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

## NELSON CEVIDANES NASCIMENTO DE ASSIS

## Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude

NITERÓI

2012

## Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude

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

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Andrés Pablo Lopez Barbero

## NITERÓI

#### NELSON CEVIDANES NASCIMENTO DE ASSIS

Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações e aprovada em sua forma final pelo Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense.

Niterói, 15 de Junho de 2012.

Professor e orientador Andres Pablo Lopez Barbero, Dr. Universidade Federal Fluminense

> Prof. Alexandre Bessa dos Santos, Dr. Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Ricardo Marques Ribeiro, Dr. Universidade Federal Fluminense

# DEDICATÓRIA

Gostaria de dedicar a Deus, primeiramente, pela oportunidade. Pela oportunidade de estar me desenvolvendo. Pela oportunidade de também contribuir. Pela oportunidade de conhecer novas pessoas que, não por obra do acaso, cruzaram meu caminho, e as quais pude conhecer seus interiores. Pela contribuição,... seja ela positiva ou negativa que elas deram,... não importa, o que importa é a contribuição, da qual tirei certamente algum ensinamento.

À minha Mãe, pelo simples fato de me trazer ao mundo. Pessoa a qual devo todo meu carinho, afeto e amor. Pessoa que me apoiou integramente nas decisões, certas ou erradas,...

Mãe, Obrigado.

## **RESUMO**

Este trabalho visa o estudo e o desenvolvimento de uma técnica para se determinar o grau de turbulência atmosférica, que é causador de perturbações na frente de onda óptica de sistemas de comunicação em espaço livre.

Certo de que influências mecânicas poderiam contribuir negativamente na performance do enlace óptico, por exemplo: ventos, movimento da estrutura do prédio, vibrações devidas à utilização de elevadores, e entre outras. Estas não serão, ainda, abordadas neste trabalho, onde, para se atestar o seu objetivo, foram feitas simulações em laboratório, de forma controlada, para que se pudesse obter um resultado confiável.

O experimento visa modelar unicamente a variação transversal de um feixe de luz em relação a um plano, dito de recepção.

Na técnica aqui em desenvolvimento, através do método de triangulação por amplitude de sinal, para se determinar o grau de turbulência atmosférico, além do tamanho do enlace e da imagem projetada no plano é considerada a movimentação radial do feixe em questão.

No decorrer das atividades em laboratório foram colocadas questões pertinentes à eficiência do sistema. Questões estas que estão relacionadas com o quanto o sistema era preciso, atuação com relação a faixa de trabalho do sistema, robustez.

Sendo assim, os resultados obtidos experimentalmente comparados com os resultados obtidos através de simulação numérica.

Palavras-chave: Turbulência Atmosférica, Sistema de rastreamento, Triangulação por Amplitude, divagação de feixe, *Free Space Optics*, FSO.

## ABSTRACT

This work aims at studying and developing a technique to determine the degree of atmospheric turbulence, which is causing disturbances in the wavefront optical communication systems in free space.

Certain mechanical influences that might contribute adversely the performance of the optical link, for example winds, movement of the structure of the building, vibrations due to the use of elevators, and so on. These are not also addressed in this work, where, to attest its purpose, simulations were made in the laboratory in a controlled manner so that they could get a reliable result.

The experiment is intended only model the variation of a transverse beam of light relative to a plane, said reception.

In the technique described under development by the method of signal strength triangulation to determine the atmospheric turbulence, and the size of the loop and the plane of the projected image is considered as the radial movement of the beam in question.

During the activities in the laboratory were asked questions pertaining to the efficiency of the system. These issues that are related to how the system was necessary, work with respect to range of the system robustness.

Therefore, the experimental results compared to results obtained by numerical simulation.

