

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
CENTRO TECNOLÓGICO - ESCOLA DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**

**VINICIUS NUNES HENRIQUE SILVA**

**Desenvolvimento Experimental de Uma Nova Técnica Para a Medição da  
Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre**

**NITERÓI  
2009**

**VINICIUS NUNES HENRIQUE SILVA**

**Desenvolvimento Experimental de Uma Nova Técnica Para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito para obtenção do título de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero

Niterói  
2009

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

S586 Silva, Vinicius Nunes Henrique.  
Desenvolvimento experimental de uma nova técnica para a  
medição da turbulência atmosférica, em enlaces ópticos horizontais  
no espaço livre / Vinicius Nunes Henrique Silva – Niterói, RJ:  
[s.n.], 2009.  
108 f.

Orientador: Andrés Pablo López Barbero  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) –  
Universidade Federal Fluminense, 2009.

1. Sistemas de telecomunicação. 2. Comunicação Óptica. 3.  
Turbulência Atmosférica. 4. Engenharia de telecomunicação. I.  
Título.

CDD 621.382

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família que tem como princípio básico de existência o estudo e, sem sombra de dúvidas, permitiu que chegasse até o presente momento com todas as glórias possíveis. Agradeço especialmente ao meu pai, Ronaldo Henrique Silva, pois sem ele não teria escolhido a profissão de Engenheiro. Além disso, me deu suporte financeiro, emocional e paciência para estar sempre estudando. A minha mãe, não tenho palavras para descrever o quão agradecido sou, por ter me guiado de forma excepcional, ao longo de minha jornada da vida, e por sempre ter feito as melhores escolhas para mim. As minhas irmãs, as minhas avós, aos meus avôs, ao meu sobrinho Pedro e Matheus e a minha sobrinha Luiza um agradecimento pelo amor que me é dado.

Agradecimentos também seguem ao meu professor e orientador Andrés Pablo López Barbero, sendo muito mais que um orientador, e que, apesar de não ser o aluno que esperava, mostrou-se um grande amigo e acreditou na minha curta vida acadêmica até então. Também deixo agradecimentos ao professor Ricardo Marques Ribeiro, que me mostrou o que é ser um pesquisador mesmo nas dificuldades impostas pelo país em que vivemos. Agradeço aos colegas de curso, em especial aos amigos Odair Xavier e Sydnei Bragantine Germano pelas inúmeras vezes, quando trocamos idéias sobre a vida, engenharia e que conseguiram suportar os meus momentos de surto psicótico.

Também deixo meus agradecimentos à CAPES e ao Ministério da Defesa (Projeto Pró-Defesa), o qual financiou todo este trabalho por meio de uma bolsa de pesquisa, permitindo que eu pudesse me dedicar em tempo integral.

Agradecimentos mais que especiais vão para minha namorada Suellen Bastos Farinha que, mesmo odiando Engenharia e o meu gosto excessivo pelo estudo, sempre foi capaz de entender que isto se fazia necessário. Não conseguiria nada sem o seu carinho, amor e dedicação. Por último, gostaria de agradecer a minha segunda família, os Vieira Marins, pois me serviram de exemplo e sempre estiveram contribuindo para todas as minhas conquistas.

## RESUMO

A propagação de uma frente de onda luminosa, através da atmosfera, é fortemente influenciada pela constituição física do meio e por variações climáticas que ocorrem ao longo do percurso. A composição gasosa, a presença de aerossóis (partículas de tamanho variado) em suspensão, chuva, neblina e modificações no gradiente do índice de refração devido a alterações de pressão, temperatura e umidade fazem com que a luz sofra efeitos de turbulência efetiva indesejáveis para as comunicações ópticas não-guiadas. Como conseqüências imediatas desses efeitos, têm-se a diminuição das taxas de transmissão e das distâncias de operação dos enlaces, limitando o desempenho dos sistemas de comunicação ópticos em espaço livre (FSO - *Free Space Optics*).

Nesse trabalho, são apresentados os aspectos fundamentais do FSO (Óptica em Espaço Livre), concentrando esforços em medidas de turbulência atmosférica, e que permitirão entender melhor os principais efeitos causadores da deterioração do sinal ao longo do enlace como: absorção atmosférica, espalhamento, cintilação, divagação do feixe e outros. Além disso, é proposta uma nova técnica experimental, com o objetivo de mensurar a turbulência atmosférica, determinando a Constante de Estrutura para o Índice de Refração ( $C_n^2$ ) através do efeito de divagação do feixe. Desta forma, torna-se possível averiguar o grau de turbulência e a viabilidade da instalação de um sistema óptico em espaço livre em uma determinada região geográfica.

Palavras-chave: Turbulência atmosférica, *Free Space Optics*, FSO, divagação do feixe, cintilação, alargamento do feixe, sistema de rastreamento.

## ABSTRACT

The light when is propagating thorough the atmosphere suffers the influence of the medium and his constitution. The atmospheric turbulence that happens between the transmitter and the receiver of a free space optics system can deteriorate the signal and consequently the communication. The gaseous composition, the presence of aerosols, rain, fog and changes in the refractive index leads to effects as scintillation, spread and wanders of the beam. Then, the atmospheric turbulence of the medium can limit the link distance of FSO system or slow the data rate.

In this work, will be present free space optic concepts, the atmospheric turbulence (beam wander, scintillation and beam spread), scattering and absorption. Furthermore, a new technique to measure atmospheric turbulence will be proposed, tested and validated. The technique uses the beam wander effect to define the refractive index structure constant ( $C_n^2$ ). The idea is to make a device capable to monitor the signal quality for a free space optics system link.

Key-words: atmospheric turbulence, free space optics, beam wander, scintillation, beam spread, tracking system

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução.....</b>	<b>14</b>
1.1. <b>Histórico das Comunicações Ópticas no Espaço Livre.....</b>	<b>14</b>
1.2. <b>Motivação .....</b>	<b>15</b>
1.3. <b>Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>17</b>
1.4. <b>Organização da Dissertação.....</b>	<b>18</b>
<b>2. Fundamentos do FSO .....</b>	<b>20</b>
2.1. <b>O que é Free Space Optics (FSO) .....</b>	<b>20</b>
2.2. <b>Transmissores.....</b>	<b>22</b>
2.2.1. Light Emitting Diodes (LED).....	23
2.2.2. Light Amplification by Stimulated Emission Radiation (LASER).....	24
2.3. <b>Receptores .....</b>	<b>26</b>
2.3.1. Características Básicas dos Fotodetectores.....	26
2.3.2. Fotodiodo.....	28
2.3.3. Diodo PIN.....	29
2.3.4. Fototransistor .....	29
2.3.5. Fotodiodo Avalanche (APD).....	30
2.4. <b>Ruído e Detecção.....</b>	<b>31</b>
2.4.1. Ruído Térmico.....	32
2.4.2. Ruído Shot.....	32
2.5. <b>Rastreamento do Feixe Óptico nos Sistemas FSO .....</b>	<b>33</b>
2.5.1. Gimbal .....	35
2.5.2. Steering Mirror .....	35
2.5.3. Detector de Quadrante .....	36
2.5.4. CCD.....	37
<b>3. Fatores de Degradação do Sinal.....</b>	<b>38</b>
3.1. <b>Perda Óptica.....</b>	<b>38</b>
3.2. <b>Perda por Espalhamento Geométrico.....</b>	<b>39</b>
3.3. <b>Espalhamento .....</b>	<b>40</b>
3.3.1. Espalhamento Rayleigh .....	41
3.3.2. Espalhamento Mie .....	41
3.4. <b>Absorção Atmosférica .....</b>	<b>42</b>

3.5.	<b>Turbulência Atmosférica .....</b>	<b>44</b>
3.5.1.	Divagação do Feixe .....	44
3.5.2.	Cintilação.....	45
3.5.3.	Alargamento do Feixe .....	45
3.6.	<b>Variações Climáticas .....</b>	<b>46</b>
<b>4.</b>	<b><i>Turbulência Atmosférica: Divagação do Feixe.....</i></b>	<b>48</b>
4.1.	<b>Constante de Estrutura para Índice de Refração .....</b>	<b>48</b>
4.2.	<b>Equação Paraxial da Onda .....</b>	<b>50</b>
4.3.	<b>Aproximação Paraxial.....</b>	<b>51</b>
4.4.	<b>Feixe Gaussiano e Equação Paraxial da Onda.....</b>	<b>52</b>
4.5.	<b>Parâmetros de Entrada das Ondas Eletromagnéticas Gaussianas .....</b>	<b>54</b>
4.6.	<b>Divagação do Feixe .....</b>	<b>56</b>
4.6.1.	Modelagem Matemática da Divagação do Feixe.....	56
4.6.2.	Formulação Especial para Divagação do Feixe .....	58
<b>5.</b>	<b><i>Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica.....</i></b>	<b>60</b>
5.1.	<b>Análise Qualitativa dea Técnica .....</b>	<b>61</b>
5.2.	<b>Análise Quantitativa da Técnica.....</b>	<b>62</b>
5.3.	<b>Arranjo Experimental .....</b>	<b>65</b>
5.3.1.	Sistema de Recepção .....	69
5.4.	<b>Programa e simulação .....</b>	<b>70</b>
5.5.	<b>Resultados Experimentais.....</b>	<b>72</b>
5.5.1.	Resultado 01 .....	79
5.5.2.	Resultado 02 .....	80
5.5.3.	Resultado 03 .....	81
5.5.4.	Resultado 04 .....	82
5.5.5.	Resultado 05 .....	83
5.5.6.	Resultado 06 .....	84
5.6.	<b>Análise dos Resultados .....</b>	<b>84</b>
	<b><i>Conclusão.....</i></b>	<b>94</b>
	<b><i>Bibliografia .....</i></b>	<b>97</b>
	<b><i>ANEXOS .....</i></b>	<b>101</b>

<b>I. Trabalho Publicado Referente ao Tema .....</b>	<b>102</b>
<b>II. Trabalhos Publicados Correlacionado ao Tema .....</b>	<b>107</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão Internacional de relação entre condições climáticas e visibilidade .....	47
Tabela 2 – Componentes usados no sistema de recepção e a banda passante dos circuitos .....	69
Tabela 3 – Correntes geradas pelo ruído térmico e ruído shot.....	70
Tabela 4 – Posições relativas de cada fotodetector utilizadas na realização das simulações. ....	70
Tabela 5 – Largura medida da gaussiana pelos fotodetectores na horizontal e vertical. ....	75
Tabela 6 - Posições relativas de cada fotodetector utilizadas na realização dos experimentos.....	78
Tabela 7 – Tensão de ruído provocada pelos ruídos shot, térmico e pela corrente de escuro. ....	85
Tabela 8- Grau de turbulência atmosférica máxima que o sistema experimental consegue medir em função da distância. ....	93

## LISTA DE ACRÔNIMOS

FSO	-	<i>Free Space Optics</i>
LED	-	<i>Light Emitting Diode</i>
LD	-	<i>Laser Diode</i>
CAPES	-	<i>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</i>
NASA	-	<i>National Aeronautics and Space Administrator</i>
WAN	-	<i>Wide Area Network</i>
MAN	-	<i>Metropolitan Area Network</i>
LAN	-	<i>Local Area Network</i>
DSL	-	<i>Digital Subscriber Line</i>
LMDS	-	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
PLC	-	<i>Power Line Communications</i>
MMDS	-	<i>Multipoint Multichannel Distribution System</i>
CCD	-	<i>Charge Coupled Device</i>
RF	-	<i>Rádio Frequência</i>
HDTV	-	<i>High Definition Television</i>
VCSEL	-	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser</i>
APD	-	<i>Avalanche Photo detector</i>
PIN	-	<i>P-I-N Photo detector</i>
PDS	-	<i>Positioning Device System</i>
STD	-	<i>Standard Fiber</i>
FC	-	<i>Fonte de Corrente</i>
CT	-	<i>Controlador de Temperatura</i>
MF	-	<i>Modal Filter</i>
ADC	-	<i>Analogical to Digital Converter</i>
PC	-	<i>Personal Computer</i>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um sistema de comunicação óptica no espaço livre (FSO) .....	20
Figura 2 - Equipamento DT-130 fabricado pela Canon Inc. Taxa de transmissão de 1,25Gbps, alcance de até 2km e sistema de rastreamento. ....	21
Figura 3 - Esquemático genérico de um dispositivo FSO.....	21
Figura 4 - (a) Junção PN. (b) Circuito equivalente de operação dos LEDs .....	23
Figura 5 - Largura espectral à meia altura típica dos LEDs (25nm - 100nm) (a), estrutura física dos <i>emitting surface</i> LEDs (c) e <i>edge emitting</i> LEDs (b). ....	24
Figura 6 - Gráfico corrente de entrada versus potência óptica de saída de dispositivos lasers. ....	25
Figura 7 - Curva de sensibilidade típica de fotodetectores feitos de material semiconductor. ....	27
Figura 8- (a) Junção <i>pn</i> polarizada reversamente. (b) Corrente de <i>drift</i> e de difusão ocorrida devida a incidência de luz.....	28
Figura 9 - Diodo PIN.....	29
Figura 10 - Circuito equivalente de um foto-transistor.....	29
Figura 11 - Fotodiodo avalanche (APD).....	30
Figura 12 - Circuito equivalente do ruído térmico .....	32
Figura 13 - Esquema de um gimbal que permite movimento vertical, horizontal e rotacional (a). Equipamento FSO da fSONA montado sob um gimbal.....	35
Figura 14 - Steering mirror utilizado em sistemas de comunicação óptica no espaço livre. ....	36
Figura 15 - Incidência de um spot de luz num esquema de um detector de quadrante com seus fotodetectores dispostos na forma de uma matriz 2x2 .....	36
Figura 16 - CCD (a). Esquema do chip CCD e os respectivos diodos sensíveis a luz (b).....	37
Figura 17 – Incidência de um raio de luz numa interface ar-vidro.....	39
Figura 18 - Perda por espalhamento geométrico .....	40
Figura 19 - Redistribuição da luz devido ao espalhamento Rayleigh .....	41
Figura 20 - Redistribuição da luz devido ao espalhamento Mie.....	42
Figura 21 - Transmitância atmosférica medida no nível do mar através de um caminho horizontal de 1820m [22].....	43
Figura 22 – Janelas de transmissão da atmosfera terrestre simulada por software (MODTRAN). ....	43
Figura 23- Efeito da Divagação do Feixe devido a turbulência atmosférica por causa da presença de células de tamanho relativamente grande (a). A consequência é a variação de posição do spot luminoso no plano do receptor.....	44
Figura 24 - Efeito da Cintilação devido a turbulência atmosférica por causa da presença de células de tamanho relativamente pequeno (a). Distribuição espacial de um feixe de luz depois de 1 quilômetro atravessando a atmosfera terrestre com grau de turbulência fraca. ....	45
Figura 25 - Atenuação em dB/km devido a visibilidade em três comprimentos de onda diferentes. ....	47
Figura 26 – Gráfico da variação da constante de estrutura para o índice de refração ao longo do dia medido na Flórida em um enlace de 150 metros a 1,5 metros de altura.....	50
Figura 27 - Geometria para determinação da aproximação paraxial.....	52

Figura 28 - Perfil do feixe de luz Gaussiano.....	53
Figura 29 - (a) Feixe Gaussiano convergente, (b) feixe colimado, (c) feixe divergente.....	53
Figura 30 - A divagação do feixe definida como o movimento LT do spot delimitada pela região circular em branco.....	57
Figura 31 - Ilustração qualitativa do experimento realizado em laboratório.....	61
Figura 32 – Anteparo com os fotodetectores dispostos na forma de um triângulo equilátero.....	61
Figura 33 - (a) Posição inicial da Gaussiana no anteparo no instante $t_0$ . (b) Posição da Gaussiana no instante $t_1$ devido a divagação do feixe provocado pela turbulência atmosférica.....	62
Figura 34 - Feixe gaussiano projetado no anteparo.....	63
Figura 35 - Arranjo experimental para consolidação da técnica proposta.....	66
Figura 36 – Medição da tensão de saída do fotodetector central durante um intervalo de tempo de 6h45min.....	66
Figura 37 - Anteparo com o papel vegetal para projetar a luz incidente.....	67
Figura 38 – Fotografia da distribuição da intensidade luminosa projetada no papel vegetal.....	67
Figura 39 – Perfil 2D da distribuição luminosa incidente no papel vegetal.....	68
Figura 40 - Perfil 3D da distribuição luminosa incidente no papel vegetal.....	68
Figura 41 – Circuito de recepção.....	69
Figura 42 – Movimentação do feixe gaussiano que será utilizada na simulação.....	71
Figura 43 – Gráfico da movimentação da gaussiana calculada pelo programa.....	71
Figura 44 - Anteparo usado no experimento com as posições relativas de cada fotodetector.....	72
Figura 45 – Anteparo com os parafusos micrométricos instalados na base e na parte traseira.....	73
Figura 46 – Estágio de Translação utilizado e o Parafuso micrométrico.....	73
Figura 47 - Medição da largura da gaussiana na horizontal medida através dos quatro fotodetectores.....	74
Figura 48 - Medição da largura da gaussiana na vertical medida através dos quatro fotodetectores.....	74
Figura 49 – Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no primeiro experimento.....	75
Figura 50 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no segundo experimento.....	76
Figura 51 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no terceiro experimento.....	76
Figura 52 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no quarto experimento.....	76
Figura 53 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no quinto experimento.....	77
Figura 54 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no sexto experimento.....	77
Figura 55 – Gaussiana usada no experimento.....	78
Figura 56 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores positivos da abscissa.....	79
Figura 57 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores positivos da abscissa ampliado.....	79
Figura 58 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores negativos da abscissa.....	80
Figura 59 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores negativos da abscissa ampliado.....	80
Figura 60 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores positivos da ordenada.....	81
Figura 61 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores positivos da ordenada ampliado.....	81
Figura 62 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores negativos da ordenada.....	82
Figura 63 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores negativos da ordenada.....	82
Figura 64 - Deslocamento de 45° em relação aos eixos coordenados até o ponto (5,00, -5,00).....	83

Figura 65 - Deslocamento de 45° em relação aos eixos coordenados até o ponto (5,00, 5,00). .....	83
Figura 66 - Deslocamento cobrindo todos os quadrantes na forma de um quadrado de lado 5mm. ....	84
Figura 67 – Erro do sistema de rastreamento do feixe óptico. ....	85
Figura 68 – Erro absoluto de posição provocado pelo ruído no sistema. ....	86
Figura 69 - Ruído de 11mV pico-a-pico, simulado, em cada fotodetector $D_i$ . ....	87
Figura 70 – No gráfico, em vermelho, é mostrado o caminho simulado em presença do ruído. Em preto é mostrado o caminho imposto ao feixe. ....	87
Figura 71 - Erro absoluto calculado pela diferença entre os gráficos mostrados na Figura 74.....	88
Figura 72 – Deflexão dos parafusos micrométricos instalados na base e rotação sobre o próprio eixo do anteparo com os fotodetectores. ....	89
Figura 73 - Ilustração do deslocamento do centro do feixe no plano o receptor de uma amplitude 10mm. ....	90
Figura 74 - Turbulência atmosférica devido à variância radial efetiva máxima de até 7mm para enlaces de 1000m, 1500m e 2000m. ....	91
Figura 75 - Turbulência atmosférica devido a variância radial efetiva máxima de até 7mm para enlaces de 200m, 300m, 400m e 500m. ....	92
Figura 76 – Turbulência atmosférica máxima em função do comprimento do enlace para uma variância radial máxima efetiva de 7mm. ....	92
Figura 77 - Turbulência atmosférica máxima em função do comprimento do enlace para uma variância radial efetiva máxima de 7mm .....	93

# 1. Introdução

## 1.1. *Histórico das Comunicações Ópticas no Espaço Livre*

A comunicação óptica em espaço livre não é uma tecnologia nova. Historicamente, as civilizações souberam utilizar o sol como portadora para implementar os primeiros sistemas de comunicações ópticas. Os sinais de fumaça utilizados pelos índios americanos para comunicação à distância, interpor espelhos ou objetos à luz solar modulando a portadora e transportando informações de forma instantânea são exemplos clássicos de como a óptica em espaço livre foi útil na transmissão de informação dos nossos antepassados. Há registro, que os gregos, no século VI antes de Cristo, utilizaram sinais de fogo para transmitir informações sobre a queda de Tróia.

O francês Claude Chappe, em 1791, construiu um telégrafo óptico (“*Semaphore*”), o primeiro sistema de comunicações digitais da história, que era um dispositivo composto de braços mecânicos, que instalado no alto de uma torre, permitia a transmissão de sinais a longas distâncias [1]. O “*Photophone*”, inventado por Alexandre Graham Bell em 1880, era outro equipamento para transmissão de voz pelo ar por meio da modulação da luz solar [2]. Por um tempo, os telégrafos ópticos permitiram a comunicação através de extensas distâncias, sendo deixados de lado com o advento da eletricidade que passou a permitir que a informação fosse transmitida a taxas e confiabilidade bem mais altas sem que houvesse necessidade de visada direta.

A partir de 1960, com a construção e funcionamento do primeiro *laser* (rubí), realizada por Theodore Maiman e, posteriormente, o desenvolvimento do diodo laser (LD) em 1962, se iniciou uma nova era para as comunicações ópticas [3]. Finalmente, uma fonte de luz com potência elevada e uma capacidade de transmissão enorme eram encontradas, capaz de transmitir informação a alcances e banda passante jamais imaginado.

Entretanto, ainda não se tinha um meio físico adequado para suportar comunicações usando *laser*. Desde então, diversos estudos foram sendo realizados à procura de um meio que pudesse corresponder às expectativas e, assim, surgiram os guias de onda e, conseqüentemente, a óptica guiada. Em 1964, o Dr. Erhard Kube iniciou seus estudos em transmissão de luz através da atmosfera, publicando em 1968 um artigo, escrito em alemão, com o título: “Transmissão da informação por feixe de luz através da atmosfera” [4].

Também em meados da década de 60, a NASA (National Aeronautics and Space Administration) realizou experimentos usando *lasers* de hélio-neônio para fazer comunicação entre estações terrenas e satélites, assim como entre estações terrenas e aeronaves. Em 1980, as forças aéreas americanas já utilizavam sistemas portáteis de comunicações ópticas no espaço livre (FSO – Free Space Optics) e a marinha, após uma década, também utilizou *lasers* para comunicação. O grande crescimento das telecomunicações, com o advento da Internet e a necessidade de sistemas de comunicação mais robustos, fez com que o FSO fosse trazido para o setor privado na década de 90 e, conseqüentemente, um aumento em pesquisas relacionadas ao tema.

## 1.2. **Motivação**

A motivação para a realização deste trabalho veio do Ministério da Defesa através do projeto Pró - Defesa que, dentre outras, possui a linha de pesquisa relacionada ao estudo teórico e experimental de transmissão óptica no espaço livre com SCM (*Subcarrier Modulation*).

O FSO é uma tecnologia de transmissão de informações pela atmosfera, através da modulação de um feixe de luz, visível ou infravermelho. Assim, um enlace óptico em espaço livre deve conter alguns elementos básicos: um transmissor (telescópio) de luz de adequada potência operando na região visível ou infravermelho próximo do espectro, focalizando num receptor que deve ser capaz de capturar a luz que chega pelo ar e concentrar num fotodetector.

Os sistemas de FSO podem funcionar a distâncias da ordem de quilômetros, sendo que é estritamente necessário que o transmissor e receptor estejam em linha de visada, não podendo haver qualquer tipo de obstrução entre as partes. As taxas de transmissão são superiores aos sistemas baseados em portadoras na faixa de rádio. Comercialmente, existem produtos que trafegam taxas de 100Mbps até 1,5Gbps [5].

De acordo com a Associação Brasileira de Telecomunicações, ainda verifica-se um crescimento exponencial no Brasil de usuários de Internet, telefonia celular, TV por assinatura e de outros serviços de Telecomunicações [6]. Dentro desse contexto, observou-se, em um passado recente, a grande evolução das comunicações e a formação e crescimento das WANs (*Wide Area Network*), MANs (*Metropolitan Area Network*), LANs (*Local Area Network*) e das redes gigabits.

Esse quadro, onde se tem uma rede com uma capacidade tremenda a ser explorada e usuários ávidos para utilizar todos os novos serviços que surgem no mercado, força os provedores de acesso a prover uma forma flexível e de baixo custo para satisfazer a enorme demanda por banda do usuário final. O FSO surge como mais uma alternativa de conexão ponto-a-ponto, de alta capacidade e de relativo baixo custo e flexibilidade. As outras tecnologias de acesso como, xDSL (*Digital Subscriber Line*), *cable modems*, PLC (*Power Line Communication*), LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) e MMDS (*Multipoint Distribution System*) possuem custos de instalação baixos, entretanto, não tem a mesma banda que um sistema FSO e podem apresentar problemas de interferência eletromagnética.

As fibras ópticas, apesar de transmitirem informações a taxas da ordem de Gbps ou Tbps, atingem custos de instalação elevados, quando aplicados à rede de acesso. Outra questão importante é que a região do espectro de operação dos sistemas de alta capacidade em microondas está congestionada, e os sistemas de óptica em espaço livre utilizam uma região acima do espectro (em frequência) e sem necessidade de licenciamento. Inerente ao FSO está a segurança, pois sendo uma tecnologia em linha de visada não pode ser interceptada facilmente. Além disso, o FSO não está na região visível do espectro, tornando difícil sua localização no espaço.

No entanto, ao contrário das comunicações ópticas guiadas, o FSO está sujeito a eventos completamente aleatórios, típicos das comunicações sem-fio na faixa de rádio. Eventos esses, que vão desde um simples pássaro interrompendo a propagação do feixe óptico até alterações climáticas como, por exemplo, chuva, neblina, variações de temperatura e pressão, dentre outros. Pode-se, então, subdividir os eventos que acabam por limitar o desempenho de um sistema FSO em cinco fatores: obstrução, espalhamento, absorção, turbulência e variações climáticas (chuva, neblina e neve). Por ser uma tecnologia em linha de visada, a obstrução ocorre quando o feixe óptico é interrompido por algum obstáculo, geralmente, são interrupções de curta duração e resolvidas por meio de diversidade espacial quando se utiliza múltiplos feixes. O espalhamento é uma refração difusa do feixe óptico, que ocorre quando a luz ao se propagar pela atmosfera encontra partículas em suspensão. A absorção é devido as moléculas de água que acabam por absorver os fótons atenuando o sinal. A turbulência pode ser classificada em três tipos quanto aos efeitos impostos no feixe de luz: cintilação, divagação do feixe e divergência do feixe (*scintillation*, *beam wander* e *beam spread*, respectivamente). Ela acontece por causa das variações do índice de refração da atmosfera ao longo do enlace e afeta o sinal propagante fazendo com que o feixe: divague dentro de uma determinada região na recepção (deslocamento da imagem, divagação do feixe), que

apareçam interferências aleatórias na frente de onda saturando ou eliminando o sinal (cintilação) e um alargamento do spot luminoso (*beam spread*) na recepção.

Este trabalho, portanto, tem o objetivo de apresentar o desenvolvimento de uma técnica simples e de baixo custo para mensurar a turbulência e, ao mesmo tempo, realizar o rastreamento do feixe óptico. Com a medida, pode-se constatar se em determinada região geográfica a instalação de um enlace óptico em espaço livre é possível e economicamente viável. Além disso, em longo prazo, as mudanças climáticas que vêm ocorrendo devido à poluição associada ao aumento de gases em suspensão na atmosfera, que afetam diretamente o grau de turbulência, enfatizam a necessidade da realização de novas medidas. A técnica proposta permite a caracterização da turbulência atmosférica, determinando indiretamente a Constante de Estrutura para o Índice de Refração ( $C_n^2$ ) pela posição do feixe na recepção, através da medida direta da variância do raio efetivo.

### 1.3. **Revisão Bibliográfica**

O crescimento das telecomunicações proporcionou o aparecimento de novas tecnologias com a intenção de suprir a demanda por altas taxas de transmissão de dados. O FSO é uma dentre essas tecnologias emergentes que têm, como um dos principais objetivos, solucionar, em determinados casos, conexões ponto-ponto, problemas referentes à última milha e solucionar parte dos problemas das redes de acesso. O aumento de investimentos e estudos realizados após a década de 90, visando a melhoria de sistemas baseados em FSO, aumentaram consideravelmente, tendo como principal objetivo solucionar, ou pelo menos atenuar, os efeitos que deterioram o sinal óptico propagante, como, por exemplo, a turbulência atmosférica.

Esses estudos seguem linhas e soluções das mais diversas possíveis para medir, e/ou compensar, e até modelar, a turbulência atmosférica no meio. Alguns experimentos para a medida da turbulência já foram publicados [7-12]. Por exemplo, utilizando um *laser* em 1550nm e um fotodetector separados a uma distância de 420m, com o intuito de determinar a variação da intensidade da frente de onda e, assim, mensurar a cintilação [7]. Outro método na literatura consiste em quantificar a cintilação de um enlace, utilizando, ao invés de um fotodetector, como no exemplo anterior, uma câmera CCD e tirar fotos em tempos regulares [8].

Seguindo a mesma linha, já existem disponíveis no mercado alguns dispositivos comerciais que possuem a tarefa de medir a turbulência atmosférica e, utilizados em dissertações de mestrado mostrando a sua eficácia [9]. Algumas técnicas de múltiplos feixes, de sistemas híbridos utilizando FSO e RF (Rádio Frequência), a utilização de amplificadores saturados e até rastreamento de feixe, através de algoritmos preditivos de redes neurais, também já são conhecidos para contornar os efeitos de turbulência [10]. Muitos modelos matemáticos, implementados em *software* para averiguar a viabilidade técnica de instalação, através de dados geográficos (latitude, longitude, altura e afins) e dos equipamentos a serem utilizados, já foram desenvolvidos [11].

O trabalho aqui apresentado tem como principal objetivo demonstrar uma nova técnica para mensurar a turbulência atmosférica e, ao mesmo tempo, atenuar as suas conseqüências, rastreando o feixe óptico que chega ao receptor. O dispositivo que realiza a medida para essa nova técnica é capaz de realizar tal tarefa pela avaliação da divagação do feixe. Além disso, o rastreamento também pode ser usado para o monitoramento de vibrações e deslocamentos de estruturas de maneira geral [12].

#### **1.4. Organização da Dissertação**

Assim sendo, o trabalho foi subdividido em três blocos bem definidos em um total de cinco capítulos. Um primeiro bloco, composto de aspectos teóricos e dos conceitos básicos das comunicações ópticas no espaço livre pertinentes ao tema e ao desenvolvimento do arranjo experimental. Esse bloco é constituído dos capítulos 2 e 3.

O segundo terá como enfoque a descrição básica do FSO e as partes que compõem os sistemas que utilizam essa tecnologia e que são de vital compreensão para a demonstração experimental. Vale salientar que detalhes relacionados aos sistemas de comunicação óptica no espaço livre, por exemplo, as lentes utilizadas nos dispositivos, foram omitidos por não serem necessários para entendimento final da técnica proposta. Serão descritas as fontes de luz, formas de detecção da mesma, linha de visada dos enlaces e sistemas de rastreamento de feixe comumente utilizados comercialmente.

No Capítulo 3, serão apresentados os fatores que acabam por alterar a propagação do feixe óptico no espaço livre e limitam a capacidade dos sistemas baseados no FSO. O capítulo é voltado para os problemas de atenuação do sinal que são caracterizados por espalhamento,

absorção, clima e turbulência atmosférica (cintilação, divagação do feixe e alargamento do feixe).

O segundo bloco do trabalho é o Capítulo 4. Ele dará a base para compreender a proposta da nova técnica para medição da turbulência atmosférica, o arranjo e as medidas experimentais. No término desta leitura, o leitor entenderá o que quer se medir e através de que parâmetros tais medidas poderão ser realizadas. Assim sendo, será feita uma descrição teórica mais aprofundada da turbulência atmosférica e, mais precisamente, do efeito de divagação do feixe que é onde a técnica foi estruturada.

O terceiro bloco da dissertação será subdividido em dois capítulos. O Capítulo 5 é a demonstração da técnica e o arranjo experimental que foi desenvolvido para validar o que é proposto. Serão apresentadas todas as etapas dos testes realizados, assim como os resultados obtidos e a validação da técnica, através da confrontação com a teoria previamente descrita. Finalmente, termina-se a dissertação concluindo o que foi realizado no período e as idéias e perspectivas futuras que podem ser vislumbradas e realizadas para seguimento do tema. Esse muito amplo e com uma complexidade que permite uma gama de estudo bem variada e intensa.

## 2. Fundamentos do FSO

### 2.1. O que é Free Space Optics (FSO)

Antes de iniciar o estudo propriamente dito da turbulência atmosférica, necessita-se entender os conceitos básicos relacionados aos sistemas de comunicação óptica do espaço livre, o mecanismo, o que o constitui e as partes envolvidas. Posteriormente, compreender melhor a propagação e os efeitos sofridos pela luz, através da atmosfera. O capítulo que se segue tem como objetivo tornar os conceitos de cada parte do FSO bem definidos e estruturados.

