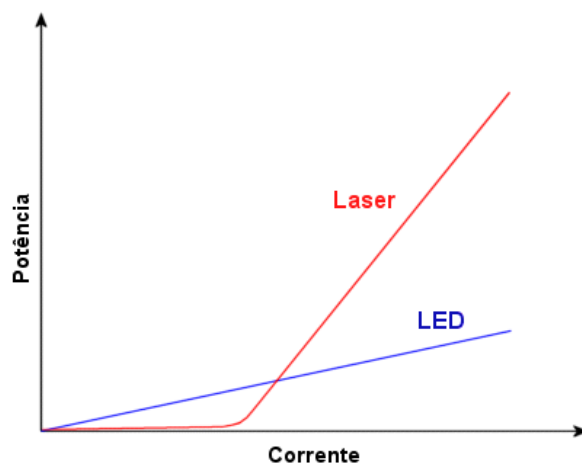


Figura 47 - Comparação entre LED e Diodo Laser

Um laser semicondutor comum emite sinais em diversos comprimentos de onda, por este motivo são chamados de lasers multimodos. Com o intuito de minimizar a existência dos

modos laterais do laser diversas técnicas empregadas na estrutura do laser. Técnicas como *Distributed Feedback*, que gerou os Lasers DFB, esta consiste em utilizar uma grade de difração de Bragg interno à cavidade do laser, a existência dessa grade eleva as perdas internas do laser para comprimentos de ondas λ_B que estejam fora da relação de condição de Bragg, equação A.8.

$$\Lambda = m(\lambda_B / 2\tilde{n}) \quad (\text{A.8})$$

Onde Λ é o período da grade, \tilde{n} é o índice de refração modal médio, e m representa a ordem da difração de Bragg [24].

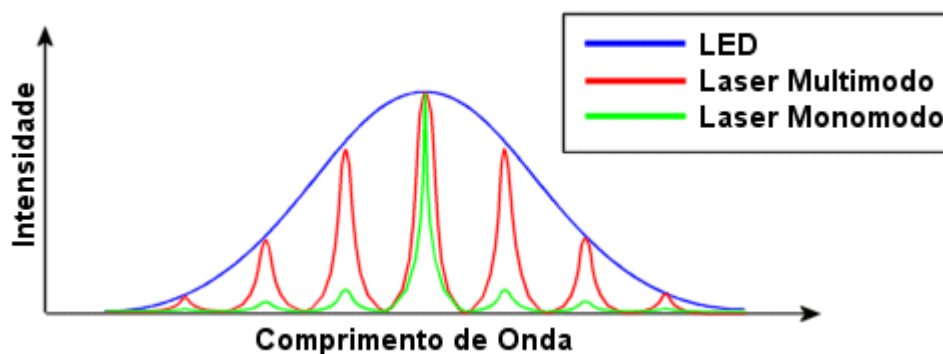


Figura 48 - Comparação entre espectros dos LEDs, Lasers Multimodos e Lasers Monomodos

A Figura 48 apresenta uma comparação simplificada entre os espectros dos lasers e dos LEDs nota-se que a largura espectral destes dispositivos são bem diferentes, um LED pode apresentar uma largura espectral de 20 a 100nm enquanto um laser multimodo apresenta de 1 a 5nm e um laser monomodo apresenta uma largura espectral menor que 0.2nm [27].

Em FSO é comum utilizar lasers DFB, por possuírem comportamento monomodal, contudo, em redes locais e alguns casos de redes externas o uso de lasers multimodo e leds ocorrem com certa frequência.

A.1.5 – Enlace

Enlaces ópticos são todos os meios por onde os sinais provenientes de um laser são inseridos. Comumente são utilizados meios guiados de propagação de luz como as fibras ópticas.