Key-Words: Atmospheric Turbulence, Tracking System, Amplitude Triangulation, Beam Wander,

# SUMÁRIO

1	INT	RODUÇÃO	12
	1.1	O LASER NO CONTEXTO DAS COMUNICAÇÕES	16
	1.2	COMUNICAÇÕES ÓPTICAS EM ESPAÇO LIVRE	18
	1.3	Motivação	22
2	SIST	TEMAS FSO E TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA	24
	2.1	INTRODUÇÃO TEÓRICA	24
	2.2	TEORIA DE TURBULÊNCIA DE KOLMOGOROV	27
	2.3	Flutuações na velocidade	29
	2.4	FLUTUAÇÕES NA TEMPERATURA	31
	2.5	FLUTUAÇÕES NO ÍNDICE DE REFRAÇÃO	32
	2.6	FATORES QUE INFLUENCIAM DIRETAMENTE NAS COMUNICAÇÕES EM ESPAÇO LIVRE	34
	2.6.1	Seção transversal e amplitude do espalhamento	34
	2.6.2	Propriedades Gerais das perdas devidas às seções Transversais de Partículas	37
	2.7	EFEITOS ATMOSFÉRICOS	39
3	ME	DIDA DA TURBULÊNCIA	43
	3.1	PANORAMA ATUAL	43
	3.2	DESCRIÇÃO DA TÉCNICA PROPOSTA	46
	3.2.1	Sistema de Transmissão	47
	3.2.2	Sistema de Recepção	51
	3.3	MATEMÁTICA DA MEDIDA DE TURBULÊNCIA	55
	3.4	SIMULAÇÃO DE UM DESLOCAMENTO	60
	3.5	SIMULAÇÕES	70
4	EXP	PERIMENTO	72
	4.1	ANÁLISE PRELIMINAR	72
	4.2	RESULTADO EXPERIMENTAL	77

CONCLUSÃO	
REFERÊNCIAS	
ANEXOS	
Programas	
Simulações	
Cálculo	94

# ÍNDICE DE ACRÔNIMOS

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

# Índice de Figuras

FIGURA 1.1 FOTOFONE CRIADO POR BELL E TAINTER	14
FIGURA 1.2 ILUSTRAÇÃO DA PARTE TRANSMISSORA DO FOTOFONE	15
FIGURA 1.3 ILUSTRAÇÃO DOS ELEMENTOS COMPONENTES DO PRIMEIRO LASER A RUBI	17
FIGURA 1.4 EXEMPLO DE TRANSCEPTORES DO SISTEMA FSO	20
FIGURA 1.5 JANELA DE TRANSMISSÃO ATMOSFÉRICA	20
FIGURA 2.1 CÉLULAS DE TURBULÊNCIA DEVIDAS A AQUECIMENTO ATMOSFÉRICO	25
FIGURA 2.2 FLUXO TURBULENTO, OCORRIDO NA FALTA DE UNIFORMIDADE NA MOVIMENTAÇÃO	27
FIGURA 2.3 FLUXO LAMINAR, ONDE AS CARACTERÍSTICAS DE VELOCIDADE DO FLUXO SÃO UNIFORMES	) 28
FIGURA 2.4 MODELO DE ESTRUTURA DA TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA PROPOSTO POR RICHARDSON	30
FIGURA 2.5 ONDA INCIDENTE EM PARTÍCULA	34
FIGURA 2.6 DENSIDADE DE FLUXO DE POTÊNCIA INCIDENTE EM UMA PARTÍCULA	37
FIGURA 3.1 EXEMPLO DE GIMBAL	44
FIGURA 3.2 EXEMPLO DE GIROSCÓPIO	44
FIGURA 3.3 EXEMPLO DE ARRANJO CCD (HTTP://WWW.CAHA.ES/CAHA/INSTRUMENTS/LAICA/INDEX.HTML)	45
FIGURA 3.4 EXEMPLO DE SISTEMA MICRO-ELETROMECANIZADO	45
FIGURA 3.5 PLATAFORMA DE TRÊS PONTOS PARA MOVIMENTAÇÃO DO ESPELHO	46
FIGURA 3.6 ILUSTRAÇÃO LÚDICA DA MOVIMENTAÇÃO MECÂNICA DO SISTEMA TRANSMIS	SOR 48
FIGURA 3.7 DETALHE DA CABEÇA TRANSMISSORA	48
FIGURA 3.8 PLACAS MULTIFUNÇÃO NI USB 6216	49
FIGURA 3.9 CONTROLADOR DE TEMPERATURA ILX LIGHTWAVE LDT – 5525	50
FIGURA 3.10 FONTE LUMINOSA A 980 NM E SEU SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA	50
FIGURA 3.11 ILUSTRAÇÃO DE ESQUEMA QUALITATIVO	51
FIGURA 3.12 PLANO RECEPTOR COM SEUS RESPECTIVOS ELEMENTOS FOTO SENSÍVEIS	52
FIGURA 3.13 DETECTORES DISPOSTOS NUM PLANO DE RECEPÇÃO REPRESENTADO POR COORDENADAS CARTESIANAS	52
FIGURA 3.14 ERRO NO RASTREIO/NA MEDIDA DE UM FEIXE ÓPTICO. GRÁFICO (X,Y) EM [MM	[] .53
FIGURA 3.15 SPOT LUMINOSO COM TAMANHO MUITO MENOR QUE A DISTÂNCIA ENTRE DETECTORES	61
FIGURA 3.16 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA MOVIMENTAÇÃO DE UM FEIXE COM 5,65 M EM UM INTERVALO DE 40 MM DE DESLOCAMENTO	M 62
FIGURA 3.17 ERRO ABSOLUTO REFERENTE A MEDIÇÃO DO DESLOCAMENTO DE 40 MM COM UM FEIXE GAUSSIANO DE 5,65 MM DE DIÂMETRO	1 62
FIGURA 3.18 SPOT LUMINOSO COM TAMANHO MUITO MAIOR QUE A DISTÂNCIA ENTRE DETECTORES	63
FIGURA 3.19 DESLOCAMENTO SIMULADO DE UM FEIXE NO LIMITE DE RESOLUÇÃO	66
FIGURA 3.20 ERRO ABSOLUTO NA MEDIDA DO DESLOCAMENTO	67