O FSO é uma tecnologia de transmissão da informação através da modulação e emissão da luz pela atmosfera terrestre, com a intenção de se obter taxas elevadas inerentes aos comprimentos de onda envolvidos. Como é uma tecnologia de transmissão ponto-a-ponto, o FSO é composto por um sistema de transmissão (Tx) e por um de recepção (Rx) em linha de visada entre os pontos de rede separados por uma distância  $L$ , sendo que qualquer tipo de obstrução é fatal para a manutenção da comunicação. Um esquema básico do sistema pode ser visto na Figura 1.

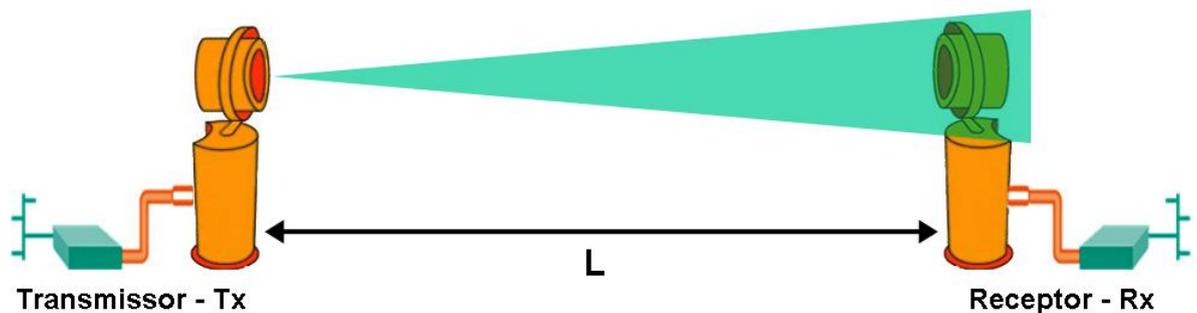


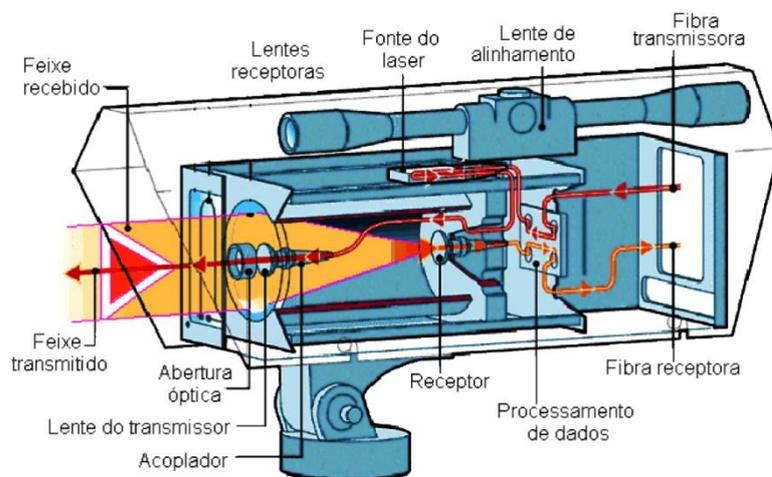
Figura 1 - Esquema de um sistema de comunicação óptica no espaço livre (FSO)

Assim, de um lado do enlace temos o transmissor, com uma abertura numérica pequena para diminuir o efeito da divergência, que é constituído basicamente de uma fonte de luz e de um conjunto de lentes para emitir luz o máximo colimada quanto possível. A fonte de luz pode ser proveniente diretamente de um *laser* diodo ou de uma fibra óptica que traga a luz de um *laser*. Logo, o sinal luminoso propaga pela atmosfera até o receptor, que deve ter uma abertura numérica grande para ser capaz de captar o máximo de intensidade óptica. Possui

também um conjunto de lentes que focaliza a luz que chega a uma fibra óptica que está ligada a um circuito de recepção (fotodetector) estabelecendo a comunicação entre as partes. Existem produtos no mercado que realizam as duas tarefas de transmissão e recepção em um mesmo equipamento (*full-duplex*) e, além disso, possuem um sistema de alinhamento/rastreamento acoplado, utilizando um feixe de luz secundário em comprimento de onda diferente para estabelecer e manter a linha de visada, como ilustrado na Figura 2 e esquematizado na Figura 3.



**Figura 2 - Equipamento DT-130 fabricado pela Canon Inc. Taxa de transmissão de 1,25Gbps, alcance de até 2km e sistema de rastreamento.**



**Figura 3 - Esquemático genérico de um dispositivo FSO.**

Por mais precisa e cuidadosa que seja a fabricação das lentes utilizadas, na prática, nunca se alcançará uma colimação perfeita, e sempre existirá uma divergência do feixe que, atualmente, varia na ordem de centenas de micro radianos a alguns miliradianos. Essa divergência, como vista na Figura 1, faz com que o diâmetro do feixe aumente proporcionalmente à distância e ocasiona uma perda por espalhamento geométrico (divergência) que será vista com mais detalhes no Capítulo 3. Exemplificando, um feixe com divergência de 1 miliradiano terá, após 1km, diâmetro de 1m. Na Figura 1, pode-se ver qualitativamente essa alteração de diâmetro. Com isso, quanto maior é a distância, maior é a perda por espalhamento geométrico.

Nas transmissões digitais, o sinal do transmissor é modulado por um sinal elétrico que contém as informações a serem transmitidas. Esse processo de conversão elétrico-óptico permite que a transmissão seja completamente independente do protocolo utilizado na camada de transporte. Logo, o FSO opera exclusivamente no meio físico, podendo trafegar informações de protocolos diferentes.

O mercado de telecomunicações tem equipamentos de FSO operando em duas bandas de frequências: 780-900nm e 1500-1600nm. A primeira banda é de dispositivos de custo mais baixo e utilizado para distâncias relativamente pequenas. Enquanto na segunda, os dispositivos envolvidos são mais caros e usados em aplicações mais robustas e sofisticadas. Analisando com mais cuidado, observa-se que a janela de transmissão usada em comunicações ópticas confinadas em torno do comprimento de onda de 1300nm, não é comumente empregada em dispositivos de FSO, devido ao fato de haver grande absorção atmosférica nesse comprimento de onda [14].

Outro fator interessante que concerne o FSO é que a faixa de frequências de operação desses sistemas não precisa de licenciamento e, conseqüentemente, custos adicionais. Uma limitação está na segurança da visão (*eyesafe*), onde determinados comprimentos de onda são altamente nocivos ao olho humano. Comprimentos de onda acima de 1400nm são absorvidos pela córnea e não são focalizados na retina, por causa disso, a quantidade de potência usada em sistemas que operam acima de 1400nm pode ser até 50 vezes maior do que sistemas operando em 850nm [13].

## 2.2. **Transmissores**

Quando se trata de comunicações ópticas, seja no espaço livre ou não, necessariamente necessita-se de uma fonte de luz apropriada para a transmissão de informação. Por esta razão são escolhidos diodos emissores de luz (LED – *Light Emitting Diode*) ou LASERs (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) devido às suas potências de radiação luminosa e frequências ópticas. Mais importante é a capacidade com que esses diodos podem ser modulados diretamente por corrente elétrica a taxas de até dezenas de GHz, dependendo do material que são fabricados.

A escolha de uma fonte de luz adequada para um enlace de FSO depende da aplicação específica, onde serão avaliados fatores como distância do enlace, taxa de transmissão, dentre outros. Por exemplo, se a demanda é por banda acima de 1Gbps, os LEDs não são as fontes

ideais a serem utilizadas. O custo de determinados dispositivos também varia de poucas dezenas de dólares a algumas dezenas de milhares de dólares, de acordo com o grau de sofisticação e desempenho necessários.

### 2.2.1. Light Emitting Diodes (LED)

Os diodos emissores de luz (LED), apesar de serem de custo baixo, são utilizados em sistemas FSO somente em distâncias relativamente pequenas, quando comparadas as distâncias alcançadas por LASERs, isso devido à baixa potência de radiação. Na maior parte dos LEDs, as taxas de transmissão são limitadas a 155Mbps restringindo ainda mais as aplicações. Os LEDs são junções semicondutoras *pn* que emitem luz, quando diretamente polarizadas. Na Figura 4.a tem-se, esquematicamente representado, o formato de uma junção que caracteriza um LED e ao lado, na Figura 4.b, o circuito equivalente para emissão de luz pelo LED.

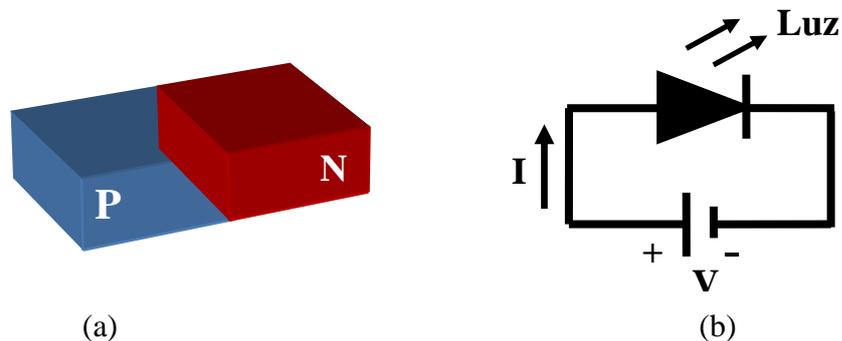


Figura 4 - (a) Junção PN. (b) Circuito equivalente de operação dos LEDs

Outras características importantes nos LEDs são: largura espectral ( $\Delta\lambda$ ) a meia potência que varia na faixa de 20nm a 50nm na maioria dos casos (Figura 6.a), forma de emissão de luz (Figura 6.a e Figura 6.b), MTBF (*mean time between failure*) que é em média 11 anos, temperatura suportada sem modificação de suas características entre -65 e +125°C e tipo de encapsulamento.

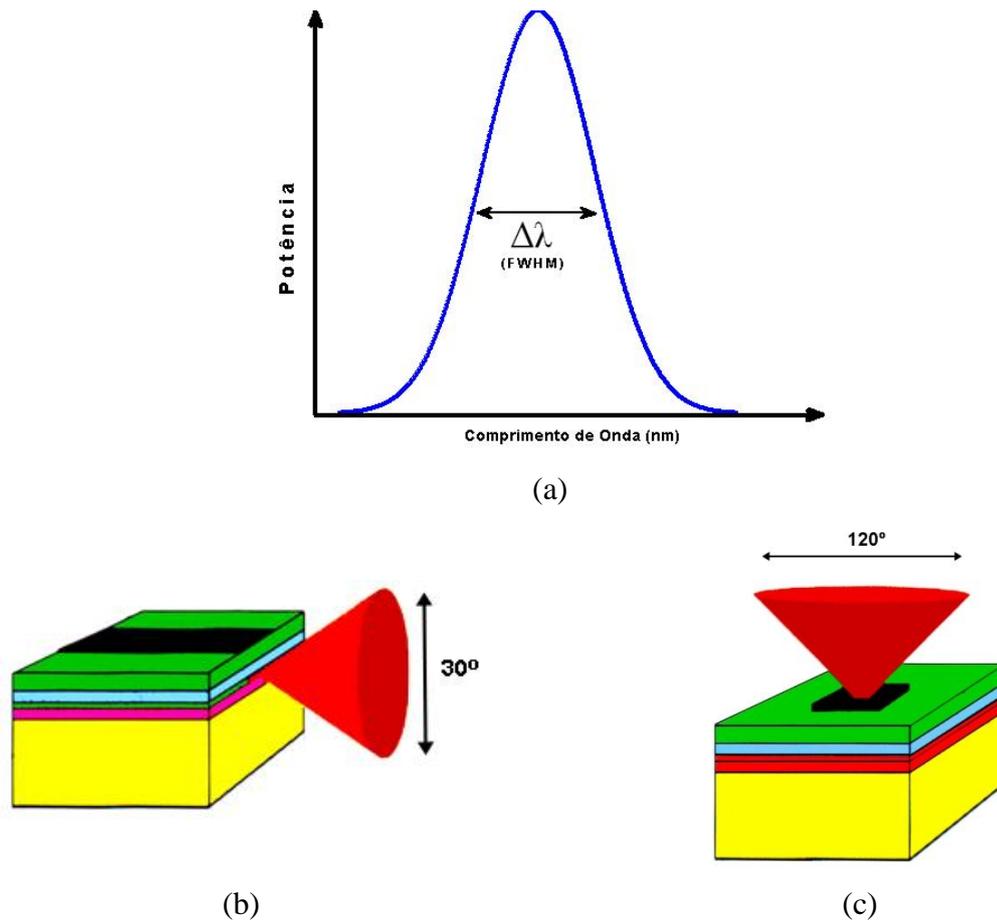


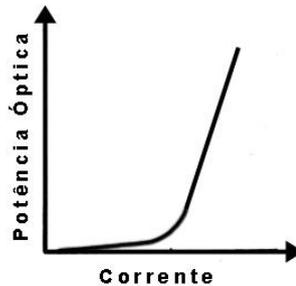
Figura 5 - Largura espectral à meia altura típica dos LEDs (25nm - 100nm) (a), estrutura física dos *emitting surface* LEDs (c) e *edge emitting* LEDs (b).

## 2.2.2. Light Amplification by Stimulated Emission Radiation (LASER)

Um LED gera luz, quando os portadores de carga de forma espontânea se recombinam e, nesse momento, liberam energia na forma luminosa. O *laser* irradia luz de forma estimulada. A idéia proposta por Einstein em 1916 era de que um fóton, com energia correspondente ao nível de energia de transição, pudesse estimular um átomo que está em um nível de energia acima a cair para um nível abaixo. Ao descer para um nível abaixo, esse átomo liberaria energia na forma de outro fóton com a mesma quantidade de energia e características do fóton estimulador.

Como os LEDs, os *lasers* são eletricamente bombeados. Quando a tensão é baixa, o ganho é pequeno e nenhuma potência óptica é obtida. À medida que a tensão aumenta, inicia-se o processo de emissão espontânea e o *laser* funciona como um LED, incoerente e de

largura espectral larga. Aumentando ainda mais, até a uma corrente de limiar, o ganho iguala as perdas e a oscilação inicia. A partir desse ponto, um pequeno aumento da tensão acarreta um grande aumento de potência óptica (Figura 6) e a luz passa a ser coerente e a ter um espectro gaussiano como o da Figura 5.a, porém estreito e de largura típica de 1nm.



**Figura 6 - Gráfico corrente de entrada versus potência óptica de saída de dispositivos lasers.**

Os Diodos Lasers (LDs) são dispositivos emissores de luz com capacidade de modulação a taxas mais altas que os LEDs, na ordem de GHz. Possuem uma potência de radiação maior, criando mais possibilidades de aplicações para sistemas FSO, pois os alcances são maiores e a quantidade de informação que pode ser transmitida. Para exemplificar, existem equipamentos FSO disponíveis que trafegam HDTV (*High Definition TV*) em tempo real [15]. Por ser um dispositivo mais complexo, o custo é elevado em comparação com os LEDs. Existem LDs com estruturas como os LEDs, *surface emitting* e *edge emitting* e visualizadas na Figura 5. Cada estrutura tem sua particularidade, os LDs *edge emitting* chegam a ter potência maior que 100mW e taxas de modulação superiores a 1GHz. Uma desvantagem é o perfil de emissão que não é simétrico formando uma elipse de padrão da ordem de 20x35 graus, ocasionando uma dificuldade de acoplamento em fibras e em óptica aberta, necessitando o uso de lentes cilíndricas especiais para melhor acoplamento da luz. Ao contrário, os LDs *surface emitting* têm padrão de emissão simétrico de abertura de aproximadamente 12 graus e, consequentemente, um melhor acoplamento.

Além dos LEDs e dos LDs, são utilizados nos sistemas de FSO os VCSELs (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) que têm como vantagens: consumo de energia baixo, não esquentam com facilidade, fácil acoplamento com fibras elípticas, baixo custo e largura de banda que chega até 5GHz. A escolha de uma fonte de luz para um sistema FSO depende de alguns fatores:

- O comprimento de onda de operação deve estar disposto em uma das janelas de transmissão atmosférica que está situada entre 850nm e 1550nm;

- Tem que ser capaz de manter suas características mesmo com variações de temperatura consideráveis;
- Ser modulável e potente o suficiente para conseguir transmissão pela atmosfera;
- Ser compatível com outros sistemas de transmissão;
- Seguro aos olhos;

Atualmente, encontram disponível no mercado uma variada gama de LEDs e *lasers* com características das mais variadas. No entanto, não faz parte do objetivo central do trabalho dissertar sobre o assunto e esgotá-lo, mas, sim, ter uma idéia para compreender as comunicações ópticas no espaço livre e os aspectos a serem considerados na geração de luz.

### **2.3. Receptores**

Outro bloco dos sistemas de transmissão FSO é a parte de recepção do sinal óptico. O sistema tem que ser capaz de transformar a energia carregada por um fóton em energia elétrica, para poder concretizar a troca de informação entre os pontos. Assim como nas fontes de luz, os dispositivos receptores utilizados também são semicondutores que, dependendo do material e do composto envolvido na fabricação, irão operar em uma faixa de comprimentos de onda adequada. É importante ressaltar que a eficiência de um sistema estará diretamente relacionada com a qualidade dos equipamentos de recepção e a sua sensibilidade, ou seja, na capacidade de transformar a quantidade de luz que chega até eles em corrente elétrica, apesar das condições adversas como, por exemplo, ruído, turbulência atmosférica e etc.

#### **2.3.1. Características Básicas dos Fotodetectores**

A maioria dos dispositivos utilizados detecta a luz através de um mecanismo conhecido chamado de efeito fotoelétrico interno, e as características para um bom desempenho dos mesmos é, além de um baixo nível de ruído que será visto mais tarde, determinada principalmente por:

- Responsividade;

- Resposta Espectral;
- Tempo de resposta;
- Corrente de Escuro

A responsividade ( $\rho$ ) é a relação entre a corrente gerada pelo fotodetector e a potência óptica que incide sobre ele. A unidade de medida é o Amper/Watt (A/W).

$$\rho = \frac{i}{P} \quad (2.1)$$

A resposta espectral é a sensibilidade do fotodetector em função do comprimento de onda levando em consideração que todo o espectro esteja com uma distribuição de potência constante.

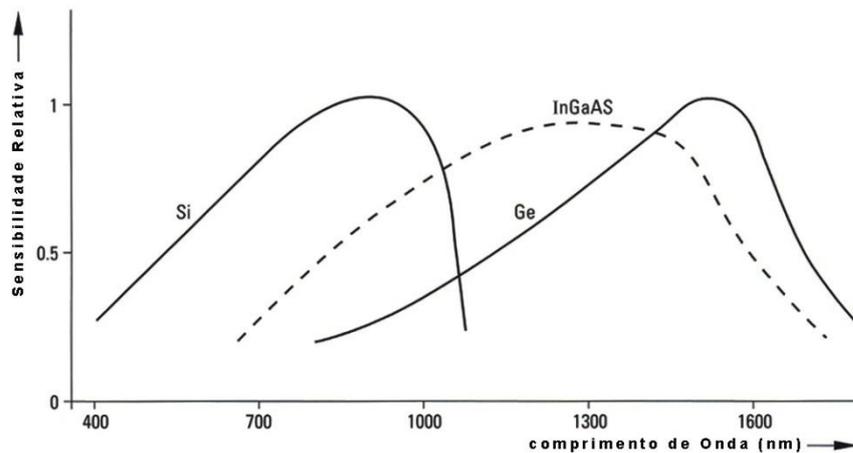


Figura 7 - Curva de sensibilidade típica de fotodetectores feitos de material semiconductor.

O tempo de resposta ( $t_r$ ) é o tempo em que a corrente gerada pelo fotodetector vai dos 10% aos 90% do valor final pela incidência de um pulso de luz sobre ele. Logo, a frequência de corte de 3dB de um fotodetector é relacionada com o tempo de resposta de acordo com:

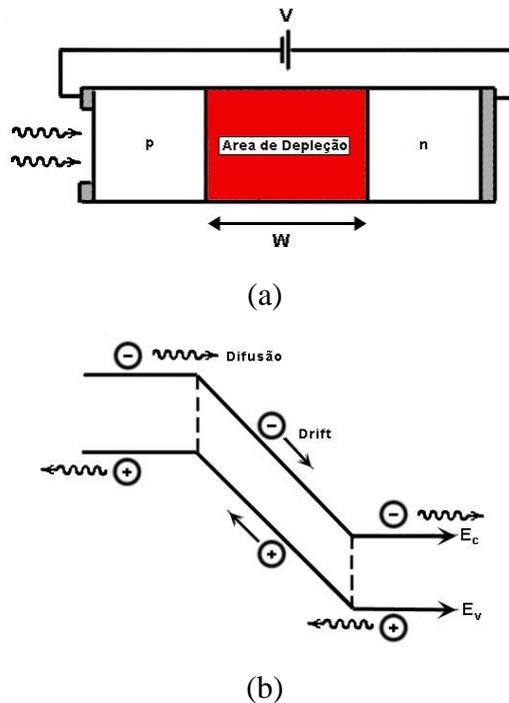
$$f_{3dB} = \frac{0,35}{t_r} \quad (2.2)$$

A corrente de escuro ( $i_D$  – *dark current*) é a corrente gerada pelo dispositivo sem estar sobre ele incidindo luz. Essa corrente é caracterizada pela geração e recombinação de elétrons livres e lacunas devido à variação de temperatura.

### 2.3.2. Fotodiodo

Os fotodiodos são dispositivos rápidos, pequenos, sensíveis e podem transformar energia luminosa em energia elétrica para uma gama extensa de comprimentos de onda incidentes. São junções  $pn$  e empregados com polarização reversa, ao contrário das fontes de luz como os LEDs.

Ao polarizar reversamente ( $V$ ) o dispositivo  $pn$ , a barreira de potencial ( $W$ ) entre os semicondutores  $p$  e  $n$  aumenta, fazendo com que nenhuma lacuna ou elétron livre consiga atravessar a junção e não apareça corrente elétrica no circuito. A região da junção onde não se encontra carga disponível é chamada de área de depleção e está sob forte influência de um campo elétrico gerado pela polarização reversa (Figura 8).



**Figura 8-** (a) Junção  $pn$  polarizada reversamente. (b) Corrente de *drift* e de difusão ocorrida devida a incidência de luz.

Ao incidir um fóton no dispositivo, ele é absorvido e sua energia é suficiente para fazer com que apareça um par elétron lacuna na área de depleção criando uma carga livre. O elétron será excitado deixando uma lacuna. Devido ao forte campo elétrico na junção, essas cargas são movimentadas. Com esse movimento de carga (*drift*), uma corrente começa a circular no circuito. Além disso, aparecem fora da junção pares elétrons-lacunas criando uma corrente de difusão que distorce o sinal e que pode ser diminuída com o aumento da área de depleção.

### 2.3.3. Diodo PIN

O diodo PIN é um fotodiodo com uma camada larga de material semiconductor intrínseco entre os materiais tipo  $p$  e tipo  $n$  que formam a junção. A idéia é aumentar a distância entre o semiconductor tipo  $n$  e  $p$  para que, ao incidir um fóton, ele seja absorvido na região intrínseca e não fora dela, diminuindo a corrente de difusão e, conseqüentemente, aumentando a responsividade (Figura 9). Esse tipo de fotodetector é o mais utilizado em equipamentos FSO e o comprimento de onda de corte pode ser calculado pela equação 2.2.

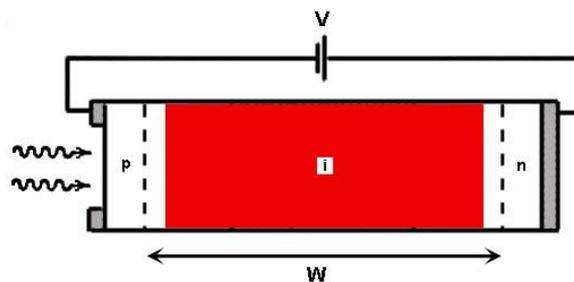


Figura 9 - Diodo PIN

### 2.3.4. Fototransistor

Foto-transistor é um fotodiodo integrado a um amplificador numa mesma pastilha de silício. É um diodo receptor de luz em que a sua corrente de saída ( $i_{\text{foto}}$ ) alimenta a base ( $i_b$ ) de um transistor amplificando o sinal. O ganho desses dispositivos pode ser de 100 a 1500 vezes e o circuito equivalente pode ser visto abaixo na Figura 10:

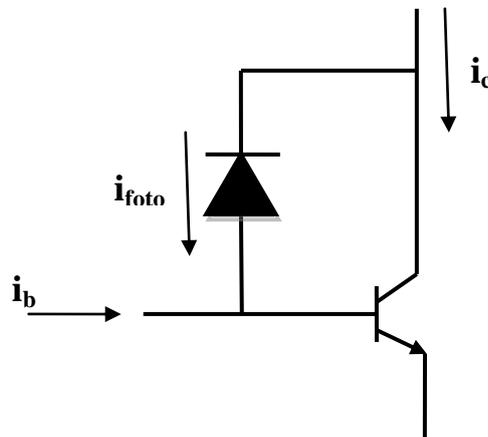


Figura 10 - Circuito equivalente de um foto-transistor

Entretanto não é utilizado para comunicação, devido ao fato de não ter uma velocidade de resposta a variação da potência óptica suficiente para as aplicações atuais. Isso ocorre devido ao efeito Miller o qual determina que quanto maior for o ganho no dispositivo, menor é a sua velocidade de resposta. O fototransistor foi utilizado no experimento, que será visto no Capítulo 5, devido às características de ganho e por não haver necessidade de dispositivos rápidos.

### 2.3.5. Fotodiodo Avalanche (APD)

O fotodiodo avalanche é um fotodetector que possui um ganho interno aumentando a responsividade e a relação sinal-ruído dos sistemas. O princípio de funcionamento do efeito avalanche consiste em um fóton sendo incidido e absorvido na área de depleção. Este acaba por criar um par elétron-lacuna que é acelerado devido ao intenso campo elétrico a que é submetido. Ao ser acelerado, a carga livre adquire energia cinética e colide com outro átomo que acaba por receber essa energia e forma outro par elétron-lacuna secundário. Esse par elétron-lacuna secundário também adquirirá energia cinética e colidirá com outros átomos na rede e assim sucessivamente ocasionando um efeito avalanche.

Na Figura 11, as regiões marcadas com  $n+$  e  $p+$  são altamente dopadas. A região de depleção da junção  $pn+$  se junta com a região de depleção formada em  $\pi$  criando uma região maior. Um par elétron-lacuna, criado a partir da incidência de um fóton no material intrínseco, é exposto a um campo elétrico intenso e acelerado até a região  $p$ , colidindo com átomos e formando outros pares elétrons-lacunas.

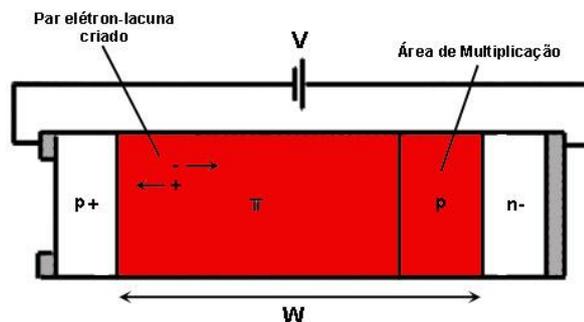


Figura 11 - Fotodiodo avalanche (APD)

A responsividade típica varia de 20-80A/W que é bastante elevada comparando com diodos PIN que têm 0,5-0,7 A/W:

$$\rho = \frac{Me\lambda\eta}{hc} \quad (2.3)$$

A escolha do tipo do fotodetector depende exclusivamente da aplicação, pois as características do dispositivo têm que estar de acordo, por exemplo, com o comprimento de onda de transmissão e outros aspectos. Os fotodetectores de silício, por exemplo, são a melhor escolha para comprimentos de onda a cerca de 850nm, como pode ser confirmado na Figura 7, pois apresentam uma responsividade elevada nessa região. O diodo PIN é usado para aplicações em curta distância, em que o transmissor pode oferecer uma potência de transmissão satisfatória. O diodo avalanche é utilizado para grandes distâncias devido à sensibilidade elevada, entretanto, necessita de uma fonte estável. Ele é mais caro que os diodos PIN e possui corrente de escuro grande e, portanto, alto ruído.

O silício tem comprimento de onda de corte em 1100nm não podendo ser utilizado, por exemplo, na janela de 1550nm. Para isso se utiliza InGaAs que tem uma responsividade de 0,9 A/W em 1550nm e pode operar a taxas maiores que 10Gbps.

O fototransistor não é utilizado para detecção em sistemas FSO, pois responde lentamente às variações de potência óptica, não podendo ser utilizado nas aplicações atuais. Mas, foi citado no trabalho, porque foi utilizado para a demonstração da técnica, por possuir baixa sensibilidade a variações de temperatura, responsividade bem mais alta que os diodos PIN e baixo custo.

## 2.4. **Ruído e Detecção**

Vários fenômenos ocasionam uma deterioração do sinal que se propaga através da atmosfera. Assim, a qualidade do sinal recebido depende de um gama de variáveis que serão vistas no momento oportuno. Foram vistos na seção 2.3 o básico sobre o mecanismo de detecção de luz, os dispositivos mais comuns utilizados e as suas peculiaridades, quando aplicados no FSO. É importante também destacar a deterioração da qualidade do sinal que os detectores introduzem nos sistemas [16]. Assim, será apresentado nessa seção os ruídos inerentes aos fotodetectores e o quão eles são prejudiciais as comunicações ópticas de maneira geral, em específico o FSO. É de suma importância o entendimento dessa seção para compreender o erro provocado pelo ruído na técnica que será apresentada no Capítulo 5.

### 2.4.1. Ruído Térmico

O ruído térmico é devido à resistência de carga ( $R_L$ ) do fotodetector, pois os elétrons que estão no resistor se movimentam, mesmo não havendo tensão sendo aplicada entre os seus terminais. Isso ocorre porque a energia térmica mantém os elétrons da rede em constante movimento aleatório, provocando uma corrente elétrica, também, aleatória. A média da corrente estabelecida devido ao ruído é zero. Entretanto, a potência ( $P_{NT}$ ) gerada por essa corrente no resistor é calculada por:

$$P_{NT} = R_L \overline{i_{NT}^2} \quad (2.4)$$

onde  $\overline{i_{NT}^2}$  é a média quadrática da corrente de ruído.

A corrente de ruído pode ser modelada pelo circuito equivalente abaixo (Figura 12), onde  $R_L$  é um resistor ideal, e quantificada pela equação 2.5:

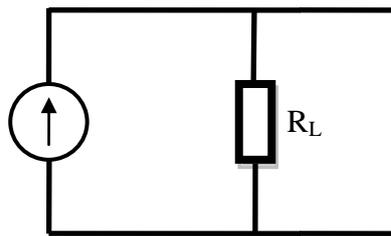


Figura 12 - Circuito equivalente do ruído térmico

$$\overline{i_{NT}^2} = \frac{4kT\Delta f}{R_L} \quad (2.5)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura absoluta medida em Kelvin e  $\Delta f$  é a largura de banda elétrica do circuito de recepção.

### 2.4.2. Ruído Shot

A natureza discreta dos fótons causa um distúrbio no sinal recebido chamado ruído *shot*. Cada portador de carga gerado pela incidência de fótons nos fotodetectores irá contribuir, na forma de um pulso, com sua parcela para a corrente total que atravessa o circuito. Em um

fotodiodo a vácuo, o pulso é caracterizado pelo tempo ( $\tau$ ) que o elétron é liberado do cátodo e atinge o anodo.

Considerando uma potência óptica constante, incidindo em um fotodetector, é de se esperar uma corrente fluindo pelo circuito, também, de maneira constante. Entretanto, essa corrente é formada pela soma dos pulsos gerados por cada portador de carga de forma discreta. Devido à característica aleatória da formação desses pequenos pulsos, o atraso relativo a geração de cada um deles não é uniforme provocando uma ligeira variação da corrente gerada em torno de um valor esperado. Essa variação é justamente o ruído shot e sua corrente ( $i_{NS}$ ) quantificada como:

$$\overline{i_{NS}^2} = 2eI\Delta f \quad (2.6)$$

onde  $I$  é a média da corrente no detector,  $\Delta f$  é a largura de banda no receptor e  $e$  é a carga do elétron.

Nos dispositivos semicondutores o ruído *shot* acontece por causa da geração e recombinação aleatória dos portadores de carga (elétrons livres e lacunas). A corrente gerada devido ao ruído *shot* e a corrente de escuro ( $i_D$ ) podem ser escritas como:

$$\overline{i_{NS}^2} = 2e(\bar{i}_s + i_D)\Delta f \quad (2.7)$$

onde  $\bar{i}_s$  é a média da corrente total.