Mas estudos em meios não guiados, como enlaces atmosféricos, existem e produtos que exploram estes tipos de comunicação são amplamente utilizados. Abaixo um exemplo de um link FSO entre duas redes:

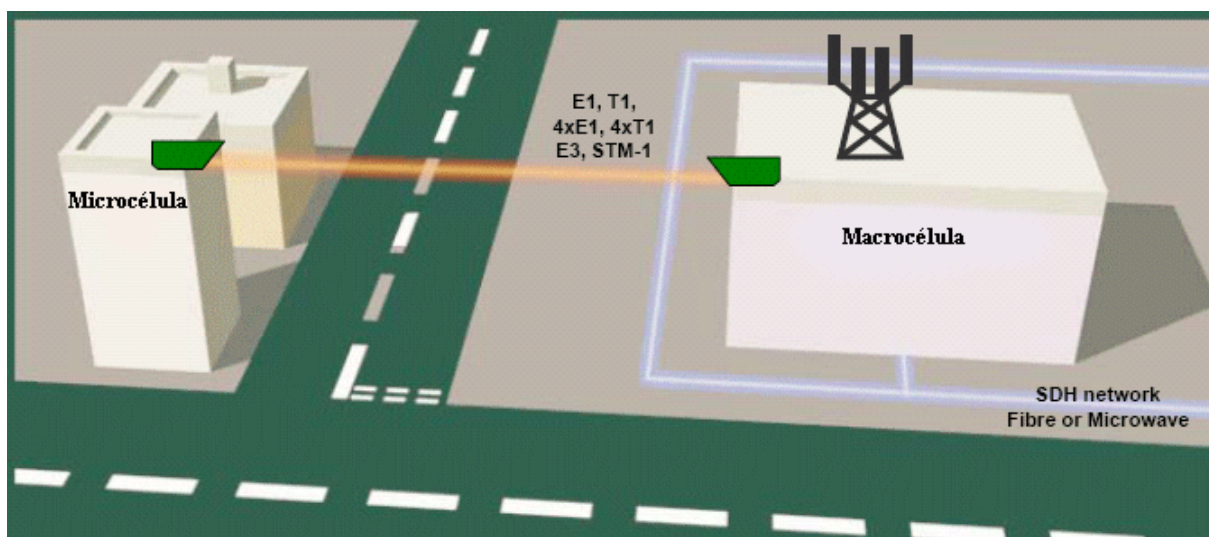


Figura 49 - Exemplo de enlace óptico não guiado [15]

Na figura acima é possível observar a comunicação entre uma macrocélula que está ligada a uma rede maior e uma microcélula que pode ser uma central de escritórios.

A.1.6 – Fotodiodo

Os fotodiodos são as estruturas responsáveis em receber os sinais ópticos e em convertê-los em sinais elétricos. Dispositivos semicondutores os fotodiodos possuem a característica de mudar a sua condutividade elétrica com a presença de fótons em seu interior.

Quando um diodo é polarizado inversamente a região de depleção na junção PN aumenta e a incidência de fótons dentro dessa região ocasiona uma “derrapagem” de elétrons pela região iniciando condução elétrica, para aumentar a região de depleção e aumentar a absorção de energia luminosa costuma-se inserir uma camada de material intrínseco, isto é, uma junção sem dopagem, com esta camada extra a região de depleção quando o fotodiodo inversamente polarizado fica maior que se fosse utilizada uma junção PN simples, neste caso os fotodiodos são chamados de Fotodiodos PIN.

Uma outra estrutura que os fotodetectores podem assumir é a que utiliza regiões com dopagem diferenciada, uma camada fortemente dopada com cargas positivas, uma camada sem dopagem, uma camada com dopagem positiva comum, e uma ultima camada com forte dopagem negativa. Esse tipo de fotodiodo recebe o nome de Fotodiodo de Avalanche, ou APD.