FIGURA 3.21 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA GAUSSIANA COM 6,36MM67	1
FIGURA 3.22 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA GAUSSIANA COM 10,6MM68	,
FIGURA 3.23 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA GAUSSIANA COM 14,14MM69	)
FIGURA 3.24 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA GAUSSIANA COM 17,67MM69	)
FIGURA 3.25 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UMA GAUSSIANA COM 19,09MM70	)
FIGURA 3.26 PONTO DE OTIMIZAÇÃO ENTRE TAMANHO DA GAUSSIANA E POSIÇÕES DOS FOTODETECTORES DA POSIÇÃO RADIAL QUE PODE SER DETECTADA71	-
FIGURA 3.27 ANÁLISE FEITA COM O PROGRAMA ORIGIN71	
FIGURA 4.1 IMAGEM DO LASER PROJETADA EM ANTEPARO DE PAPEL VEGETAL	;
FIGURA 4.2 PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DE POTÊNCIA DO FEIXE DE LASER	;
FIGURA 4.3 APROXIMAÇÃO DA CURVA POR AJUSTE GAUSSIANO74	ŀ
FIGURA 4.4 RASTREIO DO FEIXE NA HORIZONTAL76	,
FIGURA 4.5 RASTREIO DO FEIXE AO LONGO DO EIXO DE COORDENADAS	'
FIGURA 4.6 RASTREAMENTO DO FEIXE ÓPTICO NO DOMÍNIO DO TEMPO79	)
FIGURA 4.7 DETALHE EM VERMELHO DA FIGURA 4.6	)
FIGURA 4.8 RASTREAMENTO DO FEIXE ÓPTICO EM TEMPO REAL COM O FEIXE ÓPTICO EM REPOUSO, DURANTE 3 SEGUNDOS, MOSTRANDO UMA VARIAÇÃO DESLOCAMENTO RADIAL MÁXIMA DE APROXIMADAMENTE 0.4MM	)
FIGURA 4.9 FUNÇÃO DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DO ERRO ABSOLUTO DO DESLOCAMENTO RADIAL	
FIGURA 4.10 TENSÕES MEDIDAS NOS FOTODETECTORES DURANTE 30MS DO EXPERIMENTO DA FIG.4	\$

## 1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos antigos existe a necessidade humana de se comunicar. Essa intenção comunicativa se dava com a arte rupestre na representação de imagens do dia-adia e estilo de vida dos nossos ancestrais (1) (2). O objetivo dessas pinturas era mostrar como era a vida cotidiana e de alguma forma se comunicar com passando, transmitindo conhecimento ao próximo.