Assim, determina-se a média da potência de ruído *shot* ( $\overline{P_{NS}}$ ) e ruído térmico como:

$$\overline{P_{NS}} = 2e\Delta f \left( \frac{\eta e P}{hf} + i_D \right) \quad (2.8)$$

$$\overline{P_{NT}} = 4kT\Delta f \quad (2.9)$$

## 2.5. **Rastreamento do Feixe Óptico nos Sistemas FSO**

O rastreamento do feixe óptico se tornou um tópico de bastante relevância para as comunicações ópticas no espaço livre. Isso é devido ao fato do FSO ser uma tecnologia de visada direta e que ao mesmo tempo está sujeito a eventos completamente aleatórios que fazem com que o sinal óptico degrade e até desapareça. Assim, um simples balançar das construções onde ficam instalados os equipamentos e alterações climáticas altera a direção do

feixe óptico. Manter o transmissor e o receptor alinhados não é uma tarefa muito simples de ser realizada. A medida que as distâncias dos sistemas aumentam, maior é a dificuldade encontrada em manter, por exemplo, um feixe estreito ( $\mu\text{rad}$ ), apontando para uma determinada direção e, conseqüentemente, sustentar o enlace de comunicação. Existe, então, uma relação direta entre divergência do feixe, tamanho do enlace e complexidade para conseguir um alinhamento do feixe a todo o instante.

Para aplicações de curta distância e taxas moderadas, pode-se utilizar um feixe óptico largo sem a necessidade de um sistema de rastreamento. Alguns equipamentos utilizam essa técnica e operam com ângulos de divergência entre 2-10 milliradianos (mrad) e, assim, obtem-se um diâmetro do feixe entre 2-10 metros, após um quilômetro de distância do enlace, não havendo necessidade de rastreamento.

Entretanto, quando são referidas taxas elevadas de transmissão para distâncias relativamente longas, é necessária uma confiabilidade no rastreamento do feixe e uma capacidade de se fazer isso de maneira automatizada. De tal modo, um sistema de rastreamento automatizado consiste em realinhar o sinal óptico a qualquer instante em que for preciso, seja por vibrações das edificações, seja devido à turbulência atmosférica, com o intuito de manter o nível de sinal no receptor satisfatório para a comunicação. Esse mecanismo pode ser dividido em duas partes. A primeira parte é que o receptor tem que ser capaz de rastrear o feixe e com isso determinar sua localização no espaço. A segunda é que o sistema tem que dispor de dispositivos mecânicos para movimentar as partes dos equipamentos de FSO, no sentido de conservar o alinhamento de acordo com os dados obtidos pela primeira parte. Será visto mais adiante que a técnica proposta para calcular a turbulência atmosférica também pode ser usada para rastrear o feixe óptico.

Em diversos equipamentos de FSO, vem embutido um sistema de rastreamento de feixe. Além disso, muitas patentes já foram publicadas com relação ao tema [17-18]. Geralmente os sistemas de rastreamento são compostos de detectores de quadrante, CCDs e PDS para realizar a tarefa destinada à primeira parte e, *gimbal*, *sterring mirros* e motores de passo para a segunda. Alguns equipamentos usam o próprio sinal de dados para realizar o rastreamento, mas também é bastante comum a utilização de um feixe óptico auxiliar, em outro comprimento de onda que não o usado para a comunicação, para monitorar o alinhamento

### 2.5.1. Gimbal

O gimbal (Figura 13.a) é um dispositivo mecânico em forma de anel e que pode ser montado de tal forma que, instalado nas cabeças do FSO (Figura 13.b), permite o movimento na horizontal e na vertical. Logo, quando o feixe desvia da sua direção o gimbal é acionado para realizar a correção.

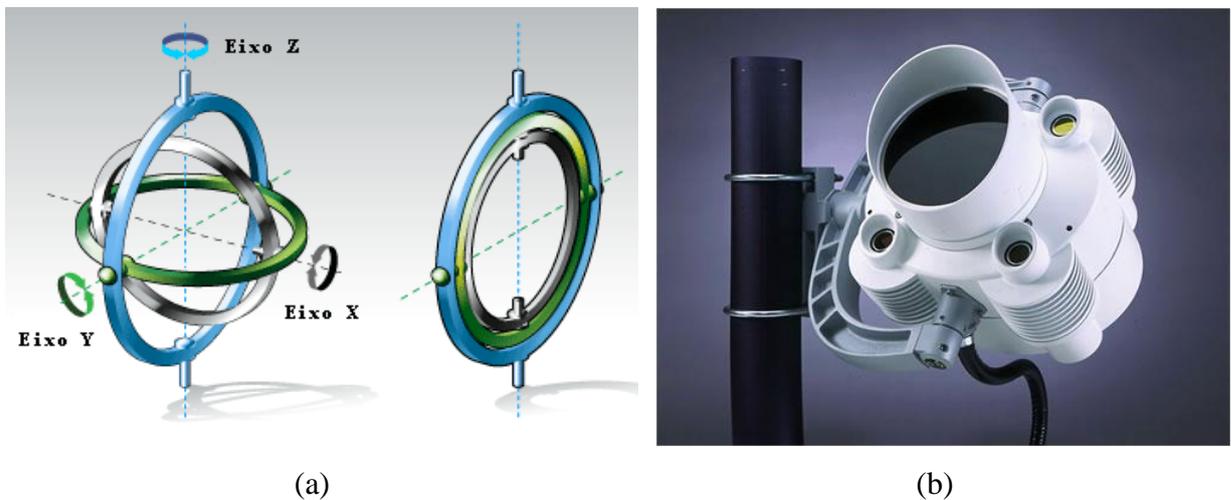


Figura 13 - Esquema de um gimbal que permite movimento vertical, horizontal e rotacional (a).  
Equipamento FSO da fSONA montado sob um gimbal.

### 2.5.2. Steering Mirror

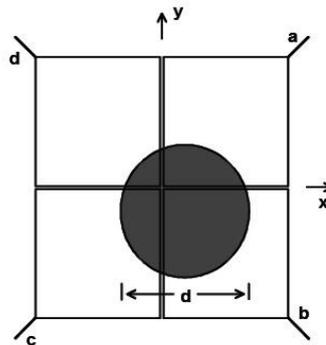
Uma desvantagem clara do uso do gimbal é que ele movimentava toda a cabeça do FSO. Isso significa que existe uma limitação da velocidade com que o realinhamento pode ser realizado. Ao contrário, o *steering mirror* consiste em um espelho montado sob uma plataforma que altera a sua direção através de motores instalados na base (Figura 14). Sendo o espelho uma peça de massa pequena em relação a toda a cabeça do FSO a sua movimentação é mais rápida e, conseqüentemente o rastreamento também.



**Figura 14 - Steering mirror utilizado em sistemas de comunicação óptica no espaço livre.**

### **2.5.3. Detector de Quadrante**

O detector de quadrante é feito de silício, sendo capaz de cobrir a faixa visível do espectro e do infravermelho próximo. É composto de quatro fotodetectores dispostos numa matriz 2x2 em que cada elemento coleta a luz separadamente (Figura 15). Se a luz incidir bem no centro do detector de quadrante, o sinal de saída de cada elemento da matriz será o mesmo. Movimentando a luz sob o detector os sinais de saída serão diferentes e, comparando-os, é possível determinar a posição do feixe.

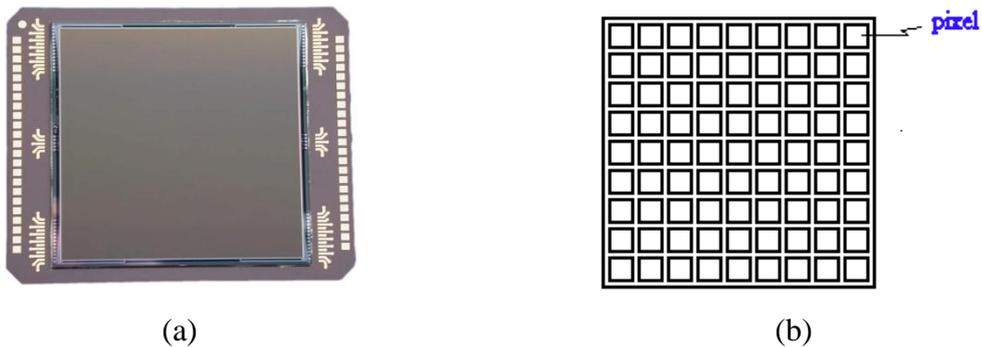


**Figura 15 - Incidência de um spot de luz num esquema de um detector de quadrante com seus fotodetectores dispostos na forma de uma matriz 2x2**

A vantagem desse tipo de dispositivo para rastrear o feixe é que a leitura dos sinais de saída de cada fotodetector é obtida quase imediatamente, permitindo um sistema de rastreamento relativamente rápido. Se o tamanho dos fotodetectores é pequeno, a resolução para determinação da posição do feixe é alta. Entretanto, a distância relativa entre os fotodetectores irá determinar o campo de operação do dispositivo. Com distâncias pequenas e assim um pequeno *spot* luminoso no plano do receptor, a variação de posição do feixe não pode ser elevada, pois, caso contrário, o feixe pode deixar de iluminar a matriz e o sistema de rastreamento perder o feixe por completo.

## 2.5.4. CCD

O CCD é um *chip* semiconductor (Figura 16.a). Pode-se considerar o CCD como um painel onde estão contidos vários elementos sensíveis à luz (diodos) chamados de *pixels* como na Figura 16.b. Ao incidir um feixe de luz no painel, cada diodo fica carregado com carga proporcional à potência óptica incidente permitindo determinar a sua posição.



**Figura 16 - CCD (a). Esquema do chip CCD e os respectivos diodos sensíveis a luz (b).**

Nos sistemas de FSO, o CCD é utilizado para localizar o feixe de luz e com isso acionar os dispositivos mecânicos, quando necessário, para realinhamento. A vantagem é que são encontrados no mercado CCDs de vários tamanhos, permitindo dispositivos com área de detecção maior que os detectores de quadrante. Porém, a leitura nesses dispositivos é feita através de registradores de deslocamento, fazendo com que, para se obter a posição do feixe, seja preciso ler todos os dados contidos no chip, mesmo que o feixe óptico esteja somente sobre uma fração do painel. Logo, quanto maior o CCD, mais lento é a obtenção dos dados.

### 3. Fatores de Degradação do Sinal

No projeto de um sistema de comunicação óptica por espaço livre, é indispensável saber a quantidade de potência óptica transmitida e a parte da luz que é perdida no canal de comunicação. Logo, consegue-se calcular a potência útil que chega ao receptor e, conhecida a sensibilidade na recepção, checar a viabilidade do enlace estudado para uma determinada taxa de transmissão. Obviamente, para operação do sistema, a potência óptica recebida tem que estar acima da potência mínima requerida pelo fotodetector.

Nos sistemas FSO, existe uma diferença em relação ao cálculo de balanço de potência em relação aos outros sistemas. Na óptica do espaço livre, alguns fatores que degradam e atenuam o sinal têm um caráter aleatório, diferentemente, por exemplo, dos enlaces ópticos de óptica confinada onde as perdas são determinísticas e não variam com grande intensidade no tempo. Justamente devido ao fato da comunicação ser feita através do ar, onde este meio varia suas características ao longo do tempo por causa das variações climáticas, dificultando o cálculo do balanço de potência. Então, é necessário a todo o sistema de FSO ter uma margem de segurança apropriada para operação devido a aleatoriedade das perdas.

As perguntas básicas que são feitas nesse momento do projeto são bastante simples. Qual a potência transmitida? Que fatores atenuam de um valor constante o sinal óptico? Que fatores degradam o sinal de forma aleatória? Com essa potência transmitida e descontadas as perdas, é possível conseguir comunicação para uma determinada distância, sensibilidade do fotodetector e taxa de transmissão?

#### 3.1. *Perda Óptica*

Os equipamentos de FSO são constituídos de lentes tanto na transmissão para colimar o feixe de saída, quanto na recepção para focalizar o sinal óptico num fotodetector e obter o máximo de luz. A luz sofre reflexão (Reflexão de Fresnel) ao atravessar a interface ar-vidro e vidro-ar atenuando o sinal transmitido.

Essa reflexão depende do índice de refração do ar ( $n_1$ ), do índice de refração do vidro ( $n_2$ ) que é utilizado na fabricação das lentes e do ângulo de incidência ( $\theta_i$ ), que é o ângulo medido entre o raio de luz que incide na lente e a normal à superfície de incidência (Figura 17), polarização.

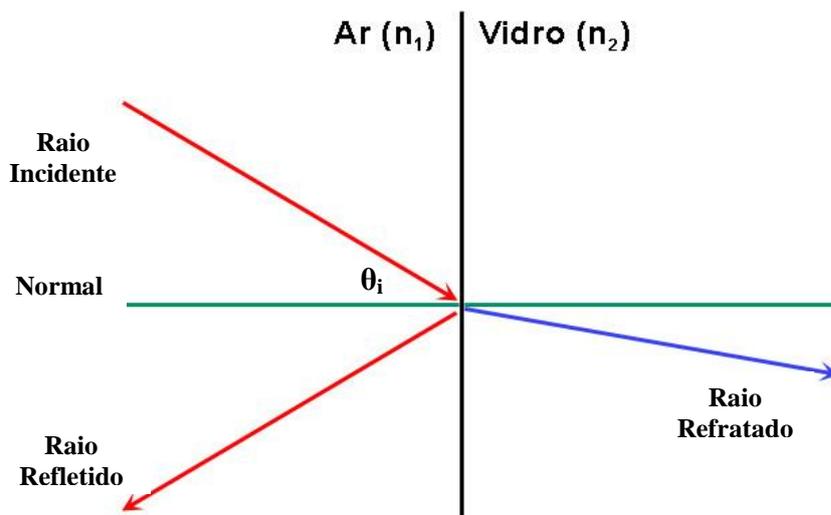


Figura 17 – Incidência de um raio de luz numa interface ar-vidro

Quando a incidência da luz se aproxima da normal ( $\theta_i=0$ ) o coeficiente de reflexão ( $R$ ) pode ser calculado [19], e independe da polarização.

$$R = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (3.1)$$

Assim, para a interface ar ( $n_1=1,0$ ) e vidro ( $n_2=1,5$ ) tem se uma perda devido à reflexão de 4%. Essa perda vai depender da qualidade do equipamento de cada fabricante, pois uma pequena alteração no tipo de vidro utilizado na fabricação das lentes irá alterar significativamente o índice de refração e, conseqüentemente, o coeficiente de reflexão.

### 3.2. **Perda por Espalhamento Geométrico**

A perda por espalhamento geométrico ocorre devido ao ângulo de divergência ( $\theta$ ) do feixe óptico. À medida que a distância ( $d$ ) entre o transmissor e o receptor aumenta, o *spot* de luz cresce de diâmetro ( $D$ ), aumentando a área iluminada ( $A_t$ ). Por conseguinte, o receptor só irá conseguir captar a luz que a sua área de detecção ( $A_d$ ) permite e, a outra parte, será perdida no espaço (Figura 18).

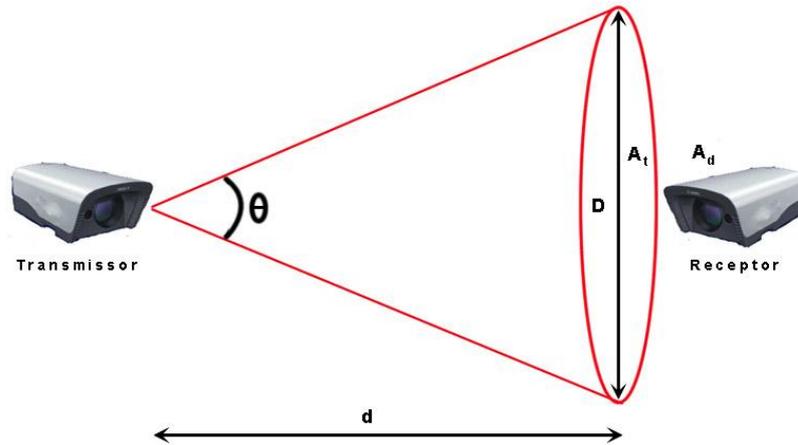


Figura 18 - Perda por espalhamento geométrico

Para calcular a perda por espalhamento geométrico usa-se a equação abaixo [20]:

$$L_{GEO} = \frac{A_d}{A_t + \frac{\pi}{4}(\theta d)^2} \quad (3.2)$$

### 3.3. *Espalhamento*

O espalhamento é a redistribuição da energia luminosa quando, ao atravessar a atmosfera terrestre, encontra em seu caminho moléculas de ar e partículas em suspensão. Assim, a intensidade de luz pode ser reduzida significando perda para o sistema. O tipo de espalhamento vai depender do tamanho dos obstáculos sob o qual a luz incide em relação ao comprimento de onda. Uma maneira de avaliar é, segundo a literatura, estabelecer uma conexão entre comprimento de onda ( $\lambda$ ) e tamanho da partícula ( $r$ ) [21]:

$$x_0 = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (3.3)$$

Para  $x_0 \ll 1$  o espalhamento é chamado de espalhamento Rayleigh e para  $x_0 \sim 1$  o espalhamento é chamado espalhamento Mie. Caso contrário, para  $x_0 \gg 1$  o espalhamento pode ser analisado usando óptica geométrica.

### 3.3.1. Espalhamento Rayleigh

A luz, ao se chocar com uma partícula em suspensão na atmosfera, induz à formação de dipolos que oscilam na mesma frequência da luz incidente. Com isso, os elétrons oscilantes re-irradiam a luz de maneira espalhada como pode ser visto na Figura 19.

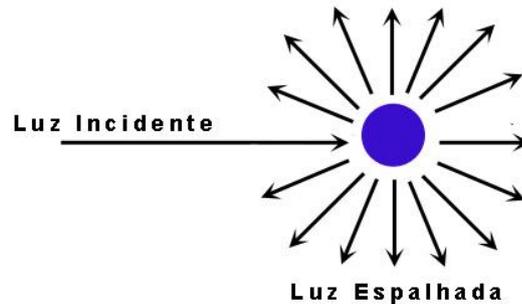


Figura 19 - Redistribuição da luz devido ao espalhamento Rayleigh

O coeficiente do espalhamento Rayleigh ( $\sigma_m$ ) pode ser calculado como [21]:

$$\sigma_m = \frac{0,827NA^3}{\lambda^4} \quad (3.4)$$

onde, N é a quantidade de moléculas por unidade de volume e A é a área de secção transversal do espalhamento. Observa-se que pelo fator  $\lambda^{-4}$  chega-se à conclusão de que comprimentos de onda pequenos sofrem maior espalhamento do que comprimentos de onda grandes. Assim, a perda de sinais que operam em comprimentos de onda maiores que 800nm é desconsiderada no cálculo do balanço de potência desse tipo de espalhamento. Como a maioria dos sistemas de FSO opera em frequências perto do infravermelho, a influência do espalhamento Rayleigh pode ser negligenciada.

### 3.3.2. Espalhamento Mie

O espalhamento Mie é descrito a partir das equações de Maxwell [21]. A teoria é baseada na perturbação que ocorre, quando uma onda eletromagnética incide em partículas homogêneas e esféricas em suspensão na atmosfera. O espalhamento passa a ser considerado nos cálculos de atenuação, quando os tamanhos das partículas são da ordem de grandeza do comprimento de onda da radiação eletromagnética incidente. No infravermelho, o maior

causador da deterioração do sinal devido ao espalhamento Mie é a presença de neblina seguida da poluição devido às partículas possuírem tamanho considerável.

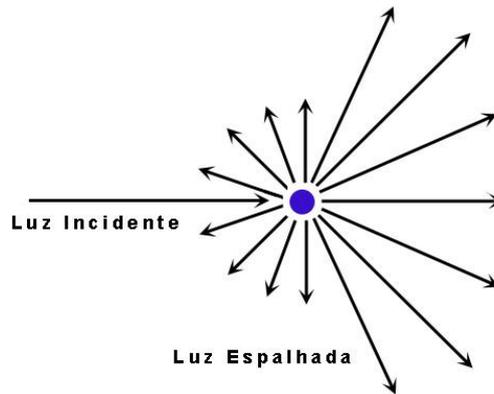


Figura 20 - Redistribuição da luz devido ao espalhamento Mie

O coeficiente do espalhamento Mie ( $\sigma_a$ ) pode ser calculado pela seguinte expressão [21]:

$$\sigma_a = \sum_i \pi n_i Q_i r_i^2 \quad (3.5)$$

onde,  $n_i$  é a concentração da partícula,  $r_i$  é o raio da partícula e  $Q_i$  é a eficiência do espalhamento da partícula.

### 3.4. Absorção Atmosférica

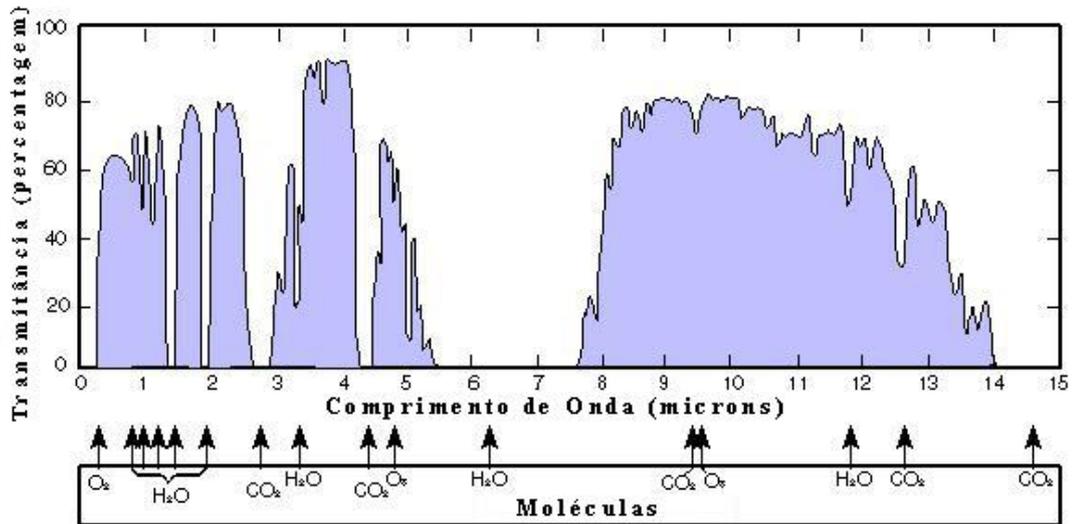
A Terra é cercada de gases que compõem a atmosfera terrestre. A absorção atmosférica acontece, quando as moléculas e partículas absorvem os fótons da luz que por elas atravessam. Essa energia absorvida é transformada em outro tipo de energia, na maioria dos casos em energia térmica. O coeficiente de absorção ( $\alpha$ ) pode ser calculado [22]:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a \quad (3.6)$$

onde,  $k$  é o coeficiente de extinção,  $\sigma_a$  é a capacidade de absorção da partícula e  $N_a$  é a concentração das partículas que absorvem a luz.

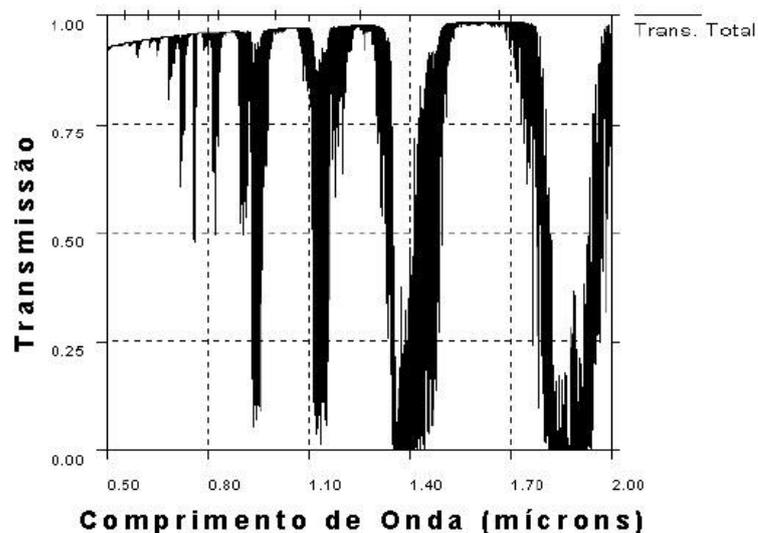
Para os sistemas de FSO, as partículas que mais influenciam na absorção são: vapor de água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e ozônio ( $O_3$ ). Como existe uma relação entre a capacidade de absorção de cada partícula e o comprimento de onda da luz que se propaga pela

atmosfera, é de se esperar que, assim como nas fibras, existam regiões do espectro eletromagnético no qual a luz irá sofrer uma menor atenuação devido à absorção. Uma curva das janelas de transmissão atmosférica típica pode ser visualizada na Figura 21, com as respectivas partículas que mais influenciam a absorção em cada comprimento de onda [6].



**Figura 21 - Transmitância atmosférica medida no nível do mar através de um caminho horizontal de 1820m [22]**

Além disso, através de um programa de computador, chamado de MODTRAN [7], é possível simular curvas do espectro de transmissão com base em dados reais. Por exemplo, a Figura 22 é o espectro de transmissão para o enlace FSO de 400 metros, sem precipitação, clima subártico, visibilidade de 23 quilômetros, altitude de 20 metros e concentração de partículas absorventes padrão [7].



**Figura 22 – Janelas de transmissão da atmosfera terrestre simulada por software (MODTRAN).**

### 3.5. Turbulência Atmosférica

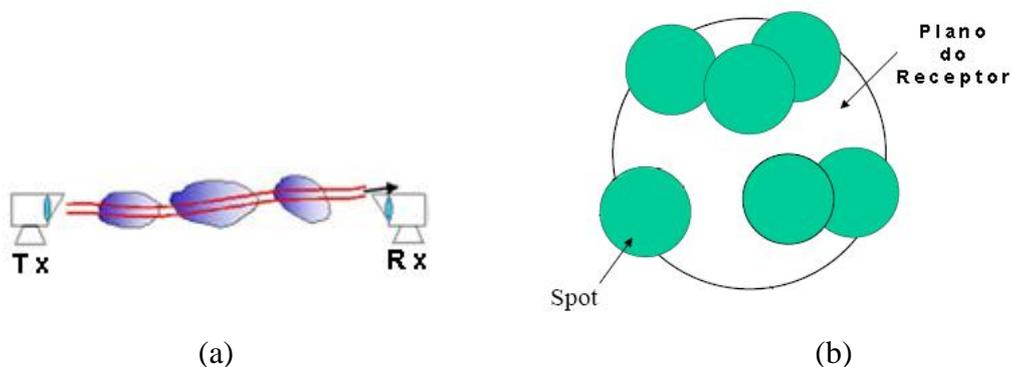
A turbulência atmosférica é provocada pelo aquecimento da superfície da Terra que faz com que o ar que esteja próximo a ela também se aqueça. O aquecimento do ar altera o índice de refração do mesmo. Assim, essas moléculas de ar aquecidas se deslocam para cima se misturando com moléculas de ar a uma temperatura mais baixa, tornando o meio heterogêneo ou turbulento. Logo, a luz, ao se propagar nesse meio turbulento, sofre variações nas características de propagação, tais como: alteração da distribuição de potência, direção de propagação e a variação da fase do campo elétrico a todo instante. Observam-se com isso três tipos de efeitos, devido à turbulência no receptor dos enlaces de FSO: cintilação, divagação e abertura do feixe.

#### 3.5.1. Divagação do Feixe

A divagação do feixe, do inglês *Beam Wander*, ocorre quando a luz, ao se propagar pela atmosfera, encontra obstáculos (células) maiores ou iguais a ordem de grandeza do diâmetro ( $W$ ) do feixe ( $L_0$  – escala externa) [19].

$$\frac{W}{L_0} \gg 1$$

Conseqüentemente, o raio é defletido ao longo do percurso fazendo com que no plano do receptor exista uma variação de posição do *spot* luminoso (Figura 23).



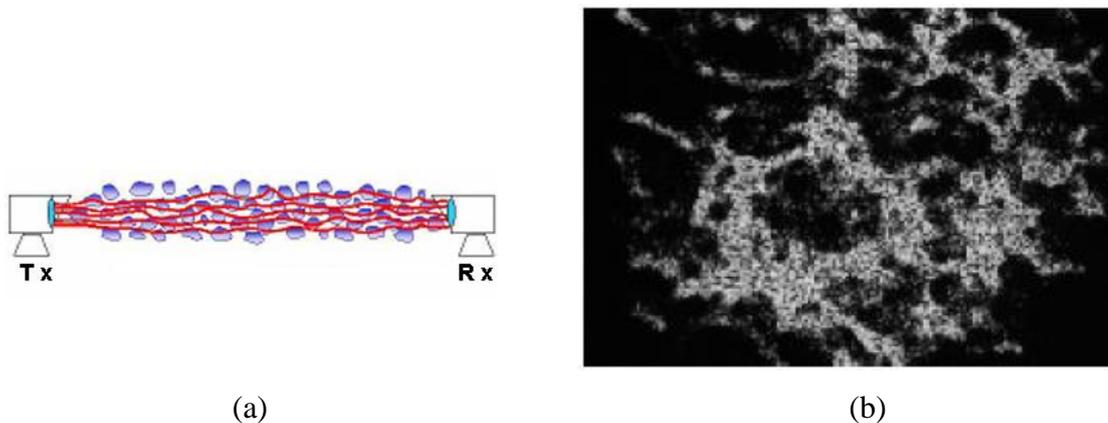
**Figura 23- Efeito da Divagação do Feixe devido a turbulência atmosférica por causa da presença de células de tamanho relativamente grande (a). A conseqüência é a variação de posição do spot luminoso no plano do receptor.**

### 3.5.2. Cintilação

A cintilação acontece quando a luz, ao se propagar pela atmosfera, encontra obstáculos relativamente menores do que a ordem de grandeza do diâmetro do feixe ( $l_0$  – escala interna):

$$\frac{W}{l_0} \ll 1$$

Isso ocasiona interferências aleatórias na frente de onda. Essa interferência pode causar no receptor a saturação ou extinção completa do sinal. Além disso, pode provocar “manchas” na frente de onda no plano do receptor como pode ser visto na Figura 24.



**Figura 24 - Efeito da Cintilação devido à turbulência atmosférica, por causa da presença de células de tamanho relativamente pequeno (a). Distribuição espacial de um feixe de luz depois de 1 quilômetro atravessando a atmosfera terrestre com grau de turbulência fraca.**

### 3.5.3. Alargamento do Feixe

O feixe luminoso, ao chegar ao receptor, pode ter o tamanho do *spot* caracterizado pelo raio efetivo. Esse raio é a distância do ponto de maior intensidade até o ponto em que a potência diminui de um fator de  $1/e$ . Em uma atmosfera perfeita, sem turbulência atmosférica, o raio efetivo não se altera e o tamanho do *spot* é constante e dependente somente da distância do enlace e da divergência do feixe. Na atmosfera real, isso não acontece, pois, devido à turbulência atmosférica, o raio efetivo varia a todo instante.

O alargamento do feixe consiste na variação do raio efetivo devido à turbulência atmosférica. Assim, devido a oscilações completamente aleatórias do canal de comunicação, a luz pode ter o raio aumentado, provocando uma queda de intensidade nos fotodetectores nos sistemas de recepção, já que a densidade de potência diminui com o aumento da área efetiva.

### **3.6. *Variações Climáticas***

Outro fator de extrema importância que deve ser considerado no momento da instalação de um sistema FSO é a condição climática da região. O motivo para tal preocupação é que chuva, neblina e neve podem atenuar o sinal em até 271,65dB/km e, conseqüentemente, inviabilizar o uso da tecnologia em questão [14].

A gota de chuva tem diâmetro grande (200-2000 $\mu$ m), quando comparado com o comprimento de onda das fontes de luz utilizadas nos sistemas FSO. Logo, o impacto da chuva nos enlaces não chega a ser tão crítico a ponto de inviabilizar os projetos. Por exemplo, uma chuva de, aproximadamente, 11mm/hora atenua o sinal de 9,0dB/km nos sistemas que operam no comprimento de onda de 780nm [23]. Uma grande vantagem para as comunicações ópticas no espaço livre, pois comunicações em rádio frequência, operando na faixa de 10GHz, são fortemente atenuadas pelo fato do comprimento de onda ser da ordem de grandeza do tamanho da gota de chuva.

A neve tem flocos bem maiores que a gota de chuva e uma variedade de formatos impressionante. Entretanto, a atenuação é um pouco maior que a atenuação provocada pela chuva e menor do que a causada por neblina. O que ocorre ao cair da neve é um espalhamento geométrico do sinal, mas que também é muito fraco devido ao tamanho do comprimento de onda [14].