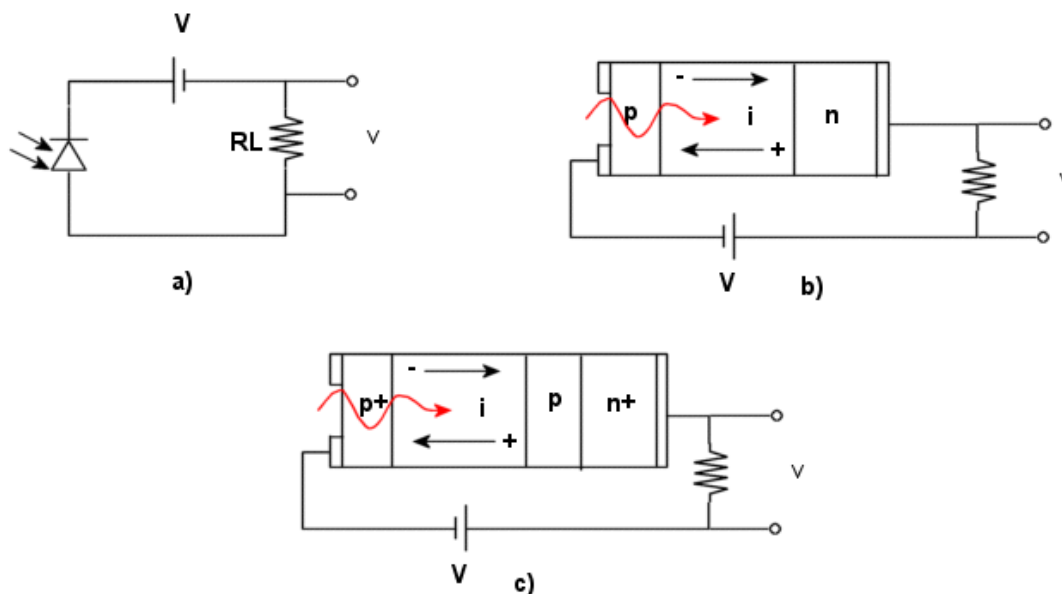


Figura 50 - Circuito de ligação de um Fotodiodo: a) Circuito elétrico; b) Estrutura de um Fotodiodo PIN em um circuito elétrico; c) Estrutura de um Fotodiodo APD em um circuito elétrico

A corrente gerada pelo fotodiodo é dependente de dois fatores, a potência óptica que chega ao dispositivo, P_{in} , e a responsividade, R , do dispositivo. A Responsividade é definida em função da eficiência quântica, η , e o comprimento de onda do sinal incidente, λ , conforme apresentado nas equações A.10 e A.11:

$$I_p = RP_{in} \quad (\text{A.10})$$

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} \approx \frac{\eta\lambda}{1.24} \quad (\text{A.11})$$

Quando o fotodiodo é do tipo APD, um efeito de avalanche ocorre quando os fótons entram no interior do dispositivo, este efeito inicia-se quando um elétron gerado colide com outros elétrons da estrutura semicondutora liberando-os. Assim um mesmo número de fótons gera mais corrente dentro de um APD do que em um PIN, esse suposto ganho gerado é chamado de fator de multiplicação que aumenta a responsividade do APD por um fator M, como mostrado na equação A.12:

$$R_{APD} = MR_{PIN} \quad (\text{A.12})$$

A Tabela 7 apresenta alguns tipos comuns de materiais semicondutores utilizados na fabricação de fotodiodos APD, observa-se que mesmo apresentando um ganho elevado um fotodiodo de Silício apresenta operação apenas na janela óptica de 850nm, em contrapartida observa-se que o Germânio opera em todas as janelas ópticas em contra partida possui ganho relativamente menor.

Tabela 7 - Ganho APD e Comprimento de onda de alguns semicondutores

Material	Ganho APD (M)	Comprimento de onda de operação (μm)
Si	100-500	0.4-1.1
Ge	50-200	0.8-1.8
InGaAs	10-40	1.0-1.7

A escolha de um fotodiodo adequado é uma importante etapa de um bom projeto de comunicações ópticas.