Arte rupestre, pintura rupestre ou ainda gravura rupestre, termos que são dados às mais antigas representações artísticas conhecidas, as mais antigas datadas do período Paleolítico Superior (~40.000 a.C.) Gravadas em abrigos ou cavernas, em suas paredes e tetos rochosos, ou também em superfícies rochosas ao ar livre, mas em lugares protegidos, normalmente datando de épocas pré-históricas. Na vida do Homem pré-histórico tinha lugar o espírito de conservação daquilo de que necessitava (2). Com o desenvolvimento da fala alinhado com o desenvolvimento de sociedades a comunicação de conhecimentos por meio da fala se dava através da tradição oral, ainda muito usada hoje em dia, eternizada em entalhes de pedra e gravuras como nas pirâmides, conhecidas no mundo inteiro.

Não havendo o domínio de fenômenos e tecnologias que dispomos hoje, mesmo a mais simples, do ponto de vista de utilização, como a geração de energia elétrica, foram pensados e desenvolvidos diferentes de maneiras de se comunicar, tais como sinais visuais, através da fumaça com índios americanos e na Grécia com superfícies reflexivas e tochas, sinais sonoros com os tambores na África e os *Taikos* no Japão feudal.

Na Grécia antiga era comum a utilização da luz solar, por meio de discos metálicos cujas superfícies eram polidas de forma a refletir a luz do Sol, com a finalidade de transmissão de informação utilizada nas guerras. Já as comunicações por tochas eram

utilizadas nas *Fryktories*, que eram torres usadas para esse tipo de comunicação, chamada *Fryktoria*. O método de utilizava dois conjuntos de cinco tochas. Quando era necessário mandar uma mensagem, as tochas apropriadas eram combinadas através de códigos, acendendo-as ou não. Necessariamente com visada direta as torres ficavam cerca de 32 km afastadas umas das outras (3).

Há muito tempo se usavam os faróis. Do termo em grego *Faros*, que era uma ilha próxima a Alexandria onde, em 280 a.C., fora erguido o Farol de Alexandria. Eram concebidos como forma de aviso visual aos navegantes de que se aproximavam de terra firme, ou qualquer porção de terra que estivessem no caminho de orientação. Na antiguidade o uso do óleo, ou de oliveira ou de baleia era o mais comum e com o passar do tempo as fontes, para a geração de luz, foram sendo substituídas por petróleo, gás, e com o avanço tecnológico, energia elétrica. Porém essas evoluções nas fontes luminosas não se deram sozinhas. Junto foram desenvolvidos aparatos ópticos, tais como a conjunção de espelhos e lentes, mecanismos de rotação não só com o objetivo de atingir maiores distâncias, bem como alternar entre breves períodos de iluminação e escuro, que distinguiam um farol de outro. O tempo de acionamento da luz pode ter diferentes intervalos ou não, no entanto essa questão não será abordada aqui neste trabalho.

Mais recentemente, fora inventado o Fotofone ou, como também é conhecido Radiofone, por Alexander Graham Bell juntamente com seu auxiliar Charles Summer Tainter em 19 de fevereiro de 1880. (4)



Figura 1.1 Fotofone criado por Bell e Tainter

Alexander G. Bell acreditara que o Fotofone era sua invenção mais importante, onde tal dispositivo permitia a transmissão de sons articulados e conversação humana através de um feixe de luz, veja exemplo do transmissor na figura 1.2. Em abril de 1880 o assistente de Bell transmitiu a ele a primeira mensagem telefônica sem fio do mundo em sua mais nova forma de Telecomunicação, de longe o mais avançado precursor das comunicações via fibra óptica que teve seu uso amplo apenas 100 anos depois.