A neblina é o fator que mais degrada os sistemas FSO e até impossibilita o seu uso por ser constituída de pequenas partículas de água de tamanho comparável aos comprimentos de onda no infravermelho. A neblina é diretamente relacionada com a visibilidade, ou seja, caracteriza-se o grau de neblina de acordo com a distância em que se consegue ver a linha do horizonte. Quanto menor é a distância que se enxerga o horizonte, maior o grau de neblina. Existe um padrão internacional relacionando a visibilidade com a intensidade de neblina [14]; como mostra a Tabela 4.

Condição do Tempo	Visibilidade	Perda (dB/km)	Alcance (Margem 20dB)
Neblina Densa	0m-5m	271,65	122m
Neblina Grossa	200m	59,57	490m
Neblina Moderada	500m	20,99	1087m
Neblina Fraca	770m	12,65	1565m
	1,0km	9,26	1493m
Neblina Fina	1,9km	4,22	3238m
	2,0km	3,96	3369m
Nevoeiro	2,8km	2,58	4331m
	4km	1,62	5566m
Nevoeiro Fraco	5,9km	0,96	7146m
	10km	0,44	9670m
Limpo	18,1km	0,24	11468m
	20km	0,22	11743m
Muito Limpo	23km	0,19	12112m
	50km	0,06	13771m

Tabela 1 – Padrão Internacional de relação entre condições climáticas e visibilidade

Medidas de atenuação para mostrar a relação de neblina com a deterioração do sinal já foram realizadas [23], conforme ilustrado na Figura 29.

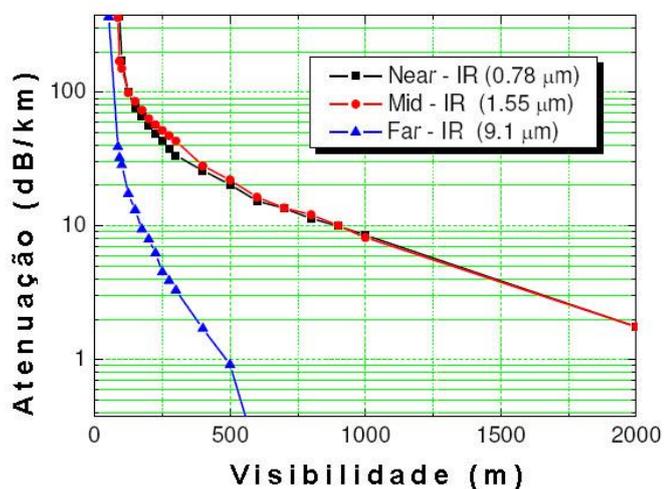


Figura 25 - Atenuação em dB/km devido à visibilidade em três comprimentos de onda diferentes.

## 4. Turbulência Atmosférica: Divagação do Feixe

A luz, ao atravessar o ar, um meio aleatório, sofre alguns efeitos que levam à degradação do sinal óptico. Esses efeitos, devido à aleatoriedade do meio, acabam limitando os sistemas em FSO na distância e na taxa de transmissão. A aleatoriedade é caracterizada por flutuações do índice de refração que ocorrem entre o transmissor e o receptor do sistema, ocasionando efeitos de: alargamento do feixe, divagação do centro do feixe, perda de coerência espacial e flutuações na irradiação e na fase (cintilação) do sinal óptico.

Historicamente, os efeitos citados eram estudados considerando um comportamento semelhante ao das ondas planas e esféricas. Esses modelos são bastante úteis para explicar determinados efeitos a que a luz é submetida, ao se propagar em um meio turbulento. Entretanto, pelo fato das ondas planas e esféricas terem extensão infinita, o método não é adequado para descrever feixes de luz emitidos por *lasers*, pois esses são finitos e podem ser extremamente colimados.

Nesse capítulo, serão apresentados os aspectos teóricos que servirão de base para a realização e entendimento do experimento que é descrito no Capítulo 5. Sendo assim, nesse capítulo será apresentada a constante de estrutura de índice de refração, que é utilizada para medir o grau de flutuação do índice de refração e, conseqüentemente, a turbulência atmosférica, a equação da onda e sua solução considerando um feixe de luz com distribuição gaussiana. Ao final, descreve-se de forma detalhada o efeito de divagação do feixe que é fundamental para a compreensão da nova técnica para se medir a turbulência.

### 4.1. **Constante de Estrutura para Índice de Refração**

Um dos parâmetros mais importantes para quantificar a turbulência atmosférica, quando se trata da propagação de feixes ópticos no espaço livre, são as flutuações do índice de refração do meio. Pode-se relacionar e quantificar os fenômenos de cintilação, divagação do feixe e o alargamento do feixe com as variações que ocorrem no índice de refração da atmosfera, ao longo da propagação. Devido ao forte grau de sensibilidade que existe entre índice de refração e a temperatura atmosférica, espera-se que uma ligeira flutuação de temperatura do ar provoque uma variação considerável no índice de refração do meio, prejudicando a propagação do sinal óptico.

Com isso, em um ponto  $\mathbf{R}$  no espaço e num determinado instante  $t$  têm-se um índice de refração que pode ser expresso como [24]:

$$\mathbf{n}(\mathbf{R}, t) = \mathbf{n}_0 + \mathbf{n}_1(\mathbf{R}, t) \quad (4.1)$$

onde  $n_0 = \langle n(\mathbf{R}, t) \rangle \cong 1$  é a média do índice de refração do meio e  $n_1(\mathbf{R}, t)$  representa o desvio aleatório que  $n(\mathbf{R}, t)$  sofre, ao longo do tempo, a cada instante em torno da média, sendo  $\langle n_1(\mathbf{R}, t) \rangle = 0$ . A variação temporal do índice de refração é descartada, quando se trata de propagação óptica [24]. Assim, pode-se reescrever a variação do índice de refração como:

$$\mathbf{n}(\mathbf{R}) = \mathbf{1} + \mathbf{n}_1(\mathbf{R}) \quad (4.2)$$

onde  $n(\mathbf{R})$  está normalizado.

Em particular, o índice de refração da atmosfera pode ser escrito para comprimentos de onda no infravermelho de acordo com [24]:

$$\mathbf{n}(\mathbf{R}) \cong \mathbf{1} + \mathbf{79} \times \mathbf{10}^{-6} \frac{P(\mathbf{R})}{T(\mathbf{R})} \quad (4.3)$$

onde  $P$  é a pressão em millibars e  $T$  a temperatura absoluta em kelvin.

Como a média do índice de refração  $n_1$  é igual a zero ( $\langle n_1(\mathbf{R}) \rangle = 0$ ), então a função de covariância ( $B_n$ ) de  $n(\mathbf{R})$  pode ser expressa como [24]:

$$B_n(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2) = B_n(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}) = \langle \mathbf{n}_1(\mathbf{R}_1) \mathbf{n}_1(\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}) \rangle \quad (4.4)$$

Além disso, a flutuação do índice de refração é estatisticamente homogênea. Sendo o campo homogêneo e isotrópico, a função de covariância é uma função somente da distância escalar entre dois pontos ( $R = |\mathbf{R}_1 - \mathbf{R}_2|^2$ ) e a função de estrutura ( $D_n$ ) pode ser escrita como:

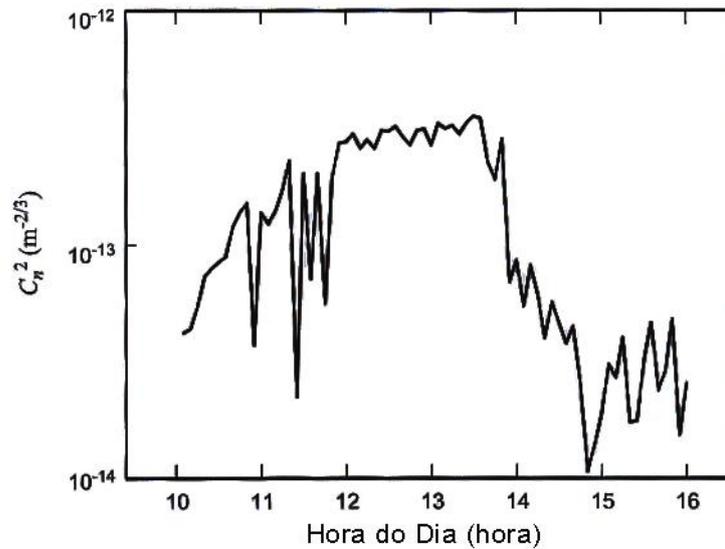
$$D_n(R) = 2[B_n(0) - B_n(R)] = \begin{cases} C_n^2 l_0^{\frac{4}{3}} R^2, & 0 \leq R \ll l_0 \\ C_n^2 R^2, & l_0 \leq R \ll L_0 \end{cases} \quad (4.5)$$

onde  $C_n^2$  é a constante de estrutura para o índice de refração. Importante é salientar que  $l_0$  (escala interna) e  $L_0$  (escala externa) estão relacionados aos tamanhos relativos das irregularidades que o feixe óptico encontra em suspensão na atmosfera.

A constante de estrutura para o índice de refração indica, fisicamente, o quão intenso é a flutuação do índice de refração. A constante de estrutura para o índice de refração, também, pode ser determinada através do conhecimento da constante de estrutura da temperatura [25]:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2}\right)^2 C_T^2 \quad (4.6)$$

Existe um equipamento chamado de cintilômetro que realiza a medida da turbulência atmosférica, através de medidas de  $C_n^2$  e resultados obtidos pelo dispositivo podem ser visualizados como o exemplo da Figura 26 [26].



**Figura 26 – Gráfico da variação da constante de estrutura para o índice de refração ao longo do dia medido na Flórida em um enlace de 150 metros a 1,5 metros de altura.**

Denomina-se turbulência fraca valores de  $C_n^2$  iguais ou menores que  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  e acima como turbulência forte. Do gráfico, durante o meio dia, quando a intensidade do sol é maior e, conseqüentemente, tem-se uma maior temperatura, observa-se um grau de turbulência considerada forte, o que não ocorre no amanhecer e anoitecer do dia, quando as temperaturas são amenas.

## 4.2. ***Equação Paraxial da Onda***

Uma onda é um campo ( $e(R,t)$ ) que varia no tempo ( $t$ ) e no espaço  $R(x,y,z)$  e que satisfaz a uma equação diferencial. No caso deste trabalho, o campo é eletromagnético e a sua variação no tempo e espaço resulta em ondas eletromagnéticas. A equação da onda pode ser expressa como:

$$\nabla^2 e = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (4.7)$$

onde  $c$  é a velocidade da onda propagante e  $\nabla^2$  é o operador Laplaciano que é definido em coordenadas cartesianas como:

$$\nabla^2 e = \frac{\partial^2 e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} \quad (4.8)$$

Em eletromagnetismo, a velocidade da onda propagante é a velocidade da luz que é igual a  $3 \times 10^8$  m/s. Considerando-se a variação de campo no tempo de maneira senoidal na forma  $u(\mathbf{R}, t) = E_0(\mathbf{R})e^{-j\omega t}$ , onde  $\omega$  é a frequência angular,  $E_0(\mathbf{R})$  é a amplitude complexa da onda e substituindo-se na equação 4.8 pode-se chegar a uma equação da onda simplificada e independente do tempo chamada de Equação de Helmholtz:

$$\nabla^2 E_0 + k^2 E_0 = 0 \quad (4.9)$$

onde  $k$  é o número de onda óptico que está relacionado com o comprimento de onda  $k = 2\pi/\lambda$ .

Para feixes ópticos, pode-se reduzir a equação de Helmholtz e chegar a uma nova formulação chamada de equação de onda paraxial. Para isso, considera-se que o feixe de luz inicia sua propagação no plano  $z=0$  e continua para valores positivos do eixo. Além disso, assume-se que o campo óptico em qualquer ponto da trajetória é rotacionalmente simétrico. Devido à simetria, é interessante a utilização do Laplaciano em coordenadas cilíndricas e expressar o campo em função de  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  e  $z$ :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E_0}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 E_0}{\partial z^2} + k^2 E_0 = 0 \quad (4.10)$$

Para simplificar  $E_0(r, z) = V(r, z)e^{jkz}$ :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} + 2jk \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (4.11)$$

### 4.3. Aproximação Paraxial

A aproximação paraxial é devido ao fato de que a distância entre os pontos de transmissão e recepção dos sistemas FSO é muito maior do que o espalhamento transversal da onda. Na Figura 27, é possível verificar dois pontos no espaço  $R(r, z)$  e  $S(s, 0)$  com  $\mathbf{r}$  e  $\mathbf{s}$  transversais ao eixo de propagação.

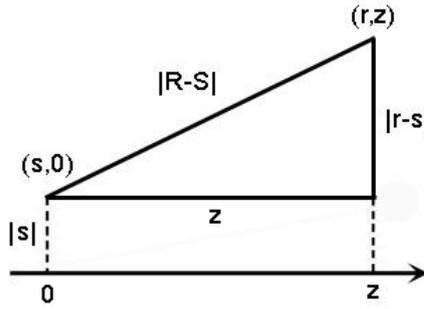


Figura 27 - Geometria para determinação da aproximação paraxial

Assim, a distância entre os pontos é:

$$|\mathbf{R} - \mathbf{S}| = (z^2 + |\mathbf{r} - \mathbf{s}|^2)^{\frac{1}{2}} = z \left( 1 + \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{s}|^2}{2z^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

Expande-se a equação 4.12 em uma série binomial e assumindo que a distância transversal é muito menor que a propagação horizontal do feixe ( $|\mathbf{r} - \mathbf{s}| \ll z$ ) tem-se:

$$\left| \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right| \ll \left| 2k \frac{\partial V}{\partial z} \right|, \quad \left| \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right| \ll \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) \quad (4.13)$$

Isso ocorre porque o efeito de difração acontece muito lentamente, a medida que a distância no eixo  $z$  aumenta e também por causa do espalhamento transversal devido ao tamanho finito do feixe. Sendo assim,  $\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$  e a equação paraxial da onda é definida como:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + 2jk \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (4.14)$$

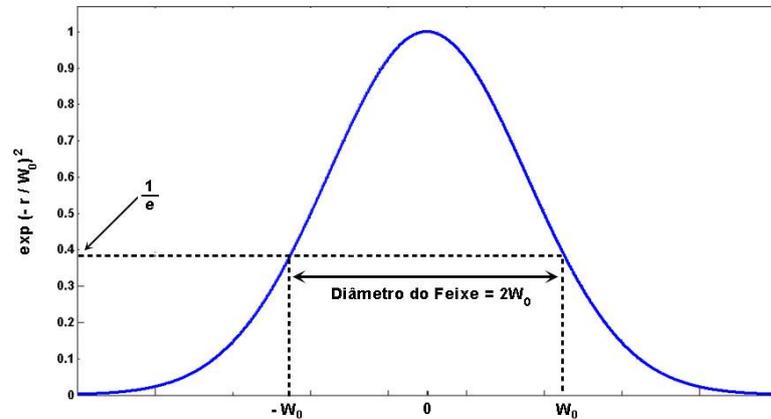
#### 4.4. **Feixe Gaussiano e Equação Paraxial da Onda**

Para continuar os estudos de turbulência atmosférica e entender de forma clara o experimento que foi realizado, no intuito de caracterizar a constante de estrutura para índice de refração, necessita-se definir as características do sinal óptico que se propaga pela atmosfera terrestre e resolver a equação paraxial da onda para este sinal. Assim, considera-se um feixe transversal eletromagnético Gaussiano ( $TEM_{00}$ ) com amplitude  $a_0$ :

$$\mathbf{E}_0(\mathbf{r}, 0) = a_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2} - \frac{jk r^2}{2F_0}\right) = a_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \alpha_0 k r^2\right) \quad (4.15)$$

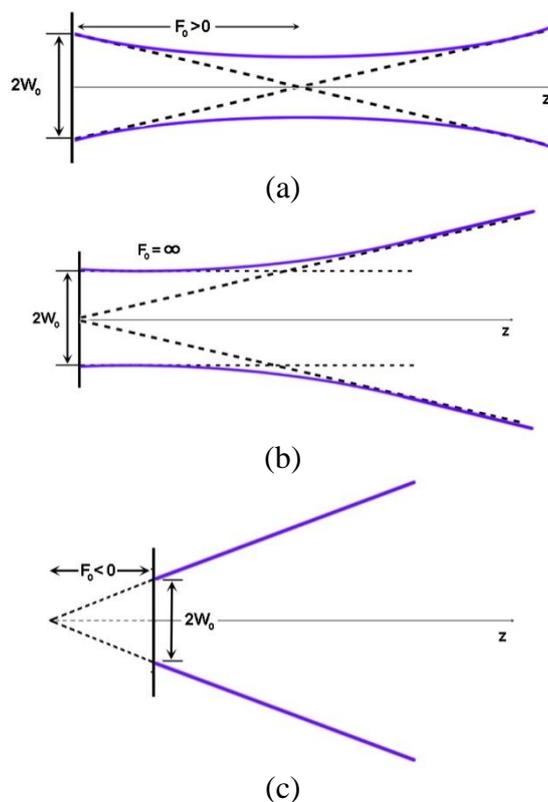
onde  $F_0$  é o comprimento da região cofocal,  $r$  é a distância radial a partir do centro do feixe, a abertura de transmissão fica no plano  $z = 0$ , a distribuição de intensidade no plano  $z = 0$  é

gaussiana e o raio efetivo do spot igual  $W_0$ , em que  $W_0$  é caracterizado pela distância do ponto de maior intensidade, até onde a amplitude do campo cai de  $1/e$  (Figura 28).



**Figura 28 - Perfil do feixe de luz Gaussiano.**

O comprimento da região confocal é parabólico com raio de curvatura  $F_0$ . Particularizando, tem-se  $F_0 = \infty$ ,  $F_0 > 0$  e  $F_0 < 0$  que corresponde, respectivamente, a um feixe colimado, convergente e divergente (Figura 29).



**Figura 29 - (a) Feixe Gaussiano convergente, (b) feixe colimado, (c) feixe divergente.**

O parâmetro  $\alpha_0$  relaciona o tamanho do spot e a *phase front*:

$$\alpha_0 = \frac{2}{kW_0^2} + j\frac{1}{F_0} \quad (4.16)$$

Analisando as equações acima, é possível identificar a amplitude ( $A_0$ ) e a fase ( $\varphi_0$ ) de um feixe gaussiano:

$$A_0 = a_0 \exp\left(-\frac{r^2}{W_0^2}\right) \quad (4.17)$$

$$\varphi_0 = -\frac{kr^2}{2F_0} \quad (4.18)$$

Resolvendo a Equação 4.14 para um feixe gaussiano (Equação 4.15), tem-se a seguinte equação da onda:

$$E_0(r, z) = V(r, z)e^{jkz} = \frac{1}{1+j\alpha_0 z} \exp\left[jkz + \frac{jk}{2z}\left(\frac{j\alpha_0 z}{1+j\alpha_0 z}\right)r^2\right] \quad (4.19)$$

#### 4.5. *Parâmetros de Entrada das Ondas Eletromagnéticas Gaussianas*

Nesta seção serão apresentados alguns parâmetros necessários para compreensão do efeito de turbulência atmosférica da divagação do feixe, que será analisado na seção 4.6 deste capítulo. Considera-se a propagação no espaço livre de um feixe gaussiano em linha de visada entre o transmissor e o receptor, em que o transmissor está localizado em  $z = 0$  e o receptor em algum ponto para  $z > 0$ .

Antes disso, observando a solução da equação da onda (Equação 4.19) na seção anterior, define o parâmetro de propagação como sendo [24]:

$$p(z) = 1 + j\alpha_0 z = \theta_0 + j\Lambda_0 \quad (4.20)$$

onde  $\theta_0$  e  $\Lambda_0$  são a parte real e imaginária definida por:

$$\theta_0 = 1 - \frac{z}{F_0} \quad (4.21)$$

$$\Lambda_0 = \frac{2z}{kW_0^2} \quad (4.22)$$

Ainda, analisando a solução da equação da onda pode-se escrever:

$$p(z) = \sqrt{\theta_0^2 + \Lambda_0^2} \exp\left(j \tan^{-1} \frac{\Lambda_0}{\theta_0}\right) \quad (4.23)$$

Conseqüentemente, a equação da onda pode ser agora representada por:

$$E_0(r, z) = \frac{1}{\sqrt{\theta_0^2 + \Lambda_0^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2}\right) \exp\left[j\left(kz - \varphi - \frac{kr^2}{2F}\right)\right] \quad (4.24)$$

onde  $\varphi$ ,  $W$  e  $F$  são o deslocamento longitudinal de fase, o raio do *spot* luminoso e o raio de curvatura em uma posição  $z$  qualquer do espaço ao longo da propagação, respectivamente. Essas grandezas podem ser escritas em função dos parâmetros do feixe:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\Lambda_0}{\theta_0} \quad (4.25)$$

$$W = W_0 \sqrt{\theta_0^2 + \Lambda_0^2} \quad (4.26)$$

$$F = \frac{kW_0^2}{2} \left[ \frac{\Lambda_0(\theta_0^2 + \Lambda_0^2)}{\theta_0(1 - \theta_0) - \Lambda_0^2} \right] = \frac{F_0(\theta_0^2 + \Lambda_0^2)(\theta_0 - 1)}{\theta_0^2 + \Lambda_0^2 - \theta_0} \quad (4.27)$$

Assim, no plano do transmissor,  $\theta_0$  e  $\Lambda_0$ , são chamados de parâmetros de entrada do feixe gaussiano. O  $\theta_0$  é chamado de parâmetro de curvatura e  $\Lambda_0$  de taxa de Fresnel. Para um caminho  $z = L$  e raio de curvatura  $F_0$ , o parâmetro de curvatura nos mostra a característica do feixe: colimado ( $\theta_0 = 1$ ), convergente ( $\theta_0 < 1$ ) e divergente ( $\theta_0 > 1$ ).

Analisando a Equação 4.24, que é a solução da equação da onda com aproximação paraxial, observa-se que os parâmetros de entrada caracterizam a refração (foco) e a difração do feixe. Em particular, após a propagação do feixe de uma distância  $z$ , tem-se uma amplitude:

$$A = \frac{1}{\sqrt{\underbrace{\left(\frac{1-z}{F_0}\right)^2}_{\text{refração}} + \underbrace{\left(\frac{2z}{kW_0^2}\right)^2}_{\text{difração}}}} = \frac{1}{\sqrt{\theta_0^2 + \Lambda_0^2}} \quad (4.28)$$

Para um feixe gaussiano, o deslocamento longitudinal da fase ( $\varphi$ ) varia de 0 até  $\pi$  e o efeito de difração faz com que o raio do *spot* aumente, à medida que o caminho de propagação vai para infinito. Quando o feixe é convergente, o raio do *spot* inicialmente

diminui e a partir de uma dada região o raio começa a crescer como pode ser visto na Figura 29.

A irradiação ou intensidade de um feixe óptico é igual ao quadrado da magnitude do campo. Assim, a irradiação causada pelo transmissor é:

$$I^0(\mathbf{r}, z) = |E_0(\mathbf{r}, z)|^2 \quad (4.29)$$

Assim,

$$I^0(\mathbf{0}, z) = \frac{1}{\theta_0^2 + \lambda_0^2} \quad (4.30)$$

E a potência total no receptor sem considerar as perdas é:

$$P = \iint_{-\infty}^{+\infty} I^0(\mathbf{r}, 0) d^2\mathbf{r} = \iint_{-\infty}^{+\infty} I^0(\mathbf{r}, z) d^2\mathbf{r} = \frac{1}{2} W_0^2 \quad (4.31)$$

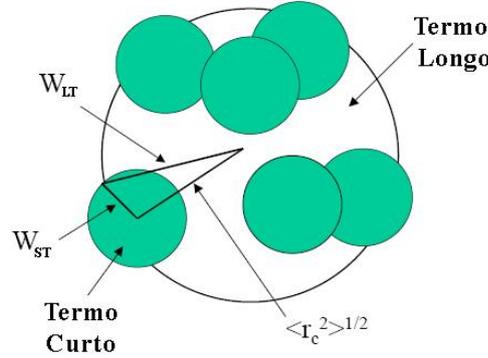
#### 4.6. **Divagação do Feixe**

Um feixe óptico finito, ao atravessar um meio turbulento, irá defletir ao longo da sua propagação, causando no plano do receptor, um deslocamento do *spot* luminoso. Como já citado anteriormente, a esse deslocamento dá-se o nome de *Beam Wander*, que do inglês, significa Divagação do Feixe. O fenômeno, também chamado de dança da imagem, é provocado quando a luz, ao percorrer a atmosfera, se depara com irregularidades da ordem de grandeza do diâmetro do *spot* luminoso ( $L_0$ ), como visto na Figura 23 do Capítulo 3. Esse movimento do spot é caracterizado pela movimentação do ponto de maior intensidade e se tratando de um feixe gaussiano, a divagação do feixe é caracterizada pelo deslocamento do centro da gaussiana (Figura 30). Mede-se esse efeito de maneira estatística pela variância da distância do centro do feixe ao centro de um sistema de eixos coordenados. A divagação do feixe pode ser minimizada utilizando receptores capazes de rastrear o feixe.

##### 4.6.1. **Modelagem Matemática da Divagação do Feixe**

A divagação do feixe pode ser modelada como se fosse uma variação angular aleatória do transmissor. Mais especificadamente é como se o transmissor estivesse sobre um *gimbal* e se movimentasse aleatoriamente no tempo. Esse movimento ou passeio do feixe pode ser

dividido em dois termos: termo longo (LT) e termo curto (ST). O termo curto é a região escura da Figura 30, e o termo longo é a região em branco.



**Figura 30 - A divagação do feixe definida como o movimento LT do spot delimitada pela região circular em branco**

Para determinar uma expressão analítica da variância da divagação do feixe, utiliza-se o termo longo do *spot* luminoso que pode ser escrito [24]:

$$W_{LT}^2 = W^2 T_{LS} = W^2 \left( 1 + 1,33 \sigma_R^2 A_0^5 \right) \quad (4.32)$$

onde  $T_{LS}$  descreve as modificações da média da irradiação no plano do receptor devido à turbulência atmosférica, mais especificadamente a divagação do feixe, e  $\sigma_R^2$  é a variância de Rytov. Com isso, a variância radial do centro do feixe no plano do receptor ( $z = L$ ) [24]:

$$\langle r_c^2 \rangle = W^2 T_{LS} = 4\pi^2 k^2 W^2 \int_0^L \int_0^\infty \kappa \phi_n(\kappa) H_{LS}(\kappa, z) (1 - e^{-\Lambda L \kappa^2 \xi^2 / k}) d\kappa dz \quad (4.33)$$

onde  $\kappa$  é o número onda escalar,  $\phi_n(\kappa)$  define o modelo de espectro de potência para flutuação do índice de refração,  $H_{LS}(\kappa, z)$  é a função de Filtro Gaussiano e a  $\xi = 1 - z/L$  é a distância normalizada. A função Filtro Gaussiano e da densidade espectral espacial de potência da flutuação do índice de refração são respectivamente [24]:

$$H_{LS}(\kappa, z) = \exp[-\kappa^2 W^2(z)] = \exp \left\{ -\kappa^2 W_0^2 \left[ \left( 1 - \frac{z}{F_0} \right)^2 + \left( \frac{2z}{kW_0^2} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.34)$$

$$\phi_n(\kappa) = 0,033 C_n^2 \kappa^{-11} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\kappa^2}{\kappa_0^2} \right) \right], \quad \kappa_0 = \frac{c_0}{L_0} \quad (4.35)$$

onde  $\kappa_0$  caracteriza a escala dos obstáculos (exterior ou interior) e  $W(z)$  é o tamanho do *spot*, depois de percorrer uma distância  $z$  no espaço ( $0 < z < L$ ) e pode ser reescrito de acordo com os

parâmetros de entrada do feixe gaussiano. Além disso, para realizar a integração da Equação 4.35 normaliza-se a distância e:

$$H_{LS}(\kappa, \xi) = \exp\{-\kappa^2 W_0^2 [(\theta_0 + \overline{\theta_0} \xi)^2 + \Lambda_0^2 (1 - \xi)^2]\} \quad (4.36)$$

Com a aproximação da óptica geométrica:

$$1 - e^{-\Lambda L \kappa^2 \xi^2 / k} \cong \frac{\Lambda L \kappa^2 \xi^2}{k}, \quad \frac{L \kappa^2}{k} \ll 1 \quad (4.37)$$

Resolvendo-se a integral da Equação 4.33 tem-se:

$$\langle r_c^2 \rangle = 7,25 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \int_0^1 \xi^2 \left\{ \frac{1}{|\theta_0 - \overline{\theta_0} \xi|^{\frac{1}{3}}} - \left[ \frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2 (\theta_0 - \overline{\theta_0} \xi)^2} \right]^{\frac{1}{6}} \right\} d\xi \quad (4.38)$$

Chega-se a uma generalização da variância do centro do ponto de maior intensidade do feixe óptico, devido à divagação do feixe para distribuições gaussianas colimadas, divergentes ou convergentes (focadas).

#### 4.6.2. Formulação Especial para Divagação do Feixe

Foi vista na seção anterior uma formulação matemática generalizada para medir a variância radial do *spot* luminoso. Entretanto, alguns casos particulares podem ser estudados e, conseqüentemente, a Equação 4.38 ser simplificada. Então, algumas alterações são feitas de acordo com a característica do feixe e dos obstáculos encontrados pelo mesmo [24].

- Feixe Colimado ( $\kappa_0 = 0$  e  $\theta_0 = 1$ )

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \quad (4.39)$$

- Feixe Focado ( $\kappa_0 = 0$  e  $\theta_0 = 0$ )

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \quad (4.40)$$

- Feixe Colimado ( $\kappa_0 \neq 0$ ,  $\theta_0 = 1$  e  $\overline{\theta_0} = 0$ )

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \left[ 1 - \left( \frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{\frac{1}{6}} \right] \quad (4.41)$$

- Feixe Focado ( $\kappa_0 \neq 0$  e  $\theta_0 = 1$  e  $\overline{\theta_0} = 1$ )

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{-\frac{1}{3}} \left[ 1 - \frac{8}{9} \left( \frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + 0,5 \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{\frac{1}{6}} \right] \quad (4.42)$$

## 5. Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica

O capítulo que se inicia é o foco principal da pesquisa que foi desenvolvida no Laboratório de Comunicações Ópticas da Universidade Federal Fluminense. Até então, nos capítulos anteriores, demonstraram-se as motivações, os fundamentos e a base teórica. Neste capítulo, será apresentada a técnica para medição de turbulência atmosférica em enlaces ópticos horizontais no espaço livre.

Como foi visto no Capítulo 2, introduziram-se a comunicação óptica no espaço livre e as partes que envolvem todo processo de transmissão (transmissores, receptores, ruído e afins) da informação de um ponto a outro. No Capítulo 3, foram apresentados fatores que degradam o sinal óptico e a importância destes no cálculo de balanço de potência, que até podem inviabilizar um projeto de um sistema FSO. O objetivo básico desses dois capítulos foi mostrar o FSO e os problemas inerentes.

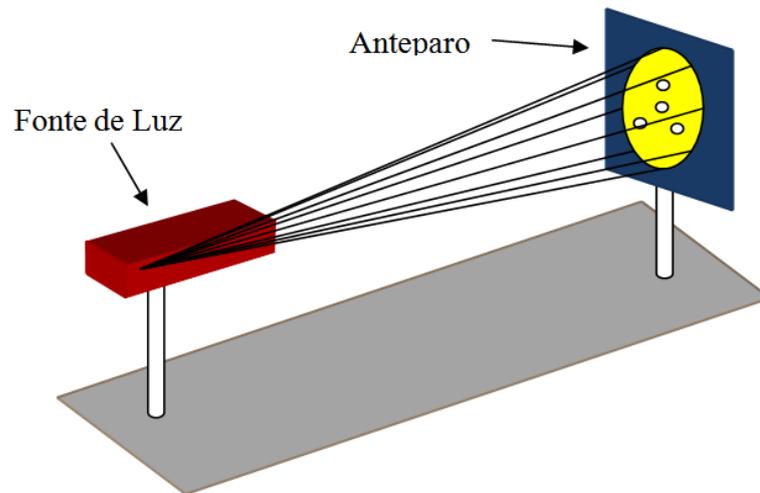
Seguindo a estrutura do texto, chega-se ao Capítulo 4 que teve como objetivo criar uma base teórica e consolidada sobre a turbulência atmosférica, com ênfase na divagação do feixe, para se poder compreender a técnica proposta que mensura a constante de estrutura para o índice de refração indiretamente e, conseqüentemente, o grau de turbulência atmosférica de um determinado enlace óptico.