A.1.7 – Pré-Amplificador

Em alguns casos os sinais elétricos gerados pelo fotodiodos são tão baixos que os circuitos de decisão não conseguem identificar os pulsos, neste caso são utilizados pré-amplificadores para gerar um ganho inicial no sinal de saída do fotodiodo. Um circuito

simples utilizado para este fim consiste em um amplificador operacional montado como amplificador de tensão de ganho direto, isto é, não ocorre inversão na tensão de saída do amplificador, um exemplo deste circuito é apresentada na Figura 51.

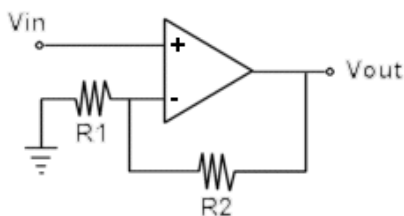


Figura 51 - Pré-Amplificador não inversor

O ganho de um amplificador como o apresentado acima é dado por:

$$Ganho = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (A.13)$$

Observa-se que o quando o valor de R2 tende a infinito o ganho também tende a infinito e quando R2 tende a 0 o ganho se torna unitário, o valor de saída do pré-amplificador é dado por $V_{out} = V_{in} \text{Ganho}$.

A.1.8 – Filtros e Regeneradores

Os filtros são, em sua maioria, circuitos passivos capazes de reduzir a intensidade das componentes em frequência indesejáveis do sinal de entrada. Existem três tipos básicos de filtros utilizados em comunicações ópticas, filtro passa baixa, filtro passa alta e filtro passa banda Figura 52.

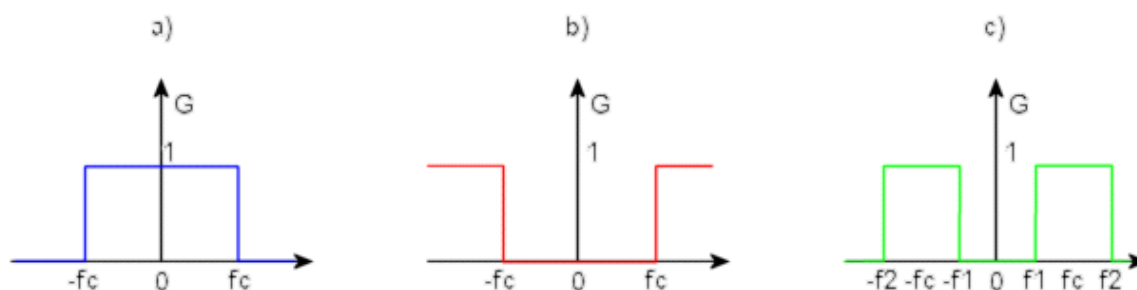


Figura 52 -Tipos de filtro: a) filtro passa baixa; b) filtro passa alta; c) filtro passa banda

Além dos filtros os receptores possuem regeneradores responsáveis por retornar os pulsos novamente no formato de origem, em sua maioria os regeneradores transformam os sinais recebidos do pré-amplificador e do filtro em pulsos retangulares. Isto é facilmente obtido utilizando o circuito apresentado na Figura 53. Dependendo da regulagem realizada no R_{var} , a tensão de saída será V ou 0.

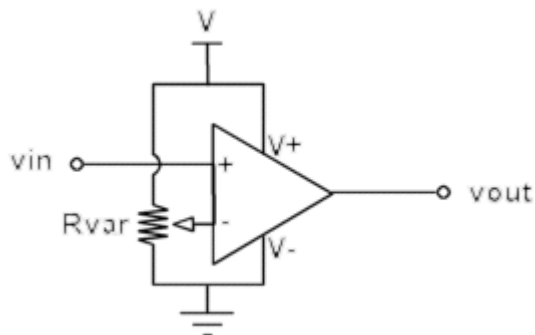


Figura 53 - Regenerador utilizando um Amplificador Operacional

Apêndice B - Valores Padrões dos Modelos Utilizados nas Simulações

B.1 – Current Driver

Parâmetros do Driver de Corrente			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Conductance	1.0e-2	A/V	S
Bias Current	3.8e-2	A	I_{th}
Ideal Driver	Yes/No		
Bandwidth	3.5e9	Hz	f_c