O Capítulo 5 apresentará a técnica desenvolvida e experimentada em laboratório. Primeiramente, descreve-se de forma qualitativa a concepção de como medir a turbulência atmosférica através da divagação do feixe. Logo após, nas seções seguintes, mostra-se todo o desenvolvimento matemático que envolve o processo de medida e cálculo da constante de estrutura para o índice de refração. Um arranjo experimental foi montado em laboratório para corroborar com os aspectos matemáticos e com a idéia proposta. Dados experimentais e simulações realizadas computacionalmente foram obtidas e, em alguns casos, confrontadas para averiguar a veracidade e a precisão das medições.

Por fim, algumas outras aplicações para as quais a técnica também permite ser empregada serão enumeradas e descritas, junto com propostas para trabalhos futuros e o devido prosseguimento da pesquisa.

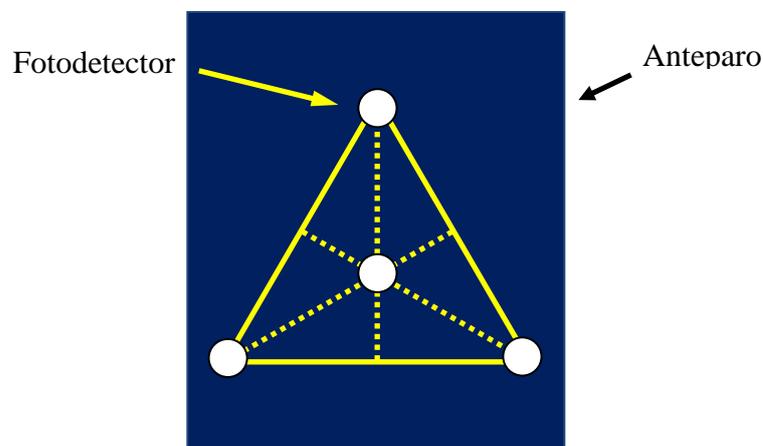
## 5.1. *Análise Qualitativa dea Técnica*

A idéia básica da técnica desenvolvida é bastante simples e de fácil compreensão. Na Figura 31, tem-se uma fonte de luz, como, por exemplo, um *laser*, realizando o papel de transmissor do sistema óptico em espaço livre. O feixe óptico se propaga pela atmosfera e projeta, no anteparo, idealmente um *spot* circular com distribuição gaussiana, como pode ser visto abaixo.



**Figura 31 - Ilustração qualitativa do experimento realizado em laboratório.**

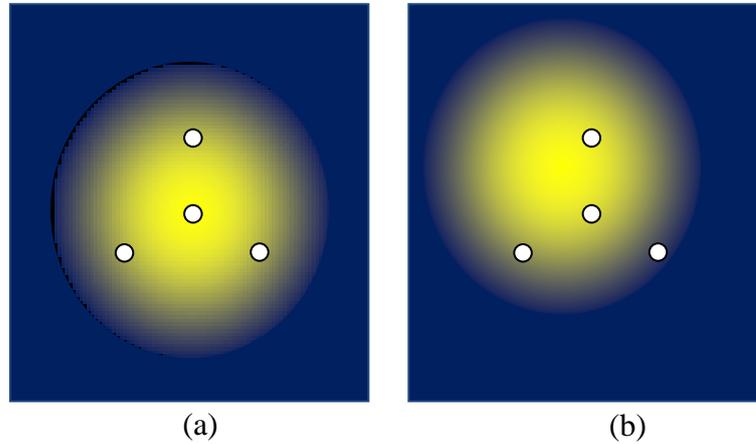
No anteparo estão dispostos os fotodetectores na forma de um triângulo equilátero. Sendo que três fotodetectores ocupam os vértices do triângulo, e o quarto detector é colocado no ponto de interseção das alturas relativas a cada lado (Figura 32).



**Figura 32 – Anteparo com os fotodetectores dispostos na forma de um triângulo equilátero.**

O feixe óptico, ao se propagar pelo espaço e ser projetado no anteparo, terá, no plano do receptor, uma distribuição de intensidade gaussiana, com base circular. Com isso, devido à

divagação do feixe, como consequência da turbulência atmosférica, haverá um deslocamento do *spot* circular. Assim, pode-se, através da medida da intensidade óptica nos fotodetectores, determinar a posição absoluta do feixe em qualquer instante (Figura 33).



**Figura 33 - (a) Posição inicial da Gaussiana no anteparo no instante  $t_0$ . (b) Posição da Gaussiana no instante  $t_1$  devido a divagação do feixe provocado pela turbulência atmosférica.**

Para isso, é necessário conhecer previamente alguns parâmetros, tais como: posição dos fotodetectores no plano receptor e largura e intensidade da gaussiana no plano receptor. O que se pretende realizar é um cálculo matemático para, a todo instante, ter conhecimento do local exato da posição do centro da gaussiana no plano do receptor e utilizando as equações 4.39-42 determinar a constante de estrutura para o índice de refração. Com essa informação poderá ser avaliado o grau de turbulência atmosférica da região em que um enlace FSO esteja instalado.

## 5.2. *Análise Quantitativa da Técnica*

Na seção anterior, esclareceram-se, qualitativamente, a técnica para medir turbulência atmosférica e a proposta para realizar tal tarefa. Nesta seção, procurar-se-á equacionar matematicamente o que foi citado.

Primeiramente, imagina-se um enlace óptico, como visto na Figura 31, na ausência de turbulência atmosférica. Nestas condições, o feixe gaussiano projetado no anteparo ficará imóvel, em relação aos eixos cartesianos independente do tempo analisado. A técnica consiste em colocar os fotodetectores ( $D_i$ ) no plano do receptor, conhecendo também as suas posições relativas ( $x_i, y_i$ ) ao centro do eixo coordenados, onde  $i=1,2,3$ , (Figura 34). A potência óptica ( $P_i$ ), que incide na área efetiva de cada fotodetector, é medida e, logo após, é realizado um

cálculo para determinar a posição instantânea do centro do feixe da gaussiano  $(x_0, y_0)$ . Assumindo, então, a transmissão e recepção da luz, com um padrão de distribuição gaussiano, pode-se escrever matematicamente a distribuição de potência como:

$$P(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} \quad (5.1)$$

onde,  $r$ ,  $W$  e  $P_0$  são a distância radial ao centro do feixe, a largura do feixe e a potência óptica no centro do feixe, respectivamente.

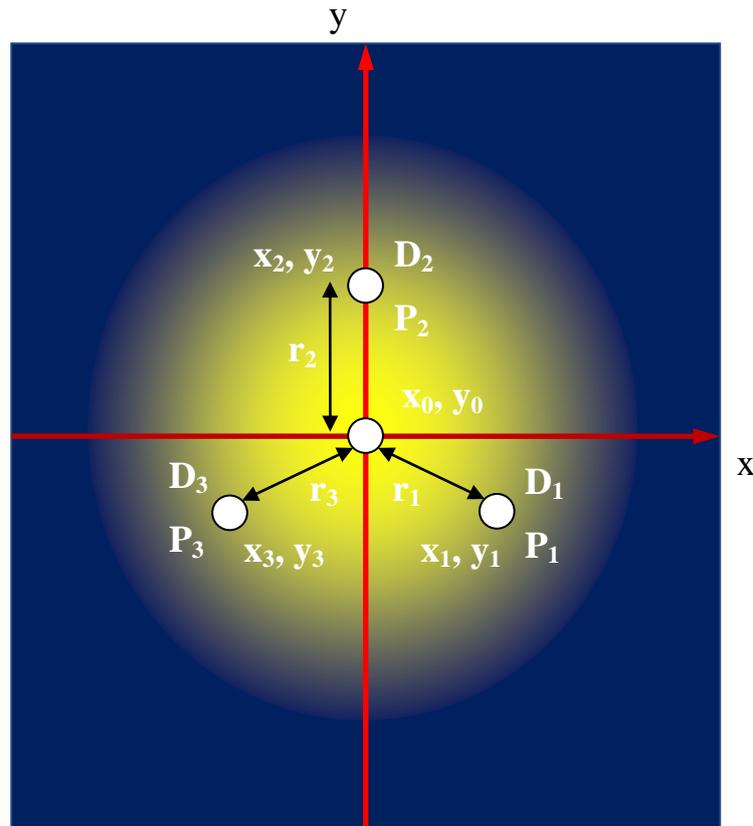


Figura 34 - Feixe gaussiano projetado no anteparo.

Após medir as potências ópticas  $P_i$  pode-se determinar as distâncias radiais  $r_i$  de cada fotodetector ao centro do feixe utilizando a Equação 5.1:

$$P_i(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)^2} \quad (5.2)$$

$$e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)^2} = \frac{P_i}{P_0} \quad (5.3)$$

Fazendo  $\bar{P}_i = \frac{P_i}{P_0}$ , que é a potência normalizada em cada fotodetector:

$$e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)^2} = \bar{P}_i \quad (5.4)$$

$$\ln\left(e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)^2}\right) = \ln(\bar{P}_i) \quad (5.5)$$

$$\left(\frac{r_i}{W}\right)^2 = -\ln(\bar{P}_i) \quad (5.6)$$

Logo, chegam-se às distâncias radiais:

$$r_i^2 = W^2(-\ln(\bar{P}_i)) \quad (5.7)$$

Fazendo a transformação das distâncias radiais em coordenadas cilíndricas para cartesianas,

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}, \quad (5.8)$$

substituindo a Equação 5.8 na Equação 5.7, tem-se um conjunto de três equações, onde cada equação e a quantidade delas correspondem aos fotodetectores e à quantidade deles:

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 - W^2(-\ln\bar{P}_1) = 0 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 - W^2(-\ln\bar{P}_2) = 0 \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 - W^2(-\ln\bar{P}_3) = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Com isso, para se determinar a posição do centro do feixe óptico projetado no anteparo, é necessário resolver o sistema de equações 5.9. No entanto, é preciso conhecer as posições iniciais de cada fotodetector e medir a potência óptica incidente na área efetiva de cada um deles para solucionar o sistema através de um código computacional desenvolvido em Fortran. Com a posição  $(x_0, y_0)$ , obtém-se o deslocamento do feixe óptico ao centro do sistema de coordenadas estabelecido  $(r_c)$ . A turbulência atmosférica, ou a constante de estrutura para o índice de refração, é então calculada usando as equações 4.39-42, onde  $r_c$  é:

$$r_c = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (5.10)$$

A variância de  $r_c$ ,  $\langle r_c^2 \rangle$  é então obtida pela estatística temporal do parâmetro.

### 5.3. *Arranjo Experimental*

Nesta seção, será mostrado o arranjo experimental desenvolvido em laboratório para validação da técnica proposta. Com esse arranjo será visto, nas próximas seções, que é possível determinar a posição do centro do feixe gaussiano no plano do receptor na prática e com precisão suficiente para a medida de turbulência atmosférica de diferentes intensidades. Com essa informação, se pode caracterizar a turbulência atmosférica pela aferição da constante de estrutura para o índice de refração. Os seguintes dispositivos foram utilizados para a montagem experimental (Figura 35):

- Diodo *laser* de bombeio (LD) com fibra pigtail HiBi – 980nm Pirelli ;
- Fibra óptica padrão (STD) com comprimento de onda de corte de 1300nm;
- Fonte de corrente (FC) Newport 5030;
- Controlador de temperatura (CT) ILX Light Wave LDT-5525;
- Filtro modal (MF);
- Anteparo com quatro fotodetectores ( $D_i$ );
- Anteparo com papel vegetal;
- Câmera fotográfica Canon G3;
- Conversor analógico-digital (ADC) da National Instruments 6210;
- Computador pessoal (PC);

A distribuição da potência da luz na saída do LD não corresponde a uma gaussiana circular. Então, foi necessário conectar a saída do *laser* a uma fibra óptica padrão para, ao projetar a luz no anteparo, esta possuir uma distribuição gaussiana circular no plano do receptor após propagação pelo ar. O LD é excitado por uma fonte de corrente da Newport e resfriado por um controlador de temperatura da LightWave, como citado anteriormente. O filtro modal é conectado na saída da fibra padrão para eliminar os modos de alta ordem e os modos que se propagam pela casca, para garantir o feixe gaussiano circular sobre o anteparo.

A luz se propaga da saída do MF e chega até ao anteparo com os quatro fotodetectores, após percorrer 21 cm. Nos fotodetectores, a potência óptica é convertida em um sinal elétrico de valor proporcional à intensidade luminosa. Esse sinal é, então, enviado para um conversor analógico-digital, para transmitir os dados para um computador. Com a informação das potências ópticas em cada fotodetector, o computador pode resolver o sistema de equações 5.9 e calcular a posição do feixe em um determinado instante.

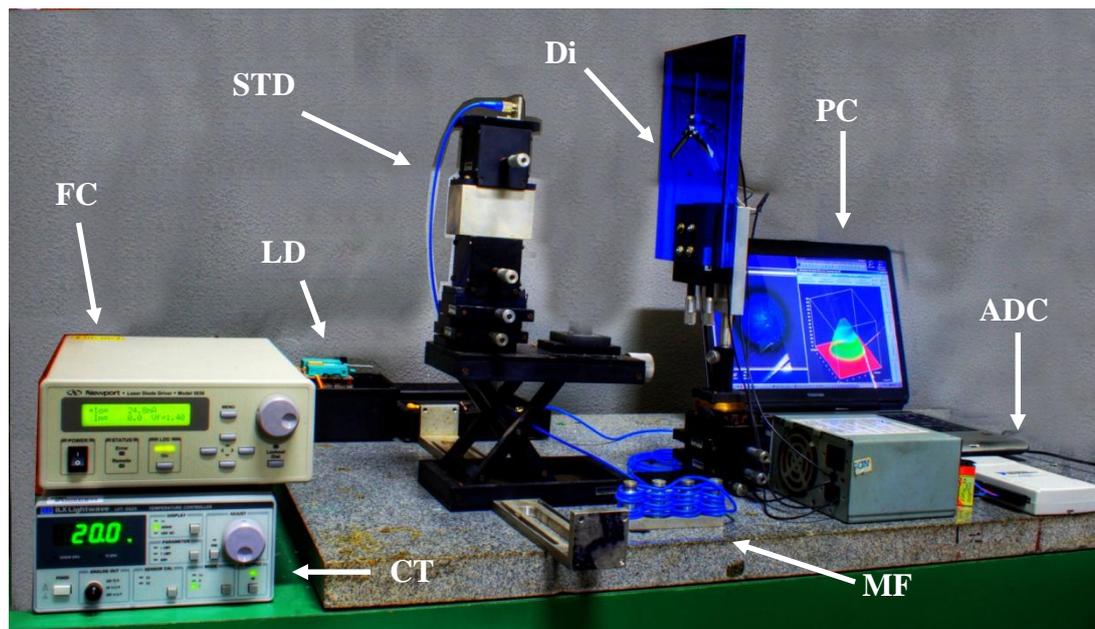


Figura 35 - Arranjo experimental para consolidação da técnica proposta.

No entanto, para a verificação experimental da técnica aqui proposta, é preciso que a potência que chega ao anteparo seja constante e que a distribuição seja gaussiana circular. Para verificar a estabilidade da intensidade óptica, mediu-se a potência no detector central do anteparo que ficou imóvel e, por um período de 6 horas e 45 minutos, mediu-se a intensidade luminosa capturando os dados, através de um programa desenvolvido em MATLAB instalado no PC. O resultado mostrou a estabilidade de potência óptica na saída do *laser* ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 36.

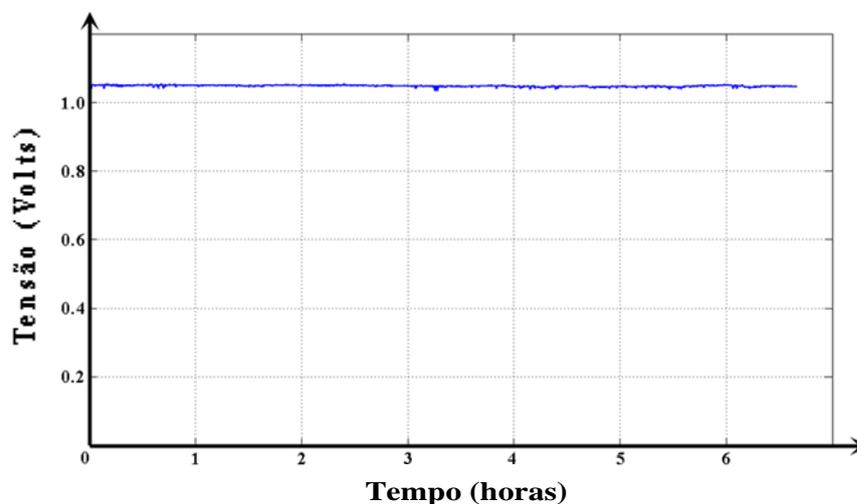


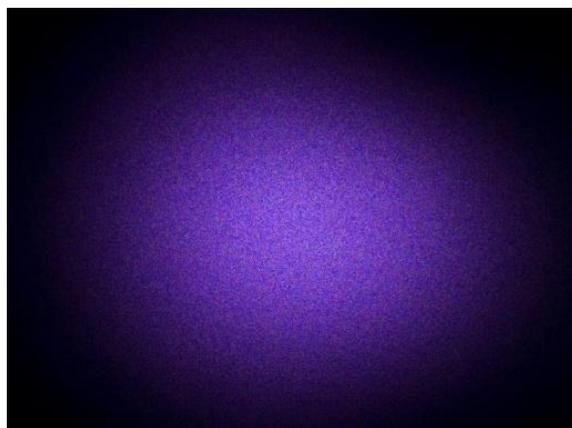
Figura 36 – Medição da tensão de saída do fotodetector central durante um intervalo de tempo de 6h45min.

Para verificar se o feixe apresentava perfil transversal gaussiano circular, colocou-se, no lugar do anteparo com os fotodetectores, outro anteparo feito com papel vegetal (Figura 37) e nele incidiu a luz proveniente da saída do MF.

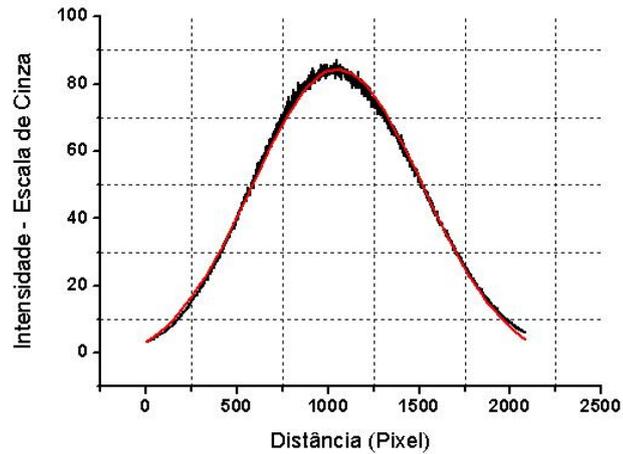


**Figura 37 - Anteparo com o papel vegetal para projetar a luz incidente.**

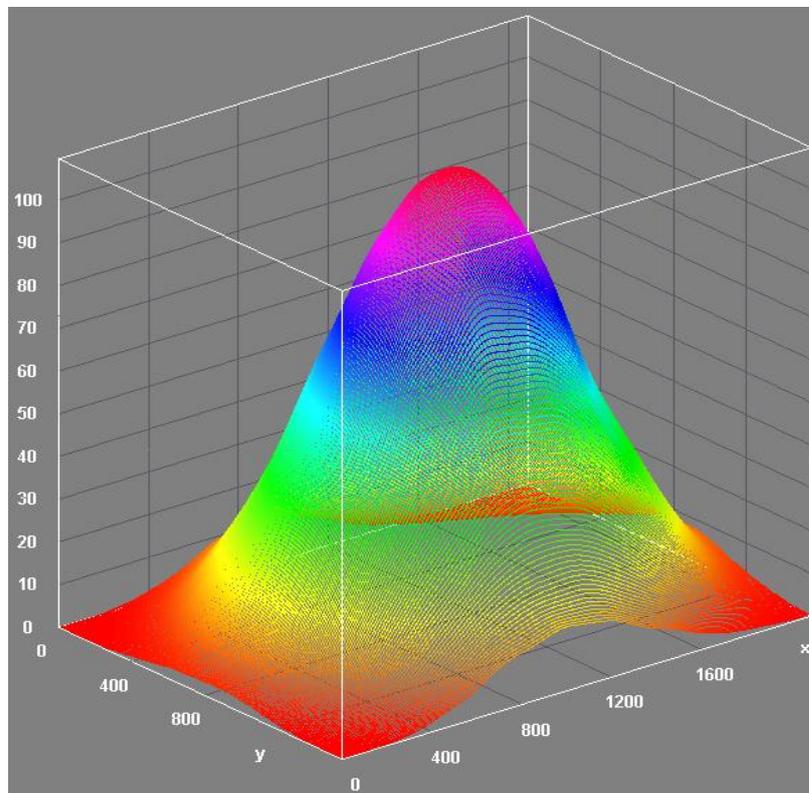
Do outro lado do anteparo, uma máquina fotográfica (Canon G3), sem o filtro que bloqueia comprimentos de onda no infravermelho [27], foi posta com o intuito de fotografar a luminosidade incidente no papel (Figura 38). Com a fotografia e utilizando o *software* imageJ traçou-se o perfil da distribuição da intensidade óptica em duas e três dimensões (Figura 39 e Figura 40 ) [28]. Na Figura 39, a curva em vermelho é uma aproximação por gaussiana feita no programa Origin.



**Figura 38 – Fotografia da distribuição da intensidade luminosa projetada no papel vegetal.**



**Figura 39 – Perfil 2D da distribuição luminosa incidente no papel vegetal.**



**Figura 40 - Perfil 3D da distribuição luminosa incidente no papel vegetal**

Com esse arranjo experimental, foram feitos alguns experimentos para a comprovação da técnica proposta. Antes de mostrar esses resultados, algumas simulações com o programa que foi desenvolvido para resolver o sistema de equações 5.9, foram realizadas para descrição do funcionamento do mesmo e subsequentemente os resultados empíricos são mostrados e analisados.

### 5.3.1. Sistema de Recepção

O sistema de recepção é composto de quatro circuitos ( $C_i$ ) cada um deles composto de um foto transistor, um capacitor e uma resistência variável (Figura 41).

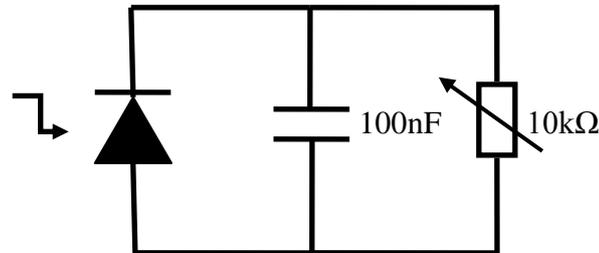


Figura 41 – Circuito de recepção.

A escolha da resistência variável teve por objetivo a calibração precisa de cada circuito, pois é sabido que existe uma pequena diferença entre os componentes, mesmo sendo estes do mesmo modelo e fabricante. Para a calibração, alinhou-se o ponto de intensidade máxima da gaussiana com cada fotodetector e, variando-se o valor da resistência elétrica, alterou-se o valor da tensão de saída para um valor fixo. Consequentemente, após isso, se obteve todos os circuitos de recepção com a mesma resposta em tensão e bandas passantes (B) diferentes devido às resistências (Tabela 2).

Circuito	Capacitor	Resistência	Banda Passante
$C_0$	100nF	5,98k $\Omega$	266,15Hz
$C_1$	100nF	5,99k $\Omega$	265,71Hz
$C_2$	100nF	5,57k $\Omega$	285,74Hz
$C_3$	100nF	5,73k $\Omega$	277,77Hz

Tabela 2 – Componentes usados no sistema de recepção e a banda passante dos circuitos

O cálculo do ruído no circuito de recepção é necessário, para avaliar o quanto o ruído influencia na precisão das medidas nos experimentos que serão mostrados mais adiante. Como visto no capítulo 2, existem dois tipos de ruídos que degradam o sistema: ruído térmico e ruído *shot*. Segundo a Equação 2.12 e 2.14 e para valores típicos de corrente de escuro nos fotos transistores e uma temperatura ambiente de 25°C:

<b>Circuito</b>	<b><math>(i_{NT})_{RMS}</math></b>	<b><math>(i_{NS})_{RMS}</math></b>	<b><math>I_{TOTAL} (i_{NT} + i_{NS})_{RMS}</math></b>
C <sub>0</sub>	0,271pA	876pA	930pA
C <sub>1</sub>	0,270pA	875pA	902pa
C <sub>2</sub>	0,291pA	908pA	937pA
C <sub>3</sub>	0,282pA	985pA	923pA

**Tabela 3 – Correntes geradas pelo ruído térmico e ruído shot.**

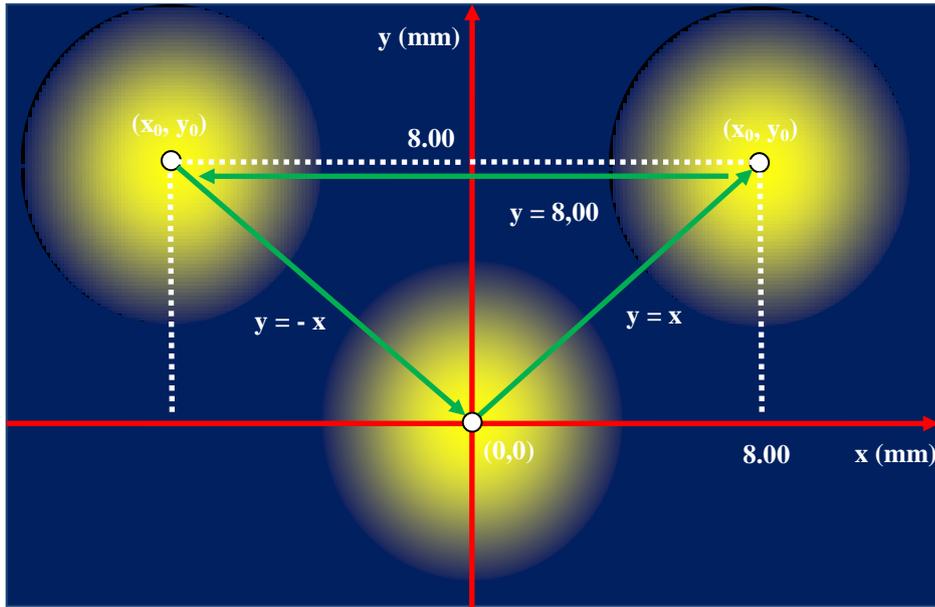
#### 5.4. Programa e simulação

O programa desenvolvido para resolver o sistema de equações 5.9 funciona de maneira bem simples. Como visto no item 5.3, para saber a posição do feixe em determinado instante, é preciso conhecer as posições dos fotodetectores no anteparo ( $x_i$ ,  $y_i$ ) a potência central ( $P_0$ ) e a largura ( $W$ ) da gaussiana. Com esses dados e as medidas das potências em cada fotodetector, ao longo do tempo inseridos no programa, obtém-se a posição do centro do feixe gaussiano. Para ilustrar o processo mostra-se uma simulação realizada. Antes dela e dos experimentos a serem mostrados, é necessário definir as características do anteparo (posição dos fotodetectores) e largura da gaussiana (largura). O  $W$  usado para realização da simulação foi de 25,00 mm. A potência foi normalizada e a disposição dos fotodetectores no anteparo pode ser vista na Figura 34 e foram usadas as seguintes posições relativas:

<b>I</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b><math>x_i</math> (mm)</b>	0,00	-10,00	0,00	10,00
<b><math>y_i</math> (mm)</b>	0,00	-5,00	12,32	-5,00

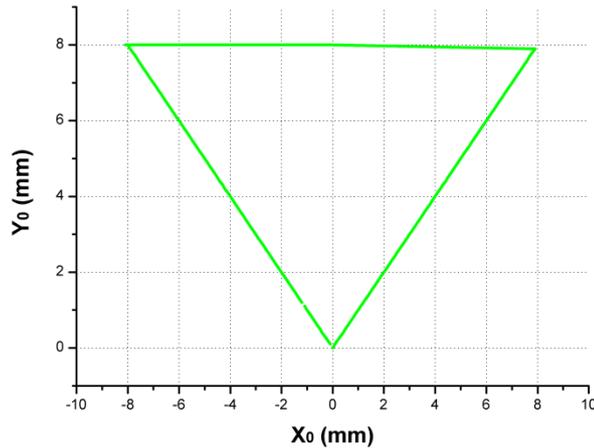
**Tabela 4 – Posições relativas de cada fotodetector utilizadas na realização das simulações.**

A simulação consistiu em transladar o feixe gaussiano de 0,10mm em 0,10mm da origem do sistema de coordenadas cartesianas até a posição ( $x=8,00$ ,  $y=8,00$ ) sobre a reta  $y=x$ . Após, o feixe gaussiano foi movido até ponto  $(-8,00, 8,00)$  pela reta  $y = 8,00$ . Finalmente, volta para a origem do sistema sobre a reta  $y=-x$ , como pode ser visto na Figura 42.



**Figura 42 – Movimentação do feixe gaussiano que será utilizada na simulação.**

A potência teórica ( $P_i$ ) medida em cada fotodetector, ao movimentar o feixe gaussiano de acordo com a Figura 42, é determinada pela Equação 5.2, para cada passo de 0,10mm nos eixos ortogonais. Utilizando o programa desenvolvido em FORTRAN, com auxílio da rotina DNEQNJ da IMSL, o sistema de equações 5.9 é resolvido para cada ponto e o resultado é mostrado na Figura 43.



**Figura 43 – Gráfico da movimentação da gaussiana calculada pelo programa.**

O resultado evidenciado pela Figura 47 mostra que o sistema é capaz de calcular a posição  $(x_0, y_0)$ , centro do feixe gaussiano, rastreamento do feixe em movimento.

## 5.5. Resultados Experimentais

Foi visto, que a turbulência atmosférica, especialmente a divagação do feixe, faz com que o centro do *spot* luminoso se mova de maneira aleatória no plano do receptor. Demonstrou-se, também, que é possível com três fotodetectores determinar a posição do feixe em determinado instante e, com as equações vistas no final do Capítulo 4, é possível descobrir o grau de turbulência atmosférica pela constante de estrutura para o índice de refração. Até o momento, foi apresentado um formalismo matemático do problema junto com uma simulação computacional.

Agora, utilizando o arranjo experimental descrito anteriormente, serão obtidos resultados que comprovarão experimentalmente a técnica proposta. Antes de realizar uma seqüência de experimentos é preciso definir:

- As posições relativas dos fotodetectores no anteparo;
- Uma forma de simular a movimentação do feixe;
- O alinhamento do feixe gaussiano;
- As características da gaussiana;

O primeiro passo é a determinação das posições dos fotodetectores no anteparo que foram medidas usando um paquímetro digital. O resultado dessa medida, em milímetros, e o anteparo podem ser vistos na Figura 44. A origem é o ponto (0,0) que coincide com a posição do fotodetector central.

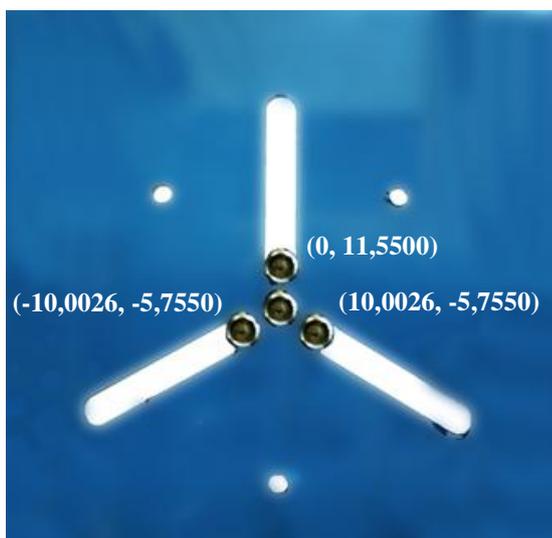
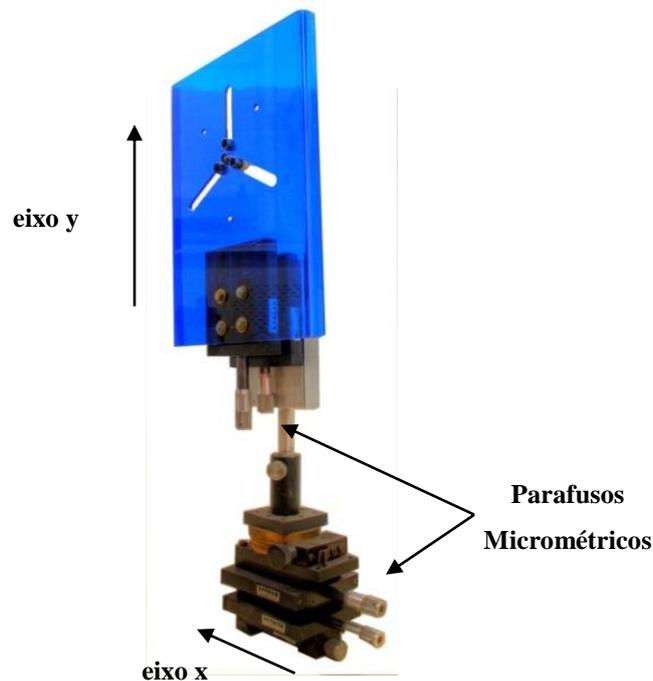


Figura 44 - Anteparo usado no experimento com as posições relativas de cada fotodetector.

Em segundo lugar, é preciso movimentar o feixe gaussiano no plano do receptor, simulando assim o efeito da turbulência. Após o envio dos dados de tensão dos fotodetectores ao PC e o devido processamento, obtém-se a posição do centro do *spot*. Ao invés de movimentar a fonte de luz, escolheu-se movimentar o anteparo com os fotodetectores para simular o deslocamento do feixe. Tal tarefa foi realizada através de parafusos micrométricos instalados na base do anteparo, para a movimentação na direção horizontal (eixo x) e na parte traseira do anteparo para movimentação vertical (eixo y), conforme mostrado na Figura 45.



**Figura 45 – Anteparo com os parafusos micrométricos instalados na base e na parte traseira.**

Os parafusos micrométricos utilizados nos estágios de translação do anteparo possuem um passo correspondente a 0,5mm por volta, isto quer dizer que uma volta completa desloca o anteparo de 0,5mm, e um total de 50 voltas para percorrer todo o parafuso (Figura 46).



**Figura 46 – Estágio de Translação utilizado e o Parafuso micrométrico.**

O quarto fotodetector que, até então não foi mencionado, tem a função de alinhamento do feixe. Considerando a gaussiana com um perfil circular e os fotodetectores dispostos nos vértices de um triângulo equilátero, para posicionar o feixe óptico no centro do sistema cartesiano, basta encontrar o ponto de maior intensidade óptica no fotodetector central e, ao mesmo tempo, intensidades ópticas iguais nos fotodetectores que estão sobre os vértices do triângulo. Depois de alinhado, percorre-se toda a gaussiana girando os parafusos micrométricos na direção horizontal (H) e vertical (V) e mede-se ao mesmo tempo a tensão gerada nos fotodetectores. Com essas medidas, é possível conhecer a largura ( $W$ ) da gaussiana (Figura 47 e Figura 48).

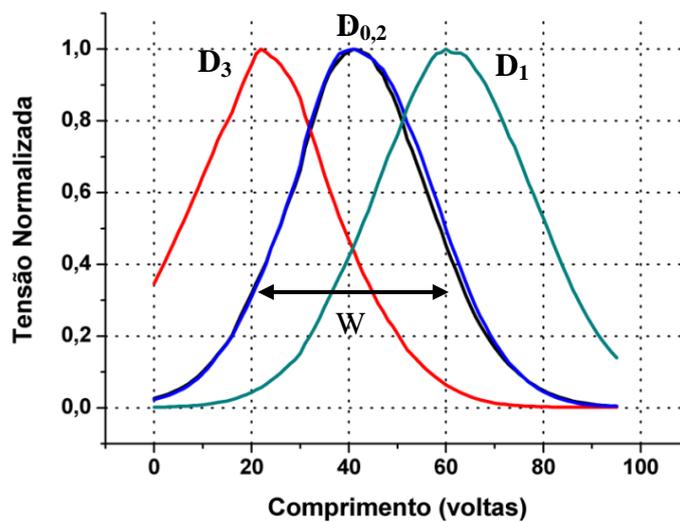


Figura 47 - Medição da largura da gaussiana na horizontal medida através dos quatro fotodetectores.

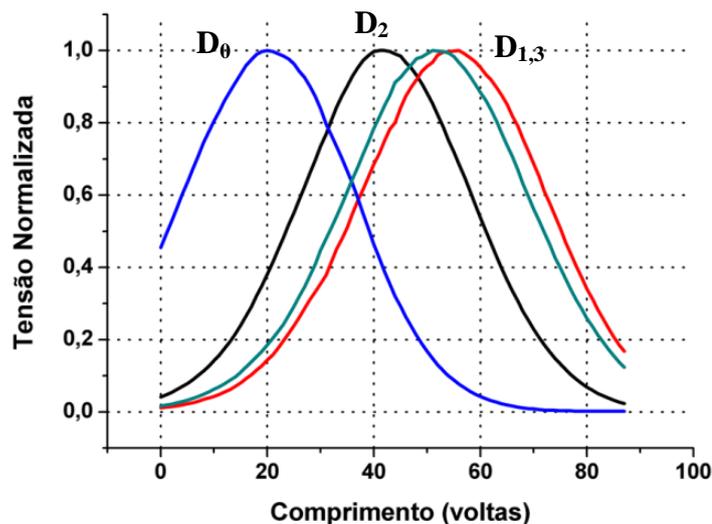


Figura 48 - Medição da largura da gaussiana na vertical medida através dos quatro fotodetectores.

Os resultados numéricos das larguras das gaussianas medidas em cada fotodetector estão na Tabela 5:

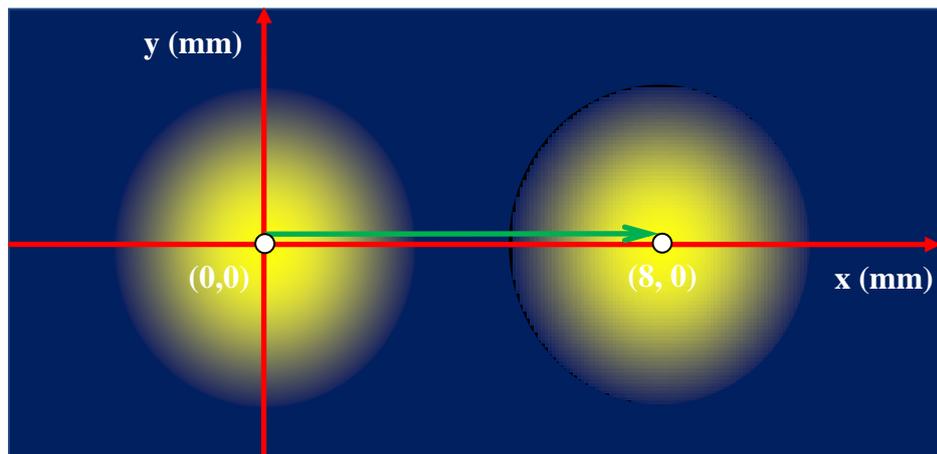
	<b>W – H (mm)</b>	<b>W – V (mm)</b>
<b>D<sub>0</sub></b>	14,1716	15,8190
<b>D<sub>1</sub></b>	15,1426	17,1459
<b>D<sub>2</sub></b>	14,6121	15,8934
<b>D<sub>3</sub></b>	16,4503	16,8895

**Tabela 5 – Largura medida da gaussiana pelos fotodetectores na horizontal e vertical.**

Assim sendo, tomando como base as medidas feitas sobre o feixe gaussiano, será considerada a largura da gaussiana (W) como o valor médio da Tabela 5 ( $W=15,77\text{mm}$ ).

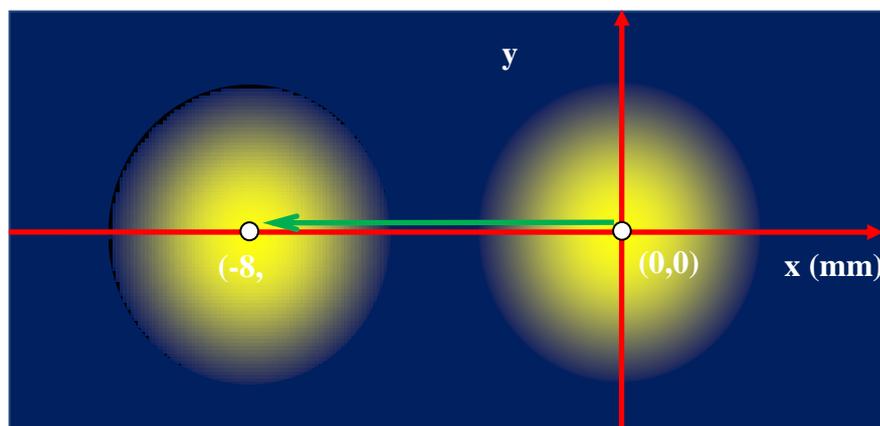
Seis movimentos foram escolhidos para demonstrar a técnica:

1. Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores positivos da abscissa;



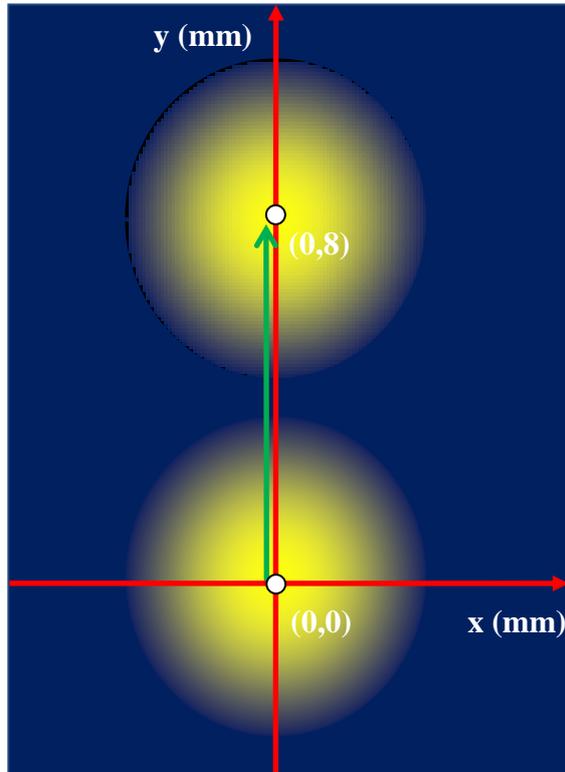
**Figura 49 – Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no primeiro experimento.**

2. Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores negativos da abscissa;



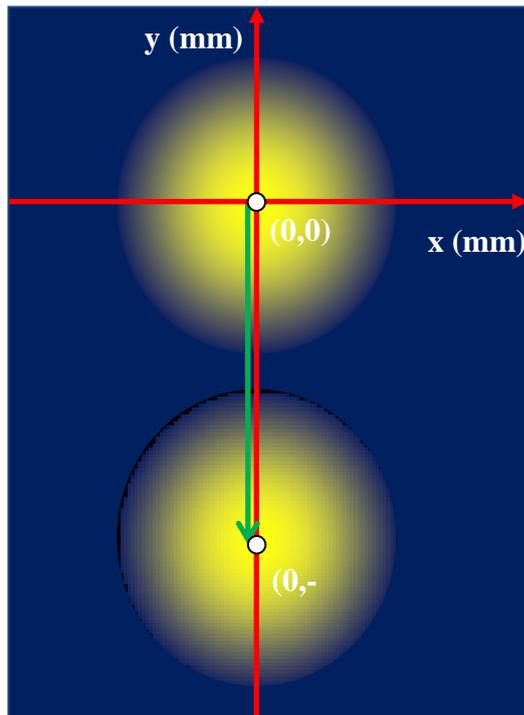
**Figura 50 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no segundo experimento.**

3. Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores positivos da ordenada;



**Figura 51 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no terceiro experimento.**

4. Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores negativos da ordenada;



**Figura 52 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no quarto experimento.**

5. Deslocamento de 45° em relação aos eixos coordenados até o ponto (5,00, -5,00);

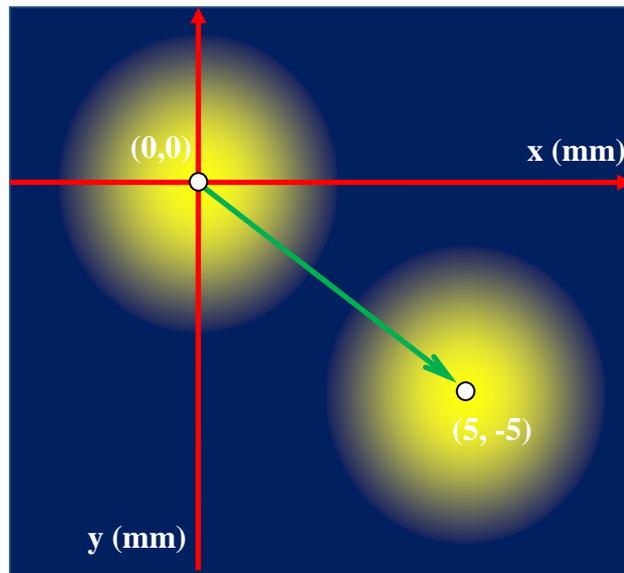


Figura 53 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no quinto experimento.

6. Deslocamento cobrindo todos os quadrantes na forma de um quadrado de lado 10mm;

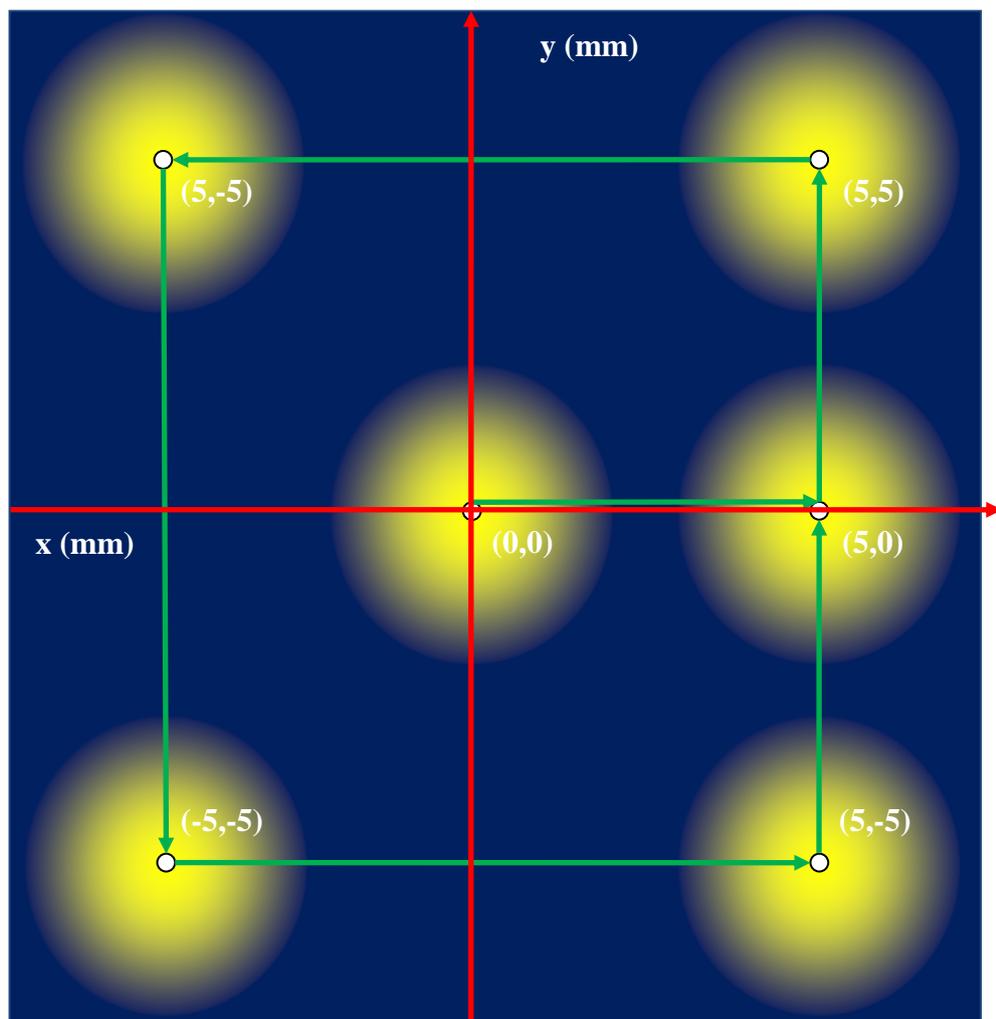
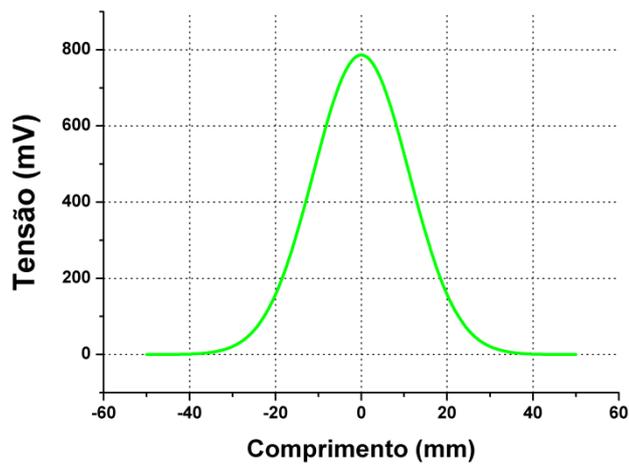


Figura 54 - Ilustração do deslocamento da gaussiana realizado no sexto experimento.

Os experimentos foram feitos posicionando os fotodetectores no anteparo, conforme a Tabela 6, e com a largura da gaussiana, tirada da Tabela 5, no valor de 15,77mm e tensão máxima medida de 786,1mV. Um perfil bidimensional da gaussiana utilizada no experimento é mostrado na Figura 55.

<b>I</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>x<sub>i</sub> (mm)</b>	0,00	-10,0026	0,00	10,0026
<b>y<sub>i</sub> (mm)</b>	0,00	-5,7550	11,5500	-5,7550

**Tabela 6 - Posições relativas de cada fotodetector utilizadas na realização dos experimentos.**



**Figura 55 – Gaussiana usada no experimento.**

Os resultados dos movimentos para demonstrar a técnica são apresentados na forma de gráficos da Figura 60 até a Figura 70. Nos gráficos, a linha vermelha é o caminho calculado, após a movimentação do plano receptor, através da movimentação dos parafusos micrométricos e obtenção das intensidades ópticas, pelo sistema de equações. Em verde, observa-se o valor esperado na saída do sistema de equações devido a movimentação realizada.

### 5.5.1. Resultado 01

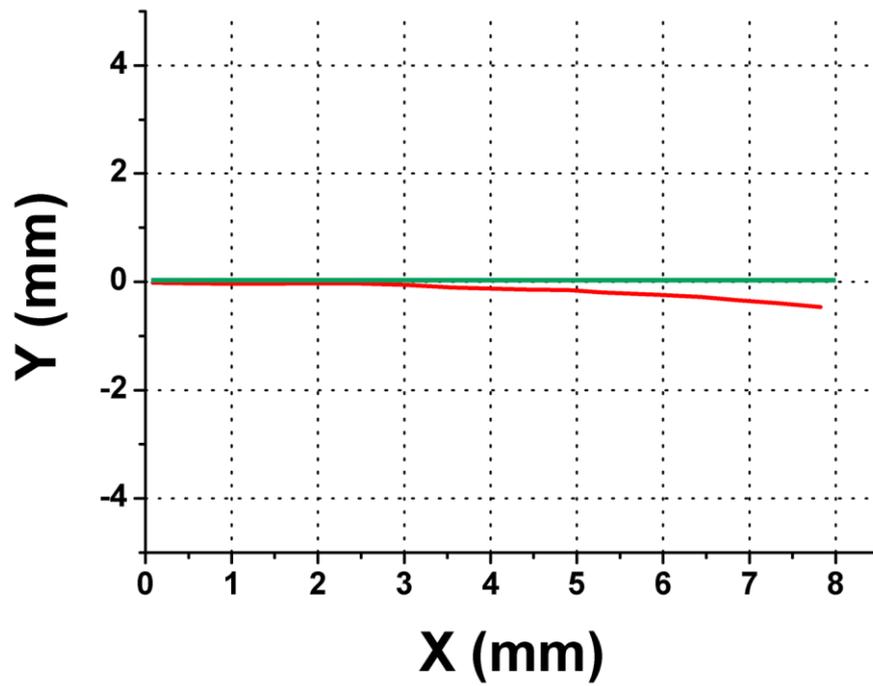


Figura 56 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores positivos da abscissa.

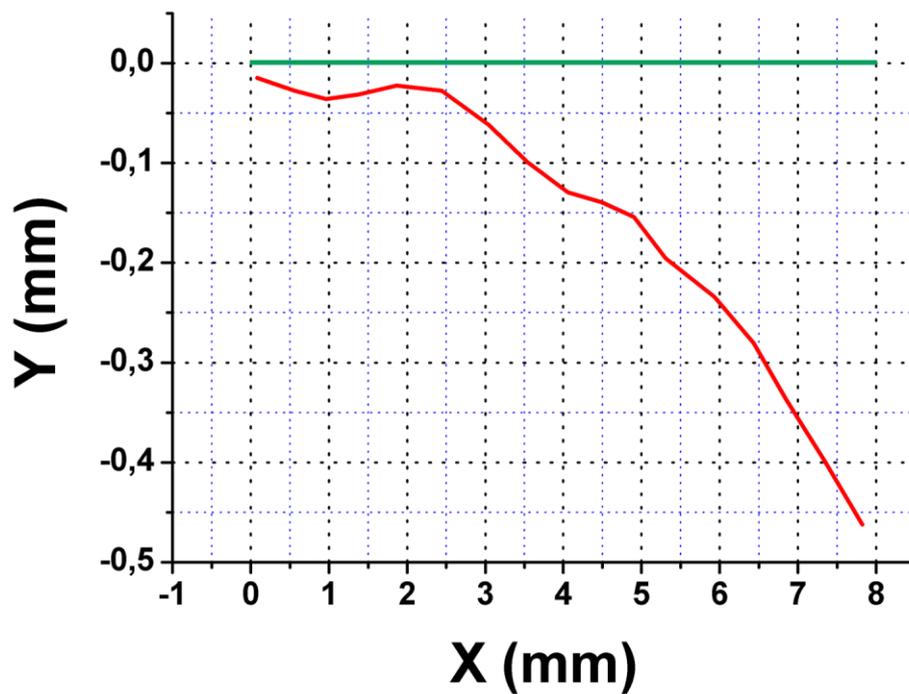


Figura 57 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores positivos da abscissa ampliado.

### 5.5.2. Resultado 02

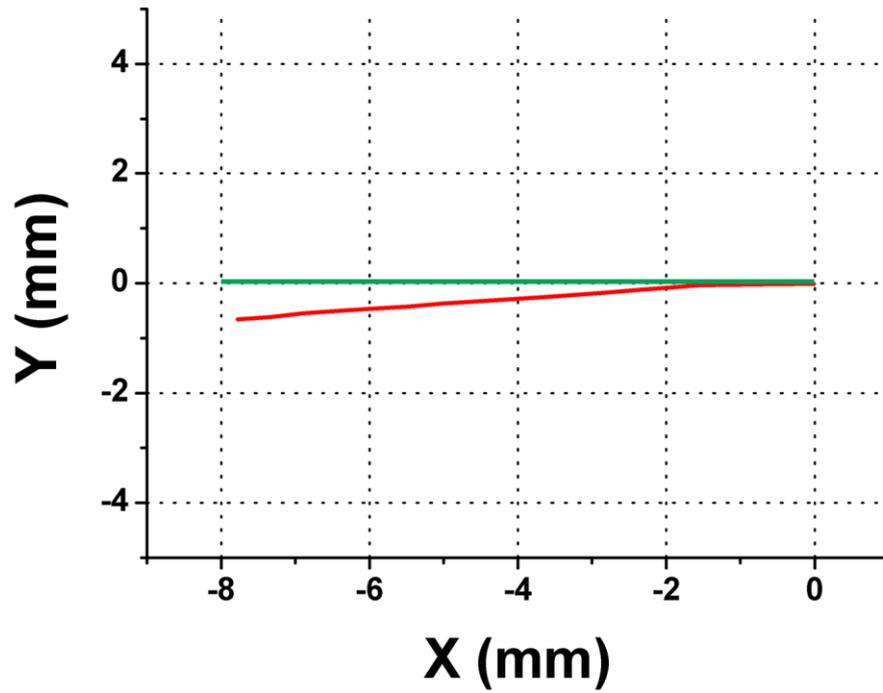


Figura 58 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores negativos da abscissa.

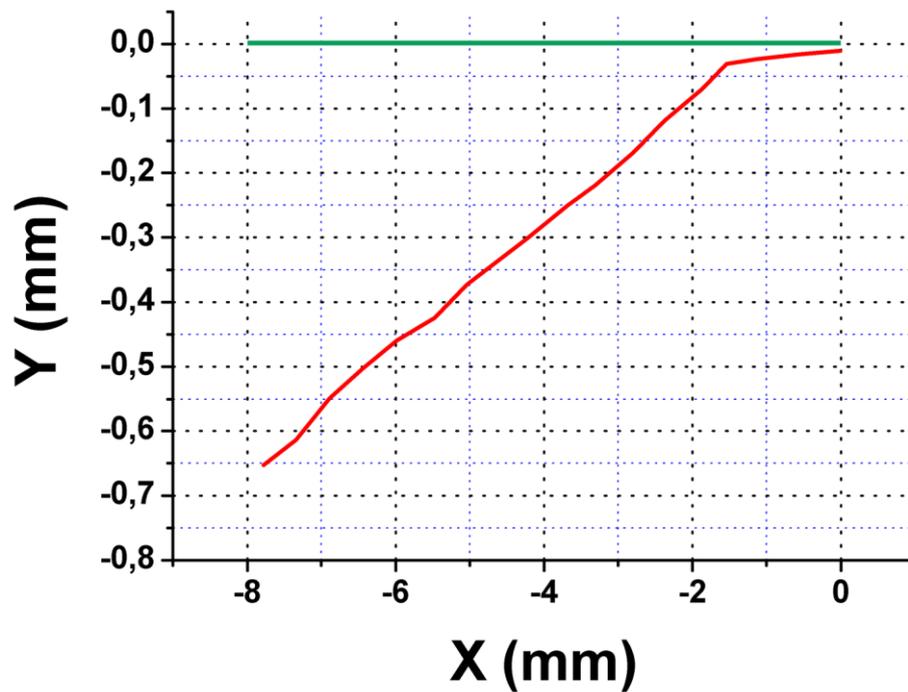


Figura 59 - Deslocamento horizontal do feixe de 8mm para valores negativos da abscissa ampliado.

### 5.5.3. Resultado 03

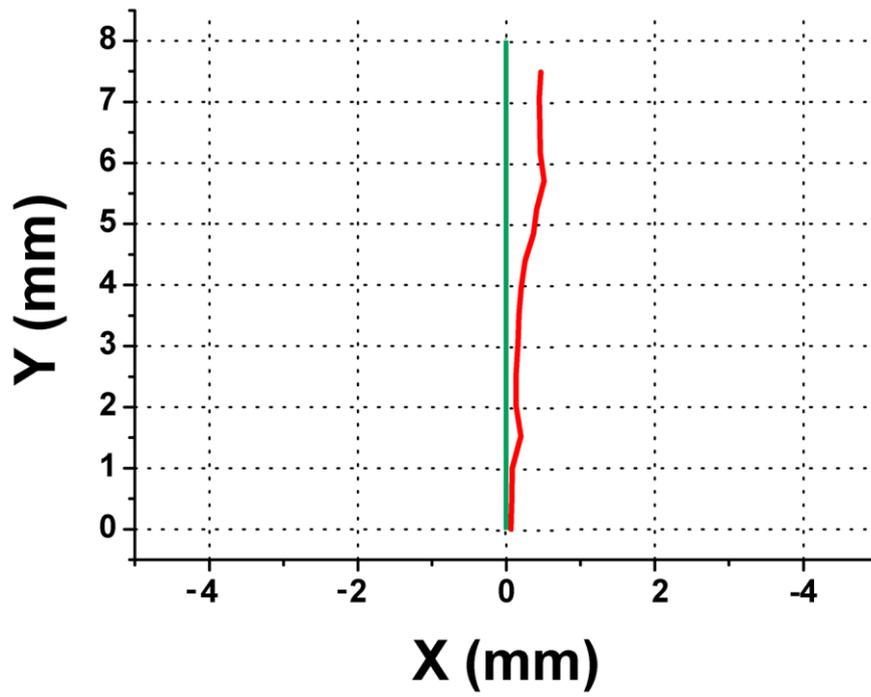


Figura 60 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores positivos da ordenada

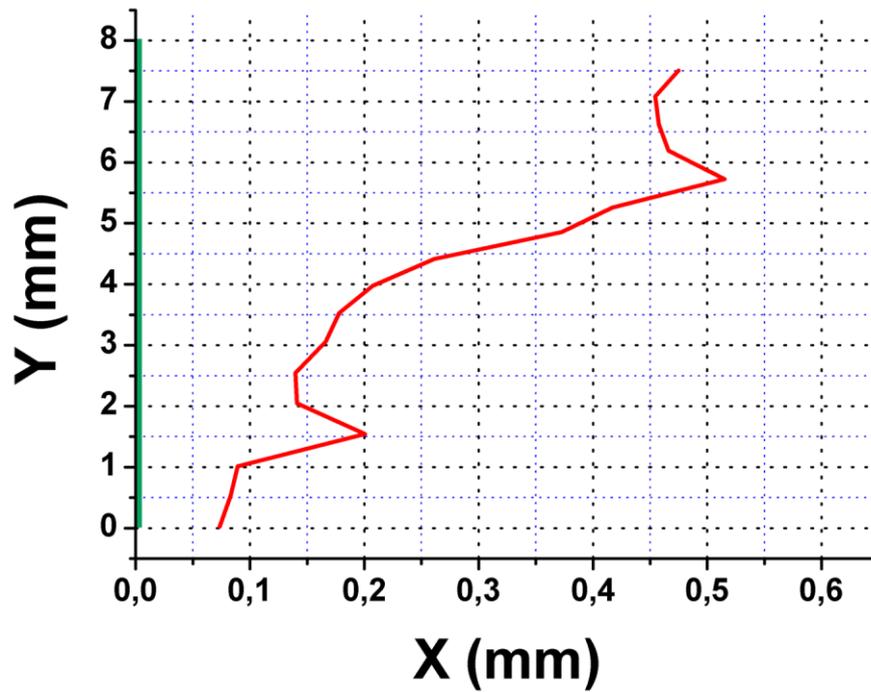


Figura 61 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores positivos da ordenada ampliado.