B.2 – Digital Source

Parâmetros da fonte Digital			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Bit Rate	2.5e9	bits/s	B
Hi level voltage	5.0	V	VHi
Low level voltage	0.0	V	VLo
Bit sequence generator	Defined/Random		
Bit quequence	101001101		bitS
Repeat	Yes/No		
Pulse Format	Rectangular/Super Gaussian/Single Pole (RC)/Solitonic/Pre- pulse		
Coding	NRZ/RZ		
Occupancy Factor	5.0e-1		β
Pulse width	1.25e-10	s	τ_{FWHM}
Shape factor	1.436		M
Bandwidth	3.5e9	Hz	f_c
Pré-pulse Amplitude	2.0e1	%	pp_{Ap}
Pré-pulse Duration	5.0e1	%	pp_t
Include post-pulse	No/Yes		

B.3– Time delay

Parâmetros do time delay			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Time delay	2.0e-10	s	δt

B.4 – Atmospheric Link

Parâmetros do Canal Atmosférico			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Visibility	10	Km	V
Turbulence	1e-15	m-2/3	C_n^2
Lenght	100	m	L
Input Lens Radius	1e-1	m	r_{lr}
Output Signal Radius	2e-2	m	r_{lf}
Weather	Clear / Raining / Snowing		
Precipitation Intensity	2e1	mm/h	R
Snow Type	Dry / Wet		

B.5 – Comparative BER

Parâmetros do medidor de taxa de erro comparativo			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Time Delay	2e-10	S	δt
Bit Rate	2.5e9	bits/s	B
Bit Percent	50	%	$\Delta T\%$

B.6 – Comparative SNR

Parâmetros do medidor de relação sinal ruído comparativo			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Time Delay	2e-10	s	δt
Bit Rate	2.5e9	bits/s	B
Bit Percent	50	%	$\Delta T\%$

B.7 – Eye Diagram

Parâmetros do diagrama de olho			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Bit Period	4.0e-10	s	T

B.8 – DFB Laser

Parâmetros do laser DFB			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Central Wavelength	1550e-9	m	λ
Cavity Length	3e-4	m	l
Cavity Width	2.5e-6	m	w
Cavity Thickness	2e-7	m	d
Confinement Factor	0.4	—	Γ
Group Refractive Index	3.53	—	n_g
Line width Enhance Factor	3	—	β_c
Left Mirror Reflectivity	0.3	—	R_l
Right Mirror Reflectivity	0.3	—	R_r
Internal Loss Coefficient	4e3	1/m	α
Diff Gain Coefficient	2.5e-20	m ²	a
Trans Carrier Density	1e24	1/m ³	η_0
Non-Rad Recomb Factor	1e8	1/s	A_{nr}
Radioactive Recomb Factor	1e-16	m ³ /s	B
Auger Recomb Factor	1e-41	m ⁶ /s	C
Spont Emission Factor	3e-5	—	β_{sp}
Gain Compression Factor	5e-23	m ³	ϵ
Internal Bandwidth	2.5e9	Hz	f_c
Transient	Yes / No	—	

B.9 – Photodiode

Parâmetros do fotodiodo			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Quantum Efficiency	0.8		η
Avalanche Gain	1		m
Load Resistance	1e3	Ω	R_l
Dark Current	1e-9	A	I_d
Cutoff frequency	1.0e10	Hz	B_e
Temp	300	K	T
Insert Noise	Yes / No		

B.10 – RC Filter

Parâmetros do Filtro RC			
Nome do parâmetro	Valor padrão	Unidade	Símbolo
Filter Type	Low Pass / Hi Pass / Band Pass		
Filter Order	[1,5]		k
Gain	0.0	dB	G
3dB Frequency	1e9	Hz	f_c
Central Frequency	1e9	Hz	f_c
Frequency Bandwidth	1e8	Hz	Δf