#### 5.5.4. Resultado 04

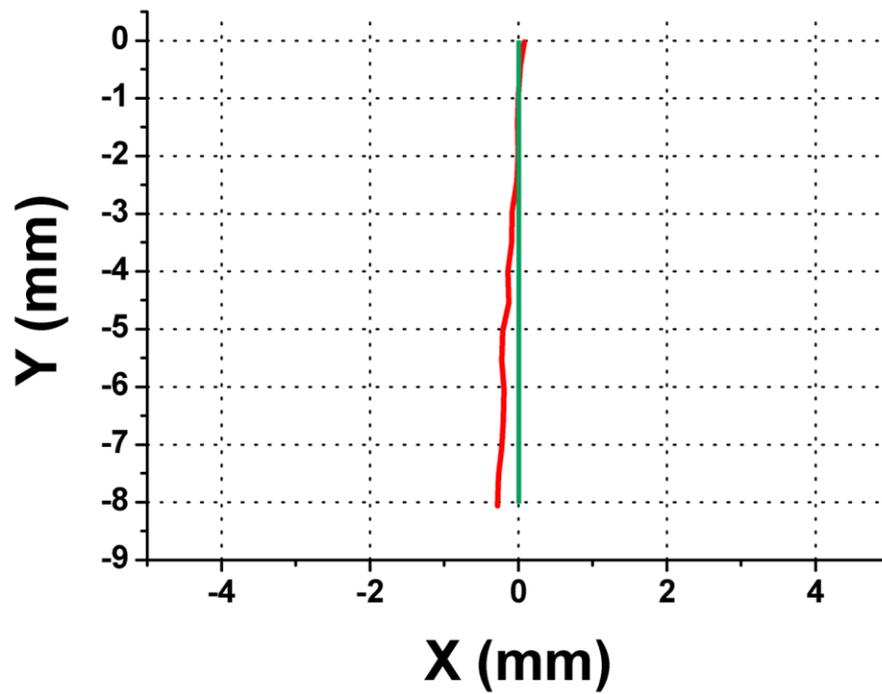


Figura 62 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores negativos da ordenada

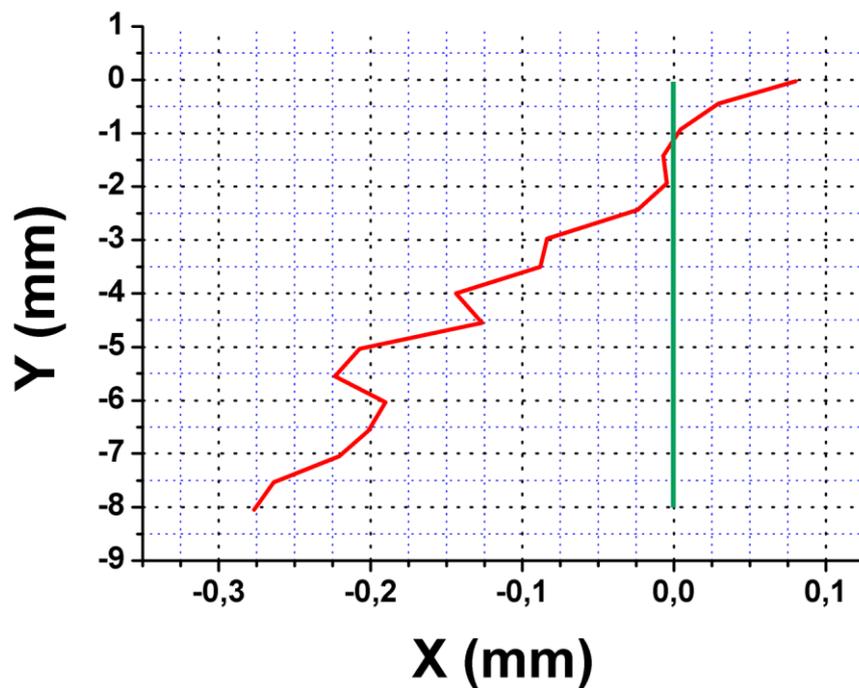


Figura 63 - Deslocamento vertical do feixe de 8mm para valores negativos da ordenada

### 5.5.5. Resultado 05

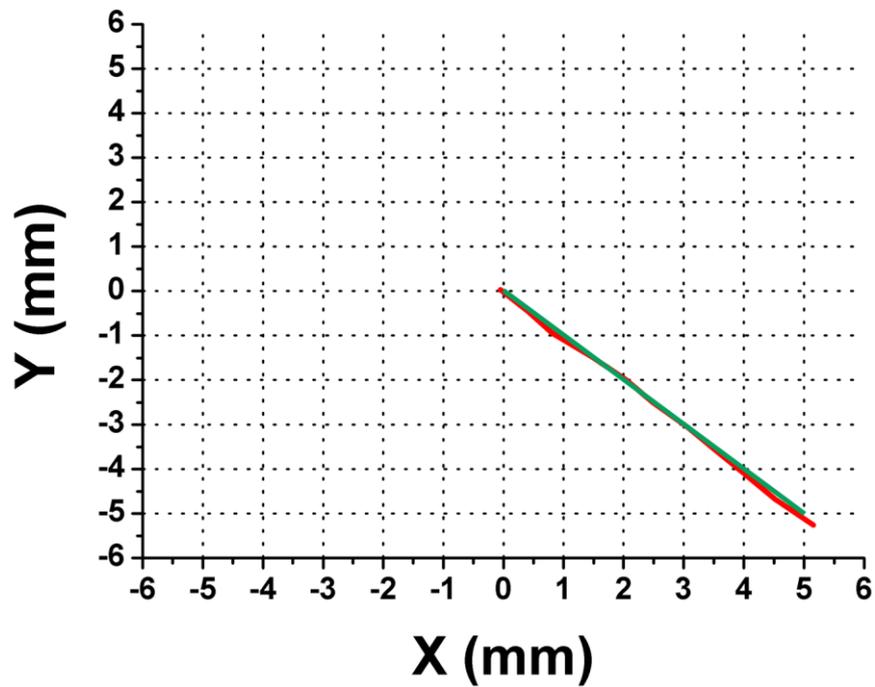


Figura 64 - Deslocamento de 45° em relação aos eixos coordenados até o ponto (5,00, -5,00).

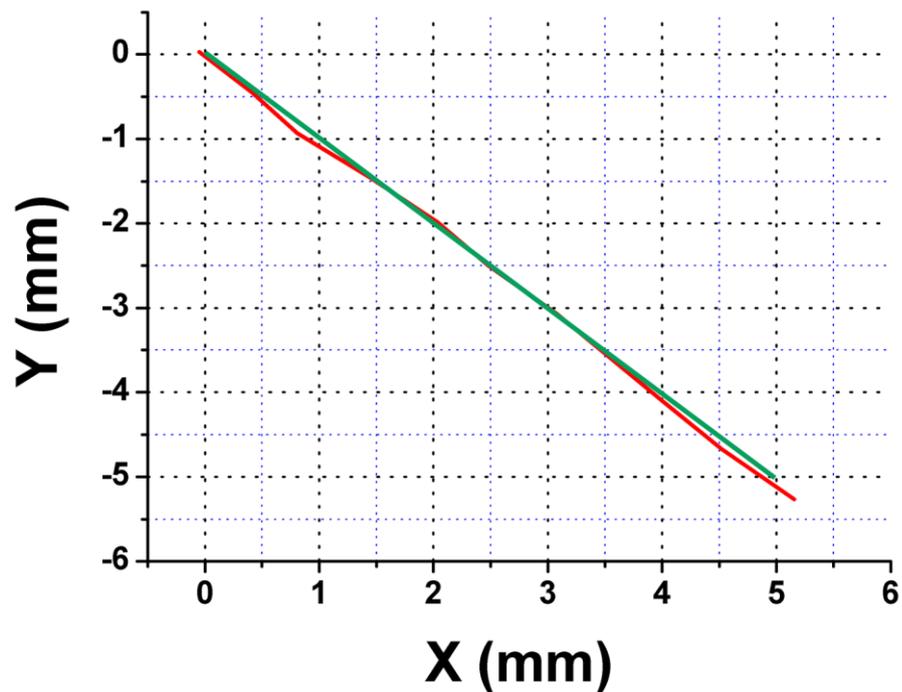


Figura 65 - Deslocamento de 45° em relação aos eixos coordenados até o ponto (5,00, 5,00).

### 5.5.6. Resultado 06

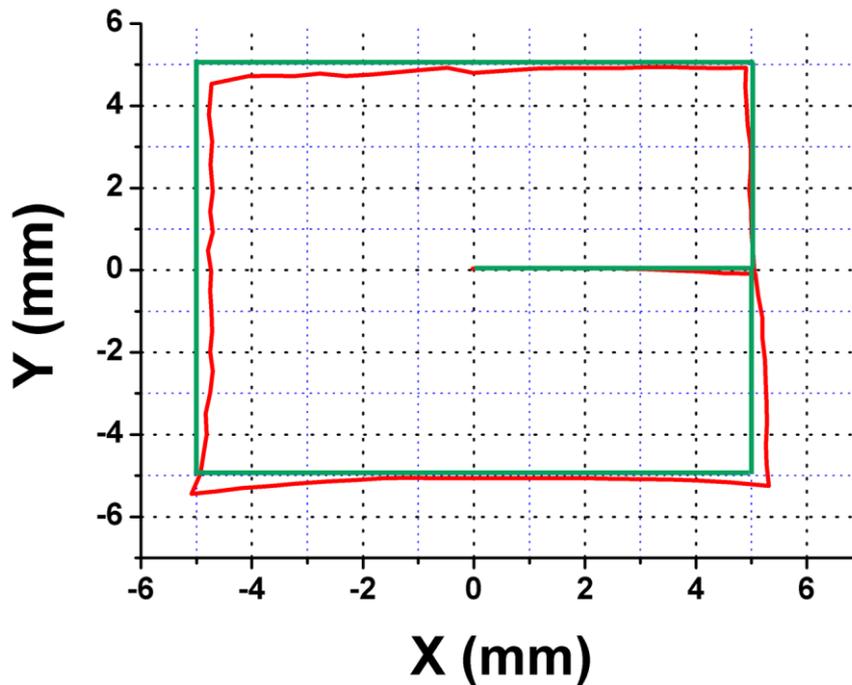


Figura 66 - Deslocamento cobrindo todos os quadrantes na forma de um quadrado de lado 5mm.

## 5.6. Análise dos Resultados

O resultado em vermelho em todas as experiências que foram realizadas é o caminho percorrido pela gaussiana, calculado pelo programa, após obter as informações das tensões de cada fotodetector a cada instante. O caminho em verde é o percurso que, em condições ideais, seria realizado pela gaussiana e calculado pelo código em FORTRAN. Teoricamente, as linhas em vermelho deveriam estar sobre as linhas verdes, entretanto isso não ocorre e alguns fatos devem ser investigados:

- Ruído no sistema de recepção;
- Erro de quantização do conversor analógico digital;
- Luz Ambiente e interferências;
- Aparato experimental.

A corrente de ruído ( $I_{NT}$ ) averiguada no sistema foi vista na Tabela 3 e representará uma tensão de ruído ( $V_N$ ) na saída do circuito de recepção (Tabela 7):

Circuito	Resistência	$I_{NT}$	$V_N$
C <sub>0</sub>	5,98k $\Omega$	930pA	5,56 $\mu$ V
C <sub>1</sub>	5,99k $\Omega$	902pa	5,40 $\mu$ V
C <sub>2</sub>	5,57k $\Omega$	937pA	5,22 $\mu$ V
C <sub>3</sub>	5,73k $\Omega$	923pA	5,29 $\mu$ V

Tabela 7 – Tensão de ruído provocada pelos ruídos shot, térmico e pela corrente de escuro.

O conversor analógico digital usado é de 16 bits e os níveis de quantização foram colocados em um intervalo de medição de 0 a 1V, provocando um erro de quantização de 15,26 $\mu$ V.

No entanto, ampliando parte da Figura 36, onde foi medida a tensão provocada pela intensidade de luz por um período longo de tempo na saída do conversor analógico digital, verifica-se que a tensão tem uma variação de 11mV. Nessa variação estão embutidos os ruídos térmicos e de quantização (Figura 67).

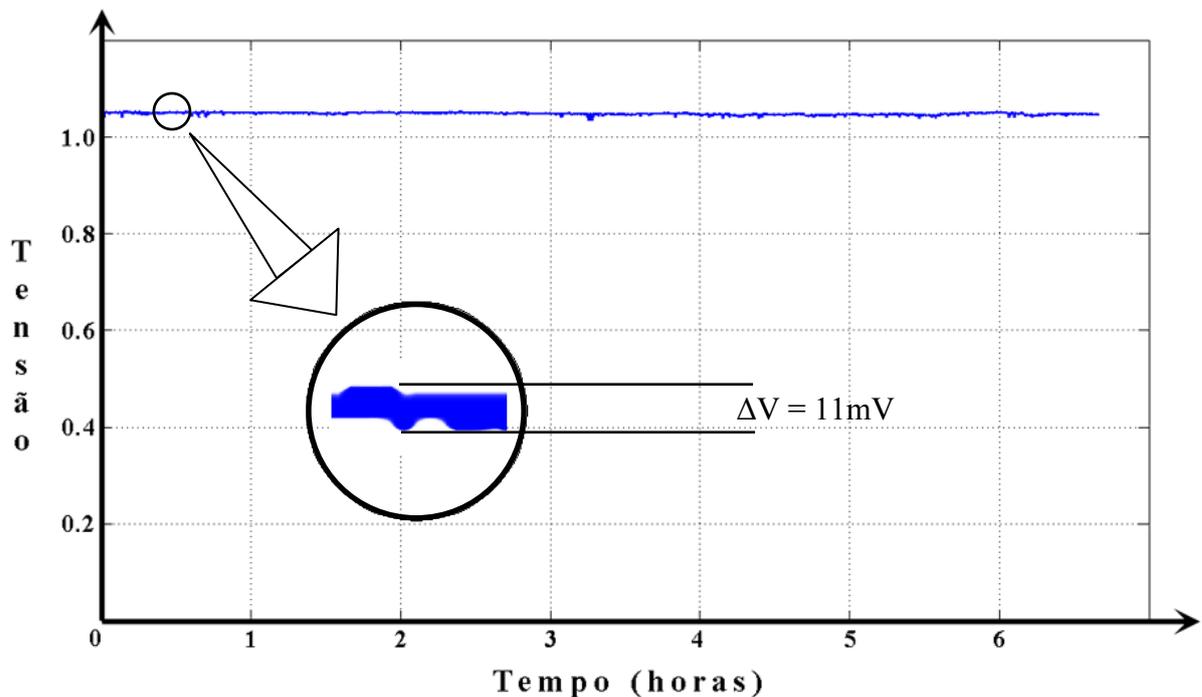


Figura 67 – Erro do sistema de rastreamento do feixe óptico.

Essa variação não é explicada somente pelos ruídos térmicos, *shot*, corrente de escuro e erro de quantização. Os fotodetectores também captam a luz ambiente e essa luz entra no sistema de recepção como um ruído levando a uma incerteza na medida da tensão de 11mV. A progressão de erros provocada pelo ruído pode ser calculada fazendo as derivadas parciais da Equação 5.11:

$$\Delta r = -\frac{W}{2} \frac{\Delta P}{P} (\ln P)^{\frac{1}{2}} \quad (5.11)$$

A Equação 5.11 mostra o erro da distância radial medida de um fotodetector ao centro da gaussiana. Usando os dados do experimento foi calculado o erro no cálculo da posição. Pode ser visto na Figura 68 que o erro varia com a intensidade de luz. Indubitavelmente, quando a gaussiana se desloca, o erro de medição no fotodetector, que recebe a menor luminosidade, aumenta, e, no fotodetector, que recebe a maior quantidade de luz, diminui.

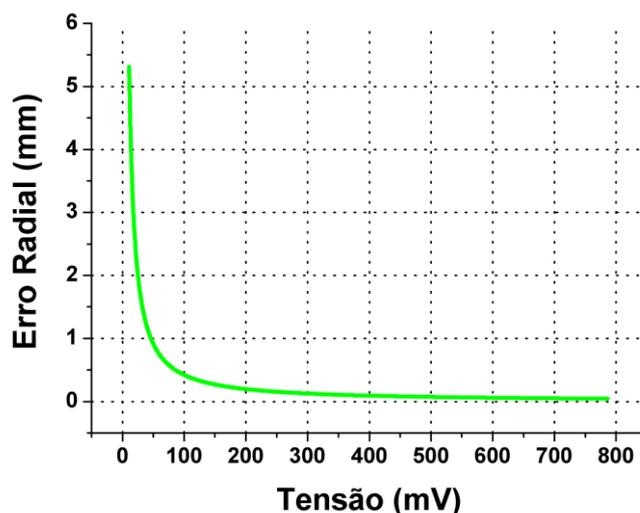


Figura 68 – Erro absoluto de posição provocado pelo ruído no sistema.

Como somente três fotodetectores são usados para calcular a localização da gaussiana, o maior erro possível de cada experiência poderá ser determinado pelo fotodetector que tiver recebendo a menor intensidade de luz em determinado ponto. O critério para o erro máximo pode ser estabelecido para quando a intensidade óptica, em qualquer um dos fotodetectores, cair de um valor de 36% da potência máxima da gaussiana. Pelo gráfico da Figura 68 ou usando a Equação 5.11, o erro máximo do sistema para este critério é de 0,135mm. A posição real da gaussiana, então, estará dentro de um círculo de raio de 0,135mm em torno do ponto calculado pelo programa.

Com o propósito de constatar o efeito do ruído no erro da posição do centro da gaussiana, simulou-se o deslocamento desta sobre uma reta do ponto (-20,-20), até o ponto (20,20) sobre o anteparo contendo os três fotodetectores, conforme visto na Figura 38. Inseriu-se o ruído gerado, computacionalmente, de 11mV em cada fotodetector (Figura 69), e fixou-se como 780mV a tensão máxima dada pelo circuito detector para a máxima potência óptica detectada (centro da gaussiana). Esses dados simulam os dados experimentais.

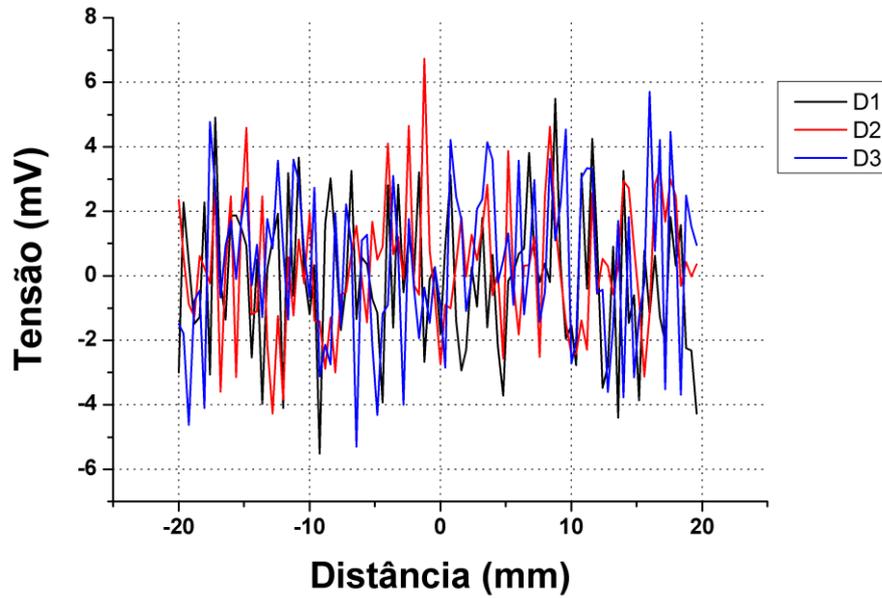


Figura 69 - Ruído de 11mV pico-a-pico, simulado, em cada fotodetector  $D_i$ .

O ruído é inserido nas medidas de potência dos três fotodetectores do anteparo e o programa é usado para resolver o sistema de equações 5.9, para verificar se o mesmo consegue rastrear o caminho simulado na presença do ruído. O resultado desta simulação é visto na Figura 70.

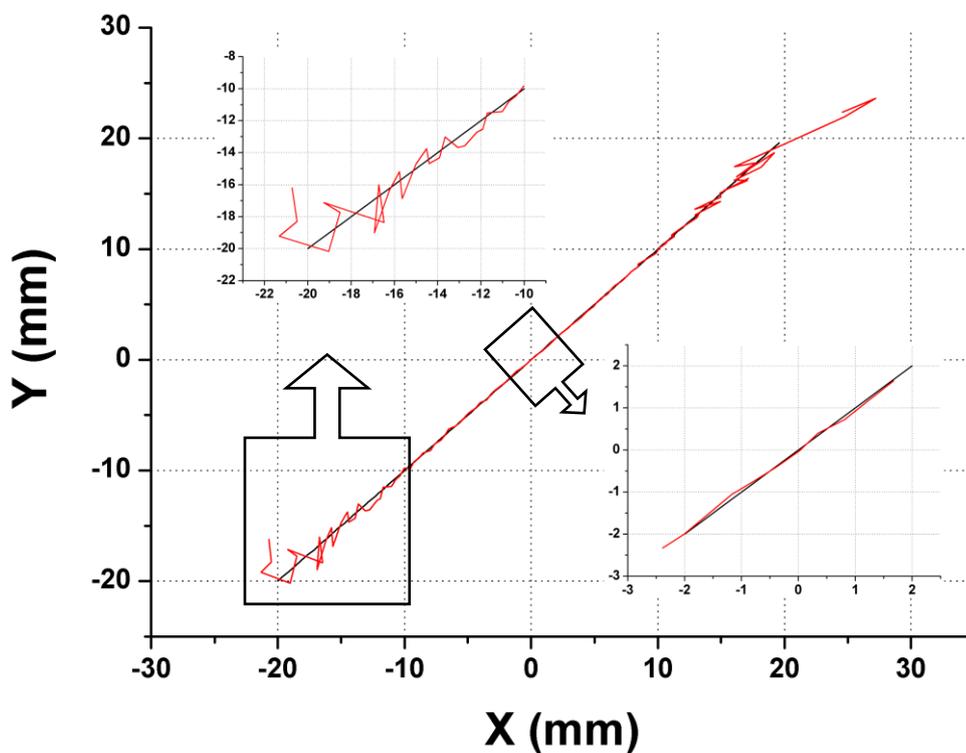
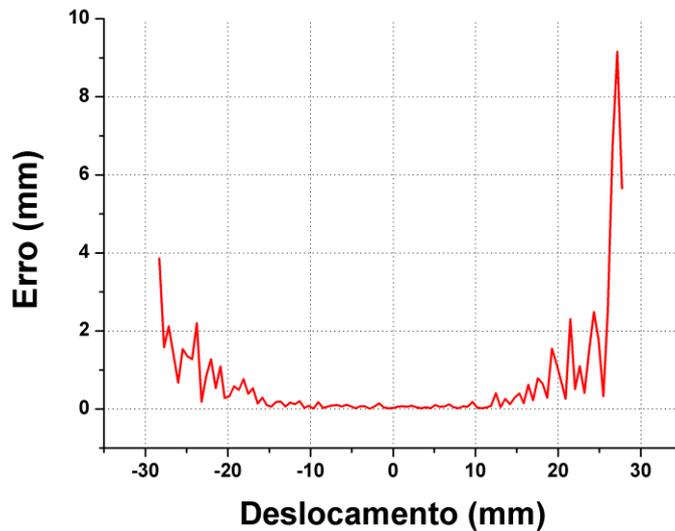


Figura 70 – No gráfico, em vermelho, é mostrado o caminho simulado em presença do ruído. Em preto é mostrado o caminho imposto ao feixe.

Na Figura 70, em preto, é observado o caminho teórico do feixe do ponto (-20, -20) até o ponto (20, 20) e, em vermelho, o caminho calculado pelo programa após inserção do ruído. Pode ser obtido o erro, através da simulação, realizando o cálculo das distâncias entre os pontos da reta simulada sem ruído e da reta calculada com ruído. O erro obtido nessa simulação no cálculo da posição do feixe é mostrado na Figura 71.



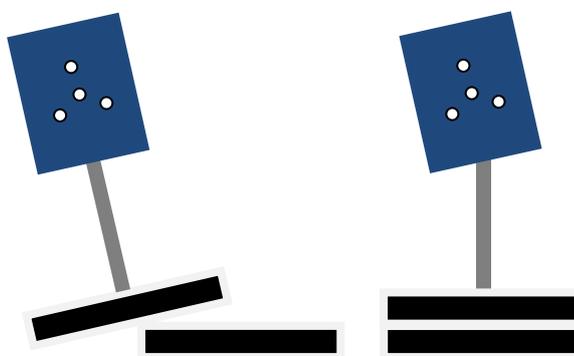
**Figura 71 - Erro absoluto calculado pela diferença entre os gráficos mostrados na Figura 74.**

Pode-se aqui definir a faixa dinâmica do experimento como sendo aquela na qual o erro é menor que um valor pré-definido. Na Figura 71, estabelece-se a faixa dinâmica, região do gráfico em que o erro é menor do que 0,1mm, de -10,00mm até 10,00mm, permitindo, para o arranjo experimental usado, que o feixe possa excursionar dentro de um raio de 10mm com origem no centro do anteparo.

Agora, compara-se o erro absoluto obtido na simulação e apresentado na Figura 71, com aquele obtido analiticamente, a partir da equação 5.11 e evidenciado na Figura 68. Nela, quando a potência em um fotodetector cai de 36% do valor máximo da gaussiana o erro obtido é de 0,135mm. Já na simulação, quando o fotodetector de menor potência acusou queda de 36% do valor máximo da gaussiana, o erro calculado foi de 0,06mm, e não confere com o erro analítico de 0,135mm. Dados recuperados da simulação, não apresentados aqui, mostram que as tensões detectadas registravam os valores de 283, 597,5 e 491,6 mV para os fotodetectores  $D_1$ ,  $D_2$  e  $D_3$ , respectivamente. Essas tensões detectadas, quando usadas na equação 5.10, indicam, respectivamente, um erro radial absoluto de 0,135, 0,060 e 0,073mm. Percebe-se, então, que o erro absoluto cometido pelo programa, ao resolver o sistema de

equações, é determinado pelo fotodetector de maior potência e, conseqüentemente, o menor erro.

No entanto, analisando os resultados pelas Figuras 56-66, observa-se que existe uma tendência da linha vermelha a se afastar da linha verde, à medida que aumenta-se o deslocamento do anteparo na vertical e na horizontal para valores positivos ou negativos. Assim, parece ocorrer um aumento do erro nas medidas, levando ao entendimento que, para grandes graus de turbulência atmosférica, a técnica ou o arranjo experimental não são suficientes. Porém, verificou-se que isso foi provocado pela deflexão dos parafusos micrométricos instalados na base junto com a rotação sobre o próprio eixo do anteparo devido ao peso do mesmo (Figura 72).



**Figura 72 – Deflexão dos parafusos micrométricos instalados na base e rotação sobre o próprio eixo do anteparo com os fotodetectores.**

Levando em consideração que o objetivo é medir a turbulência atmosférica em enlaces ópticos, em que a dança da imagem é provocada por flutuações do índice de refração e não por movimentação do plano do receptor, devido às imperfeições mecânicas, o erro considerado será o discutido anteriormente no valor de 0,1mm, levando a uma faixa dinâmica de movimentação do feixe de 10mm de raio.

Com a intenção de avaliar a capacidade do arranjo experimental, desenvolvido no laboratório, em realizar medidas de turbulência atmosférica, através da determinação da constante de estrutura para o índice de refração, considera-se que o centro do feixe no plano do receptor se desloque harmonicamente no tempo com amplitude de 10mm, como mostra a Figura 73:

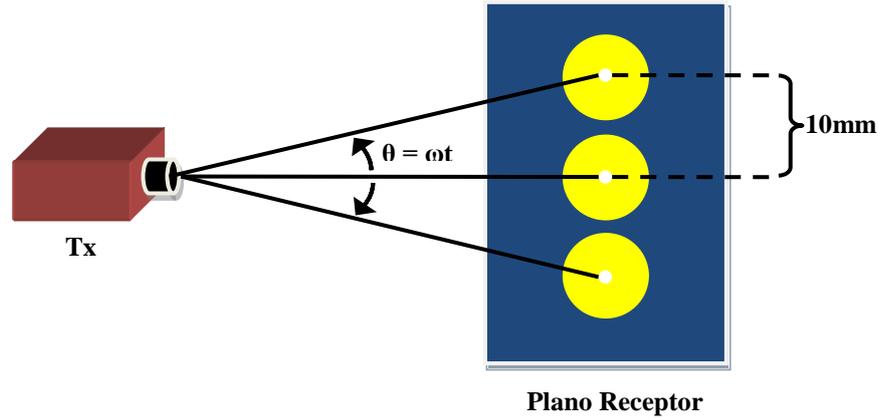


Figura 73 - Ilustração do deslocamento do centro do feixe no plano o receptor de uma amplitude 10mm.

Este movimento harmônico representará um deslocamento radial do centro do feixe na forma de:

$$r_c(t) = 10|\cos(\omega t)| \text{ mm} \quad (5.12)$$

onde  $r_c$  e  $\omega$  são a distância radial do centro do feixe gaussiano ao sistema de coordenadas e a frequência da divagação do feixe, respectivamente. Na divagação do feixe, a frequência do deslocamento do centro da gaussiana é da ordem de 1kHz [14]. Assim, a Equação 5.12 pode ser escrita como:

$$r_c(t) = 10|\cos(2\pi \cdot 10^3 t)| \quad (5.13)$$

Como visto no Capítulo 4, secção 4.1, a variação do índice de refração ao longo do tempo tem média nula, como consequência, a variância radial do deslocamento do centro do feixe ( $\sigma_r^2$ ) é igual à média quadrática do deslocamento do centro do feixe gaussiano ( $\langle r_c^2 \rangle$ ) [24]:

$$\sigma_r^2 = \langle r_c^2 \rangle \quad (5.14)$$

Logo, a variância radial máxima que o arranjo experimental é capaz de medir pode ser determinada substituindo a Equação 5.13 na Equação 5.14:

$$\langle r_c^2 \rangle = \overline{(10|\cos(2\pi \cdot 10^3 t)|)^2} \quad (5.15)$$

$$\langle r_c^2 \rangle = 50\text{mm}^2 \quad (5.16)$$

Em valores RMS (*root mean square*):

$$\langle r_c^2 \rangle_{RMS} = \sqrt{\langle r_c^2 \rangle} \quad (5.16)$$

$$\langle r_c^2 \rangle_{RMS} \cong 7,07mm \quad (5.17)$$

Utilizando a Equação 4.39, pode-se calcular quais os níveis de turbulência atmosférica o experimento, idealmente, conseguiria caracterizar para um enlace de determinado comprimento, para uma variância radial máxima de até  $50mm^2$ . Como no experimento,  $F_0 < 0$  e a distância entre a fonte de luz e o plano do receptor é relativamente pequena, considera-se que a largura da gaussiana medida no anteparo será igual à largura da gaussiana no plano do transmissor. Portanto, como visto no Capítulo 4 e 5, usando a largura da gaussiana ( $W$ ) medida no plano do transmissor de  $15,77mm$  ( $2W_0 = 15,77mm$ ) traça-se um gráfico, a fim de avaliar a constante de estrutura para o índice de refração máxima. As Figuras 74 e 75 relacionam a variância radial efetiva com a turbulência atmosférica máxima para enlaces de 200 até 2000 metros.

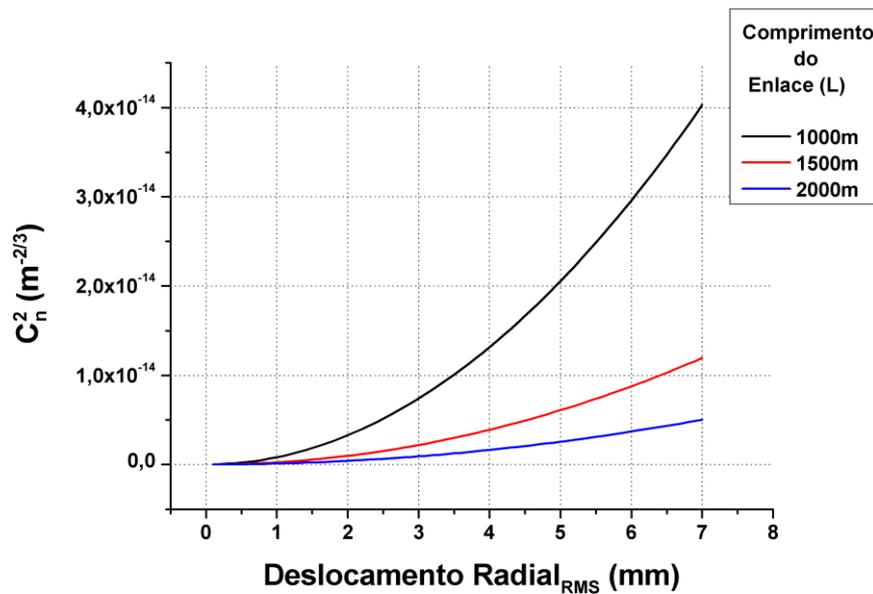


Figura 74 - Turbulência atmosférica devido à variância radial efetiva máxima de até 7mm para enlaces de 1000m, 1500m e 2000m.

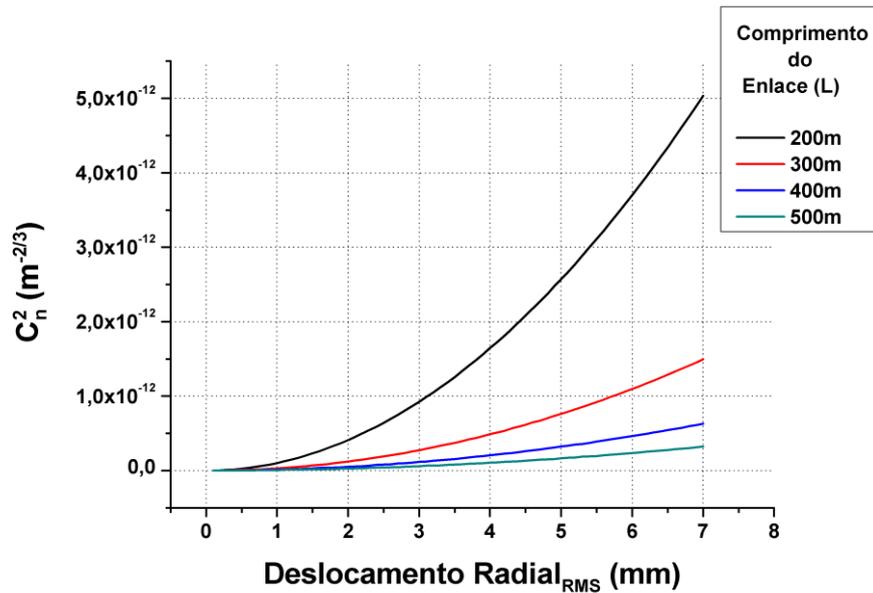


Figura 75 - Turbulência atmosférica devido a variância radial efetiva máxima de até 7mm para enlaces de 200m, 300m, 400m e 500m.

Vale salientar, que está sendo considerado que o ruído de 11mV calculado anteriormente permanece constante, o que provavelmente não corresponde a situações práticas. É importante, também, inspecionar a máxima turbulência atmosférica para uma variância radial efetiva máxima e constante de 7mm em função do comprimento do enlace, que pode ser vista nas Figuras 76 e 77.

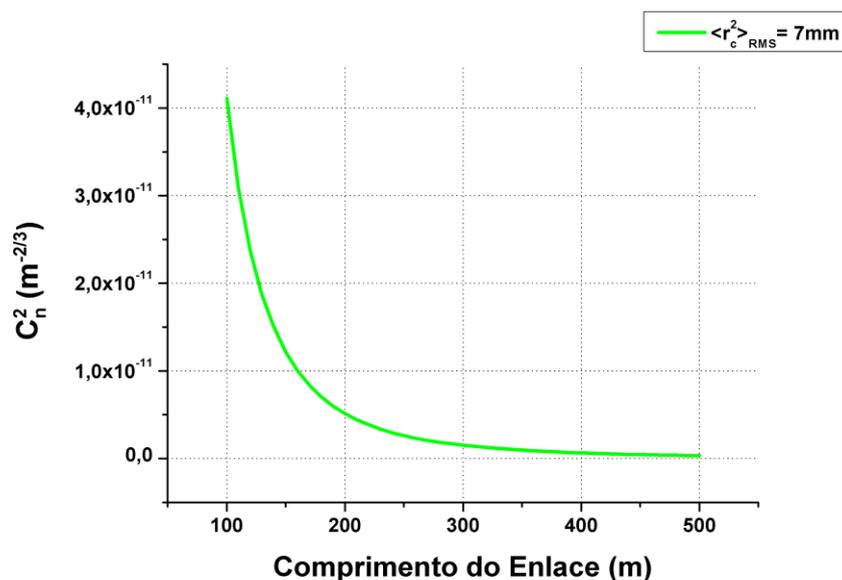
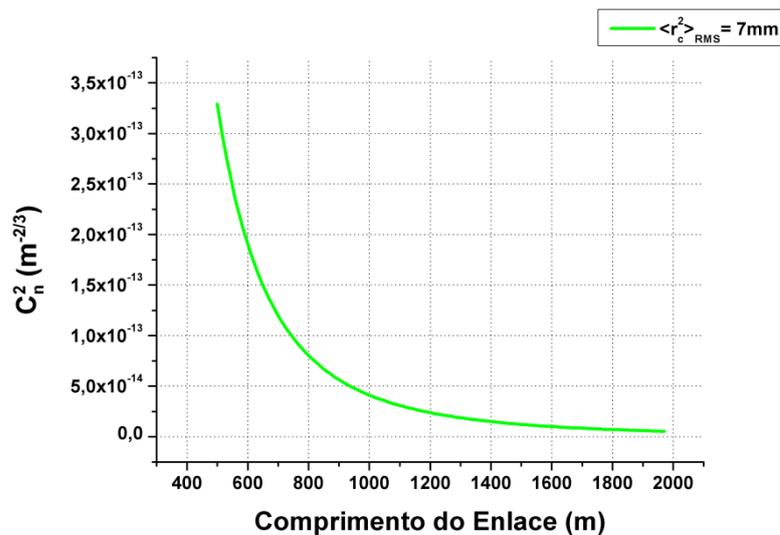


Figura 76 – Turbulência atmosférica máxima em função do comprimento do enlace para uma variância radial máxima efetiva de 7mm.



**Figura 77 - Turbulência atmosférica máxima em função do comprimento do enlace para uma variância radial efetiva máxima de 7mm**

Em suma, para o arranjo experimental criado no laboratório, garante-se, a partir dos gráficos, que é possível medir o deslocamento da gaussiana para determinadas distâncias de um enlace a uma dada condição atmosférica. Assim, retirando os dados numéricos das Figuras 76 e 77, relaciona-se o grau de turbulência atmosférica máxima medida para um determinado comprimento do enlace que o sistema de equações ainda converge, para uma variância radial efetiva de 7mm, como mostra a Tabela 8:

Arbitrariamente, dividiu-se a intensidade da turbulência atmosférica em fraca, média e forte [29-30]:

- Turbulência Fraca:  $C_n^2 \leq 5 \cdot 10^{-16} (m^{-\frac{2}{3}})$
- Turbulência Média:  $5 \cdot 10^{-16} (m^{-\frac{2}{3}}) \leq C_n^2 \leq 1,5 \cdot 10^{-13} (m^{-\frac{2}{3}})$
- Turbulência Forte:  $C_n^2 \geq 1,5 \cdot 10^{-13} (m^{-\frac{2}{3}})$

Turbulência Atmosférica	Distância Máxima (m)
<b>Fraca</b>	mais de 2000
<b>Média</b>	mais de 2000
<b>Forte</b>	650

**Tabela 8- Grau de turbulência atmosférica máxima que o sistema experimental consegue medir em função da distância.**

## Conclusão

Este trabalho de pesquisa apresentou três características fundamentais que serviram, inclusive, de motivação para a sua realização. A primeira, um tanto quanto subjetiva e ideológica é o desafio inerente à pesquisa científica e seus percalços e dificuldades, que trouxeram enriquecimento intelectual e, ao mesmo tempo, uma contribuição para a sociedade. A segunda, não menos importante, é despertar o interesse para os estudos nas comunicações ópticas no espaço livre (FSO), mostrando aspectos positivos e negativos do sistema. E a terceira característica e foco principal do trabalho, foram a demonstração e validação de uma nova técnica para mensurar a turbulência atmosférica em enlaces ópticos horizontais. Nesse terceiro aspecto é que está, de forma mais clara e direta, a contribuição do autor.

Nesta dissertação, se apresentou a óptica no espaço livre e suas vantagens e desvantagens. Além disso, os conceitos básicos dos sistemas que se utilizam dessa tecnologia relatando cada uma das partes envolvidas, tanto na transmissão, quanto na recepção e as devidas importâncias que se deve dar a cada uma delas. Mostram-se as fontes de luz, os fotodetectores, o ruído e algumas formas e dispositivos utilizados para rastreamento do feixe óptico. Na seqüência, os fatores degradantes que, senão contornados, acabam por inviabilizar o uso da tecnologia para a transmissão da informação. Ilustram-se, qualitativa e quantitativamente, cada fator de degradação do sinal óptico e o peso que cada um deles tem no projeto de um sistema óptico.

Estudaram-se com mais profundidade efeitos de cintilação, alargamento do feixe e dança do feixe que são provocados pela turbulência atmosférica que ocorre entre o transmissor e receptor dos sistemas ópticos no espaço livre. Turbulência que, na verdade, são modificações do índice de refração da atmosfera terrestre devido a variações de temperatura, pressão umidade e altura em relação ao nível do mar. Introduziu-se, então, a constante de estrutura para índice de refração que define de forma numérica o grau de turbulência atmosférica em uma dada região geográfica. A constante foi o principal alvo desta dissertação, pois sua caracterização nos define a viabilidade de instalação de um enlace óptico.

Fez-se, também, um estudo do feixe óptico gaussiano, ao se propagar pela atmosfera para conseguir subterfúgios e ferramentas necessárias para a idéia principal do trabalho que é medir a turbulência atmosférica. Especificadamente, descreveu-se o efeito de divagação do feixe de forma qualitativa, através de figuras e quantitativa, através de uma modelagem matemática. Esse efeito de dança da imagem no plano do receptor é medido pela variância

radial do *spot* luminoso em relação ao centro de um eixo coordenado e está diretamente relacionado com a constante de estrutura para índice de refração.

No capítulo 5, a técnica para medir turbulência atmosférica foi apresentada. Assim, usou-se nessa parte, a divagação do feixe como principal foco de investigação para caracterizar a atmosfera terrestre. A técnica mostrada é medir a variância radial de um feixe óptico gaussiano e, conseqüentemente, obter a turbulência pela definição da constante, utilizando-se das equações do capítulo quatro. A técnica culmina matematicamente num sistema de equações não lineares que, solucionado, consegue determinar a posição do ponto de maior intensidade da gaussiana em relação aos eixos cartesianos fixados no plano do receptor. O sistema de equações foi resolvido computacionalmente, por um programa escrito em FORTRAN e testado através de simulações.

Entretanto, as simulações não são suficientes para comprovar e validar a técnica por completo. Então, foi desenvolvido em laboratório um arranjo experimental para que junto ao programa tenha satisfatoriamente a comprovação da técnica. Com o experimento montado, foram realizados vários ensaios experimentais dos quais alguns, de relevância maior, foram publicados neste trabalho.

Inicialmente, tomamos os devidos cuidados para que nenhuma variável externa pudesse influenciar nos resultados e, assim, escurecemos ao máximo o laboratório para evitar luz proveniente de outros lugares, que não da fonte usada, prejudicasse o trabalho. Como o modelo é para um feixe gaussiano, tirou-se uma fotografia do *spot* por garantia e inspecionou-se a potência de saída óptica do *laser* por seis horas, para assegurar a intensidade constante e, assim, não confundir o efeito de cintilação com o efeito de divagação do feixe. Depois foram feitas as movimentações no plano do receptor para simular a divagação do feixe e com as potências ópticas obtidas e inseridas no programa retirou-se a posição da gaussiana a cada instante.

Com os resultados em mãos comprovou-se a técnica proposta e apreciar-se que se consegue avaliar a turbulência atmosférica entre transmissor e receptor de um sistema de comunicação óptico. Pelo rastreamento do feixe óptico determinou-se a variância radial e, por conseguinte, a constante de estrutura para o índice de refração. No entanto, além disso, procurou-se fazer uma análise do erro provocado pelo ruído observado no sistema. Ruído este, proveniente de luz ambiente e dos fotodetectores utilizados. Para analisar o ruído, simulou-se por *software* um ruído compatível com o encontrado e se fez uma divagação do feixe de forma radial por um comprimento maior do que a largura média da gaussiana usada no experimento.

Com o ruído e a movimentação simulados, resolveu-se o sistema de equações e estabeleceu-se a faixa dinâmica do sistema implementado. Para complementar, relacionaram-se o experimento, os resultados e todo o aparato com graus de turbulência atmosférica diferentes para conhecer as limitações e percebeu-se que, com o aumento da turbulência atmosférica para uma dada distância, o sistema pode não conseguir realizar o monitoramento e determinar a constante.

Além de turbulência atmosférica, vislumbram-se outras aplicações para a técnica proposta. Resumindo o que foi feito: um dispositivo capaz de rastrear um feixe óptico gaussiano. Diante disso, o equipamento pode ser utilizado para monitorar vibrações mecânicas à distância. Também, pode ser adicionado à técnica uma mecânica nas cabeças dos sistemas de comunicação para realinhamento do feixe óptico, a medida que o feixe se afasta dos fotodetectores, aumentando assim a eficiência da comunicação.

Entretanto, alguns avanços podem ser feitos para melhorar o desempenho e outros experimentos com uma maior complexidade também podem ser realizados. Para melhoria, é interessante modificar a forma de movimentação do anteparo para sanar o problema de deflexão dos parafusos micrométricos e o aumento do erro da medida, por conseguinte. O anteparo pode ser um pouco mais leve e com uma mecânica mais precisa para evitar a rotação sobre o seu eixo central.

Enfim, fica como sugestão para trabalhos futuros uma medida dinâmica do rastreamento do feixe. Ou seja, movimentar o anteparo, ou a fonte de luz de maneira automatizada e conhecida e recolher, ao mesmo tempo, a posição do feixe em tempo real. Interessante também é colocar o aparato experimental dentro de uma câmara onde se possa ter o controle da temperatura, pressão, umidade e velocidade do vento com a intenção de simular situações climáticas diversas e mudar com controle níveis de turbulência atmosférica. Após, ou concomitantemente, fazer medidas em campo com sistemas de óptica do espaço livre.

## Bibliografia

- [1]. DILHAC, J. M. *The Telegraph of Claude Chappe – an optical telecommunication network for the XVIIIth century*. Invited Paper. IEEE Conference on the History of Telecommunications, Saint Jean (Canada), 7p., 25-27 Juillet 2001.
- [2]. BELL, A. G. *On the Production and Reproduction of Sound by Light*. American Journal of Sciences, Third Series, vol. XX, #118, October 1880, pp. 305 – 324.
- [3]. MAIMAN, T. H. *Stimulated optical radiation in ruby*. Nature 187 (4736): 493–494, 1960.
- [4]. KUBE, E. *Information transmission by light beams through the atmosphere*. Nachrichtentechnik Journal, Berlim (Alemanha), vol. 6, June 1968, p. 201-207.
- [5]. CANON, INC. *Canobeam DT-100 Series*. Disponível em: [http://www.canon.com/bctv/canobeam/data\\_dt-100.html](http://www.canon.com/bctv/canobeam/data_dt-100.html). Acesso em: 11 de março de 2009.
- [6]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TELECOMUNICAÇÕES. *O Desempenho do Setor de Telecomunicações no Brasil, Dezembro de 2008*. Disponível em [http://www.telebrasil.org.br/saibamais/O\\_Desempenho\\_do\\_Setor\\_de\\_Telecom\\_Séries\\_Temporais\\_3T08\\_dez\\_10\\_2008.pdf](http://www.telebrasil.org.br/saibamais/O_Desempenho_do_Setor_de_Telecom_Séries_Temporais_3T08_dez_10_2008.pdf). Acesso em: 25 de novembro de 2008.
- [7]. SAKARI, L. S. *Design and Analysis of an All-optical Free-space Communication Link*. Suécia: Linköping University, 2002. 93 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Ciência e Tecnologia, Norrköping, 2002.
- [8]. LOVE, G. D. et al. *Horizontal turbulence measurements using SLODAR*. Proc. SPIE 5891, 27-32 (2005).

- [9]. JIMÉNEZ, Carlos. *Understanding the atmospheric turbulence structure parameter,  $C_n^2$ , in the littoral regime*. Porto Rico: Universidade de Porto Rico, 2006. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Física, Mayagües Campus, 2006.
- [10]. KAZAURA, K. et al. *Enhancing performance of next generation FSO communication systems using soft computing-based predictions*. OSA Optics Express, 2006. Vol. 14, nro 12, pp. 4958-4968.
- [11]. SHEIKH MUHAMMAD, S.; KÖHLDORFER, P.; LEITGEB, E. *Channel Modeling for Terrestrial Free Space Optical Links*. IEEE-Konferenz ICTON 2005. (2005), S. 407 – 410.
- [12]. SITEK ELETROC OPTICS. Disponível em: <http://www.sitek.se>. Acesso em: 24 de novembro de 2008.
- [13]. W BOUCHET, O. et al. *Free-Space Optics*. Estados Unidos da América: ISTE Ltd, 2006.
- [14]. WILLEBRAND, H. *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Estados Unidos da América: Sams Publishing, 2001.
- [15]. LIGHTPOINTE. FlightStrata HD. Disponível em: [http://www.lightpointe.com/products/fs\\_hd.cfm](http://www.lightpointe.com/products/fs_hd.cfm). Acesso em: 13 de setembro de 2008.
- [16]. KEISER, Gerd. *Optical Fiber Communications with CD-ROM*. McGraw-Hill Science Engineering, New York, 1999.
- [17]. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. Law Offices of John e. Wagner – *Free Space Communication System With Common Optics and Fast, Adaptive Tracking*. MOK, Fai; WALLACE, Kent; Estados Unidos da América patente; US 2004/0208595 A1. 21 de outubro de 2004.
- [18]. ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. *Terabeam Corporation – Multi-Aperture Holographic Optical Element for Illumination Sensing in a Free Space Optical*

*Communication System*. PLETT, Mark L.; Estados Unidos da América patente; US 6,661,546 B1. 9 de dezembro de 2003.

- [19]. SEGATTO, J. V. Geraldo. **Modelamento e Análise de Desempenho de Sistema de Transmissão Óptica pela Atmosfera**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 1996.
- [20]. BANDERA, Pablo. Defining a Common Standard for Evaluating and Comparing Free-Space Optical Products. Disponível em: [http://www.fsona.com/tech/white\\_papers/WHTPAP-Generalized\\_Link\\_Margin.pdf](http://www.fsona.com/tech/white_papers/WHTPAP-Generalized_Link_Margin.pdf). Acesso em: 27 de dezembro de 2008.
- [21]. JIA, Z.; ZHU, Q.; AO, F. *Atmospheric attenuation analysis in the FSO link*. Proceedings of the Eighth International Conference on Communication Technology. IEEE, 2006.
- [22]. HUDSON, R. D. *Infrared system Engineering*. Capítulo 4, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1969.
- [23]. COLVERO, C. P.; CORDEIRO, M. C. R.; VON DER WEID, J. P. *FSO systems: Rain, drizzle, fog and haze attenuation at different optical windows propagation*. Microwave and Optoelectronics Conference, 2007.
- [24]. ANDREWS, L. C.; PHILIPS, R. L. *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE Press, 2005.
- [25]. LAWRENCE, R.; STROHBEHN, J. W. *A Survey of the Clear-air Propagation Effects Relevant to Optical Communication*. Proceeding of the IEEE, Vol 58, #10, Outubro 1970.
- [26]. DEITZ, P. H.; WRIGHT, N. J. *Saturation of Scintillation Magnitude in Near-Earth Optical Propagation*. J. Optical Society of America, Vol 59, #5, MAio 1969.

- [27]. NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. *ImageJ*. Disponível em: <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2008
- [28]. LIFE PIXEL. *Infrared Conversion*. Disponível em: <http://www.lifepixel.com/ir-tutorials/canon-powershot-g3-digital-infrared-conversion-instructions.htm>. Acesso em 15 de Janeiro de 2008.
- [29]. FRIED, D. L.; MEVERS, G. E.; KEISTER, M. P. *Measurements of Laser-Beam Scintillation on the Atmosphere*. J. Optical Society of America, Vol 57, #6, Junho 1967.
- [30]. ANDREWS, L. C.; PHILIPS, R. L.; YU, P. T. *Optical Scintillations and Fade Statistics for a Satellite-Communication System*. Applied Optics, Vol 34, # 33, Novembro 1995.

## **ANEXOS**

## I. Trabalho Publicado Referente ao Tema

Trabalho publicado no IWT 2009 (International Workshop On Telecommunication 2009) realizado na cidade de São Paulo.

# Experimental Development of a New Technique To Measure Atmospheric Turbulence in Horizontal Optical Links Through Free Space

Vinicius Nunes Henrique Silva  
Universidade Federal  
Fluminense  
Phone: (21) 2629 – 5723  
Niterói – RJ - Brazil  
[vinidelsilva@terra.com.br](mailto:vinidelsilva@terra.com.br)

Dr. Andrés Pablo Lopéz Barbero  
Universidade Federal  
Fluminense  
Phone: (21) 2629 – 5723  
Niterói – RJ - Brazil  
[pablo@telecom.uff.br](mailto:pablo@telecom.uff.br)

Dr. Ricardo Marques Ribeiro  
Universidade Federal  
Fluminense  
Phone: (21) 2629 – 5723  
Niterói – RJ - Brazil  
[rnr.rlk@terra.com.br](mailto:rnr.rlk@terra.com.br)

**Abstract**— In this paper a new technique to measure the atmospheric turbulence in horizontal optical links is presented. The technique uses the direct measurement of the beam wander effect to determine the refractive index structure constant ( $C_n^2$ ) to evaluate the turbulence for a specific path. The mathematical theory and the experimental setup to demonstrate the new technique are described in this work.

**Index Terms**— Atmospheric Turbulence, Beam Wander, Refractive Index Structure Parameter, Free Space Optics.

## INTRODUCTION

Free Space Optics is a high bit rate technology that uses an optical wave carrier to transmit data through the atmosphere. High security, great mobility, low cost (when compared with confined optical communication systems) and free of electromagnetic interference are important features of FSO systems [1]. Because the worldwide demand for bandwidth and the last mile bottleneck, FSO has emerged as a viable point-to-point technology. However, FSO is subjected to atmospheric effects that can degrade the optical beam then reducing link viability. Beam obstruction, scattering, light absorption, atmospheric turbulence and weather conditions (rain, snow, fog) have to be mitigated to avoid excessive signal deterioration [2]. Weather changing has been observed around the world due to pollution increase and atmospheric turbulence levels ought to be measured. Methods to determine atmospheric turbulence in optical links was made using the correlation functions displacement of thin parallel beams and with a modulated interferometer to produce Doppler beats between a reference beam and one reflected plane mirror at a distance [3-4]. Commercial equipments to measure the atmospheric turbulence are already available [5]. This paper proposes and develops a new technique and a low cost related device to determine the atmospheric turbulence based on direct measurement of beam wander, tracking the optical beam at receiver plane.

The research objective is measurement of the refractive index structure constant ( $C_n^2$ ) of the medium using the turbulence effect. The medium characterization is done by the measurement of the radial beam variance due to beam wander and then evaluate  $C_n^2$  to consequently know the atmospheric turbulence level that a specific free space optics link.

## ATMOSPHERIC TURBULENCE

The heated surface of the earth may warm air pockets around it. Heating the air makes changes on the refractive index of the medium. This is because the refractive index of air is dependent upon its temperature. The heated air pockets increase in size and mix with cooler air up above leading to a heterogeneous and turbulent medium. The interaction of the laser beam with the turbulent medium leads to signal degradation and can be observed as random deviation of wave characteristics such as: power distribution, propagation direction and phase of the electrical field. This may cause three effects in reception: scintillation, beam wander and beam

spread. Hence, it is commonly reported in the literature the use of the refractive index structure constant ( $C_n^2$ ) to quantify atmospheric turbulence and the relation with the effects described elsewhere [6]. The beam wander is the randomly displacement of the instantaneous center of the beam (“hot spot”) in the receiver plane, as shown in Figure 1. Thus, can be calculated using the weak fluctuation theory [7]. For a collimated Gaussian beam propagating through atmospheric turbulence, the rms displacement of the beam hot spot,  $\sigma_r$ , is defined [7-8] according to equation (1)



Figure 78 – The Beam Wander Effect

$$\langle \sigma_r^2 \rangle = 2,42 C_n^2 W_0^{-1} L^3 \quad (1)$$

where  $L$  is the link distance and  $W_0$  the Gaussian width at the transmitter plane.

### THE PROPOSED TECHNIQUE

An experimental set-up in laboratory was designed to validate the  $C_n^2$  measurement of the proposed technique as shown in Figure 2. The technique consist to place three photo-detectors ( $D_i$ ) in the receiver plane, where  $i = 1,2,3$ . Also, it ought to be known the relative position ( $x_i, y_i$ ) of each photo-detector. The incident optical power ( $P_i$ ) onto the effective area of each photo-detector should be measured. Hence, the calculation of the optical beam instantaneous center position ( $x_0, y_0$ ) is carried out after the measurement of the light power in each photo-detector. Let's assume a transmitted and received Gaussian light beam pattern (see Figure 2 and Figure 3), which can be mathematically stated as:

$$P(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} \quad (2)$$

where  $r$ ,  $W$  and  $P_0$  means the radial distance to the center of the beam, the Gaussian beam-width and the power at center of the beam, respectively.

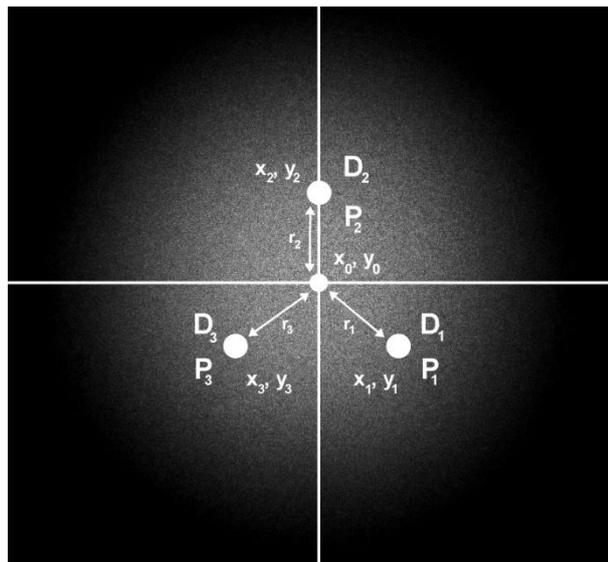


Figure 79 – Geometry of the receiver plane comprising its center and three photo-detectors with their coordinates. An image of a Gaussian-shaped optical beam is superimposed (see also Figure 4).

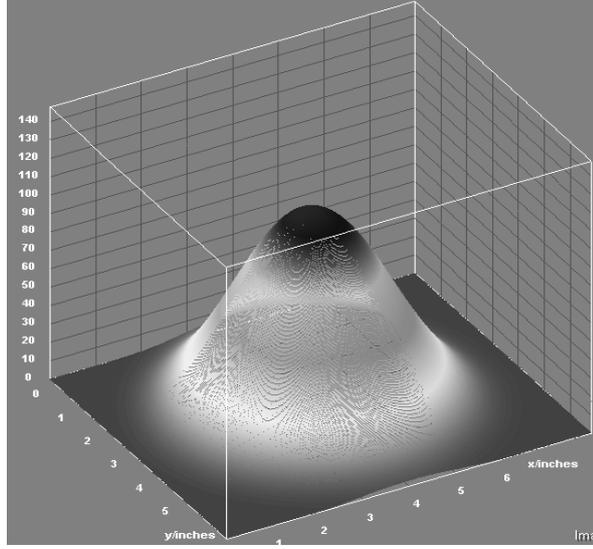


Figure 80 – The 3D pattern plot drawn from 2D contour plot of Figure 2 achieved by using ImageJ software.

After measuring the optical power  $P_i$ , the radial distances  $r_i$  of each photo-detector to the center of the beam  $(x_0, y_0)$ , can be calculated from (2) as:

$$r_i^2 = W^2(-\ln \bar{P}_i) \quad (3)$$

where  $\bar{P}_i = \frac{P_i}{P_0}$  is the normalized power.

The transformation equation from Cartesian to cylindrical coordinates is well known and is written as (4):

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (4)$$

After substituting (3) in (4) the central position of the beam can be found solving the equation system:

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_1) = 0 \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_2) = 0 \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_3) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

#### EXPERIMENTAL SETUP

The experimental set-up used in a Laboratory environment aiming to carry out measurements of the  $C_n^2$  structure factor as shown in Figure 4.

A HiBi pigtailed laser diode (LD) emitting at 980nm is the light source. Because the output power distribution of the HiBi fiber isn't a circular Gaussian beam, it was spliced with a standard (STD) optical fiber with cut-off wavelength at 1300nm. The LD is powered by a Newport current source model 5030 and cooled by ILX Light Wave LDT-5525 temperature controller. A fiber modal filter (MF) is used to eliminate the high-order and the cladding modes and guarantee a circular Gaussian-shaped light that impinges onto the photo-detectors plane (Di). The light beam propagates through free-space up to reach the photo-detectors (Di). The distance between the light source (output of the standard optical fiber) and the photo-detectors plane is 21cm. An analog-to-digital converter (ADC) digitalizes the electrical signal generated from the incident optical power in each photo-detector and sends the data to a personal computer. The later can solves the equation system (5).

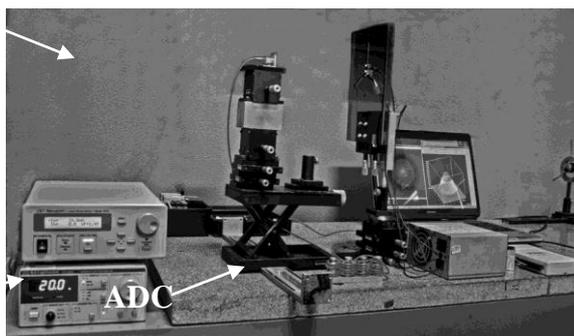


Figure 81 – The experimental Set Up – LD is the Laser Diode, MF is the Modal Filter, ADC is the Analogue-to-Digital converter and Detect is the photo detectors plane

## RESULTS AND DISCUSSIONS

In order to simulate the beam shifts caused by the beam wander effect, the photo-detectors receiver plane was freely to move horizontally and vertically by means of an attached micrometric precision translation stage. In this experiment the receiver plane was shifted to draw a triangular picture with 5.0mm base and height. The achieved results can be seen in Figure 5. The dotted gray line means the movement done by the micrometric translation stage. The black line means the calculated coordinates after the measurements of the optical intensity and solving the equation system (5), as previously described.

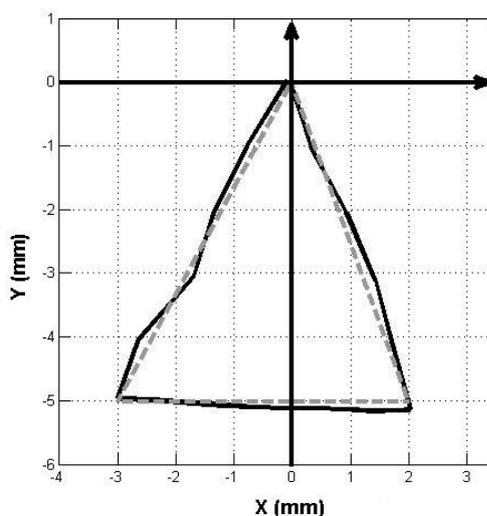


Figure 82 – Triangular patterns followed by the optical beam – the dotted gray line traces the applied movement and black line traces the coordinates as measured /calculated by the present device.

The largest distance between the gray line and black line is the error measurement for the worst case. The error is computed 0.2mm. It is straightly related to the experimental signal to noise ratio. The experimental results are in quite agreement with “theoretical” values acquired directly from the micrometer translation stage. Hence, the proposed technique is able to measure the atmospheric turbulence using Equation 1 that permits to calculate de refractive index structure constant, through the tracking of the beam in the receiver. conclusion and future suggestions

It was presented that the technique is capable to measure the atmospheric turbulence tracking the optical beam at receiver plane. Moreover, the device can be integrated to a FSO system to measure the local turbulence or/and to track the optical signal. The aim is to check the installation viability and to monitor the signal quality along the time, mapping the atmospheric turbulence profile in that region thus forecasting future undesired random effects. Furthermore, the technique allows a mechanical device to be attached on the transmitter in order to mitigate the consequences of the turbulence improving the FSO performance. It has been seen that our technique, concerning the optical tracking of the beam, can be used to monitor vibrations and displacements in structures in general. [9].

## REFERENCES

- [1] L. S. Fredrik, *Design and Analysis of All-optical Free-space communication Link*. Linkopings Universitet, 2002
- [2] C. P. Colvero, M. C. R. Cordeiro and J. P. von der Weid, "FSO Systems: Rain, Drizzle, Fog and Haze Attenuation at Different Optical Windows Propagation". *International Microwave & Optoelectronics Conference*, 2007.
- [3] C. Anna, O. Kevin, "Measuring the inner scale of atmospheric turbulence by correlation of lateral displacement of thin parallel laser beams". *Waves in Random Media* 3 (85-92), UK, 1993.
- [4] I. Goldstein, P. A. Miles and A. Chabot, "Heterodyne Measurements of Light Propagation through Atmospheric Turbulence". *IEEE Proceedings*, vol. 53, no. 9, p. 1172, 1965
- [5] OSI – Optical Scientific, Inc. [online]. Available at Internet via WWW. URL: <http://www.opticalscientific.com/LOA-005%20Features.htm>. (Last visit: 24/11/2008).
- [6] C. Carlos, *Understanding the atmospheric turbulence structure parameter,  $C_n^2$* . Universidade of Puerto Rico, 2006.
- [7] L. C. Andrews, R. L. Philips, *Laser Beam Propagation through Random Media*. Spie Press, 2005.
- [8] W. Heinz, G. Baksheesh, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Sams, 2001.
- [9] Sitek Eletroc Optics. [online]. Available at Internet via WWW. URL: <http://www.sitek.se/>. (Last visit: 24/11/2008).

## II. Trabalhos Publicados Correlacionado ao Tema

- RIBEIRO, M. Ricardo; SILVA, N. H. Vinicius; BARBERO, P. L. Andres. **Material Dispersion Interplay with Spectral Filtering on Plastic Optical Fibre (POF) Links**. Microwave and Optical Technology Letters.
  
- RIBEIRO, M. Ricardo; SILVA, N. H. Vinicius; BARBERO, P. L. Andres. *Spectral Filtering Effect For Visible Wavelength Channels Propagating Along PMMA Optical Fibre Links*. 16th International Conference on Plastic Optical Fibers, Turin 2007.
  
- RIBEIRO, M. Ricardo; SILVA, N. H. Vinicius; BARBERO, P. L. Andres. *Material Dispersion and Their Interplay With Spectral Filtering on PMMA Plastic Optical Fibre Links*. 16th International Conference on Plastic Optical Fibers, Turin 2007.
  
- RIBEIRO, M. Ricardo; SILVA, N. H. Vinicius; BARBERO, P. L. Andres. *Beam Profiling Measurements Of Far-Field From Plastic Optical Fibre Passive Devices*. 16th International Conference on Plastic Optical Fibers, Turin 2007.
  
- RIBEIRO, M. Ricardo; et al. *Excess Loss and Modal Noise Generated by Spectral Filtering Effect on Visible Wavelength Channels Propagating Along Plastic Optical Fibres (POFs)*. Momag, Santa Catarina 2008.