Figura 1.2 Ilustração da parte transmissora do Fotofone

A chamada telefônica foi mandada do telhado da *Franklin School* até a janela do Laboratório de Bell, a uma distância com cerca de 213 metros.

O invento de Bell e Tainter se baseou na descoberta (1839) de A. E. Becquerel de propriedades fotovoltaicas de certos materiais. O Fotofone usava células de Selênio no ponto focal do receptor parabólico, onde a resistência elétrica do material variava inversamente com a incidência de luz neste material, ou seja, a resistência do material é maior quando a incidência de luz é menor, e menor quando a incidência de luz é maior. Basicamente, a idéia do Fotofone é modular o feixe de luz diretamente, e como resultado a variação da iluminação no receptor deveria induzir a variação de resistência nas células de Selênio (100 ~ 300 ohms), que eram então usadas para regenerar ou demodular os sons capturados pelo telefone receptor.

A modulação da luz do feixe transmitida era feita através de um espelho que vibrava através da atuação mecânica da voz do interlocutor. O espelho fino então tomava a forma de côncavo ou convexo, assim focando ou dispersando a luz da fonte luminosa. O princípio de funcionamento do Fotofone era similar ao do telefone, a diferença entre eles é que o Fotofone usava luz modulada como meio de transmissão e o telefone usa sinais elétricos modulados conduzidos por circuitos de transmissão (4).

#### 1.1 O LASER no contexto das comunicações

Os Lasers são dispositivos geradores de radiação óptica coerente. É utilizado em varias aplicações, e vem sendo mostrado que incorporam uma extraordinária gama de elementos de ganhos, métodos de bombeamento e projetos de ressonadores. As características principais dos Lasers, que determinam o escopo de aplicações, são coerência, direcionalidade, monocromaticidade e intensidade. A fim de acionar a função de Laser, o dispositivo deve conter um elemento de ganho locado em um ressonador óptico. O elemento de ganho se refere a um "Material Laser" ou um "Meio de ganho" que produz a amplificação por emissão estimulada. O Laser por si só é nomeado pelo elemento de ganho, como por exemplo, o Laser Nd;YAG, composto por íons trivalentes de Neodímio dopado em uma estrutura cristalina granulada de Ítrio e alumínio.

Historicamente, a busca por Lasers começou como uma extensão de técnicas de Amplificação Estimulada empregadas na região de microondas. Masers, que significa amplificação de microondas por emissão estimulada, cuja aplicação era préamplificadores em receptores de microondas.

Em 1960, T. Maiman construíra o primeiro Laser. Este era de Rubi, dopado com cromo trivalente, bombeado opticamente por uma lâmpada helicoidal que circundava a

superfície cilíndrica do cristal do Laser, veja figura 1.3. As superfícies reflexivas compunham o ressonador óptico, onde o comprimento de onda de saída era de 694 nm.



Figura 1.3 Ilustração dos elementos componentes do primeiro Laser a Rubi

Foi T. Maiman que criou o termo "Laser" em analogia ao Maser, como a abreviação de Amplificação da luz por emissão estimulada da radiação, em inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Após seu advento o Laser de Rubi foi basicamente uma ferramenta de pesquisa e pelos 15 anos subsequentes o padrão de fonte de radiação de alta potência na região do espectro visível para pesquisas em universidade, governamentais e laboratórios industriais. Sua aplicação em ambientes industriais era rara, devido, em grande parte, a baixa taxa de repetição do pulso do Laser, alto custo do equipamento e a não familiaridade da indústria com este novo tipo de fonte de radiação.

A descoberta do Laser de Rubi desencadeou uma intensiva busca por outros materiais, e uma rápida sucessão de aplicações LASER com materiais diferentes foram demonstradas. Seguidamente à descoberta do Laser de Rubi, o material de estado sólido

seguinte foi o Urânio dopado com Fluoreto de Cálcio, que foi utilizado como Laser no final de 1960. O primeiro Laser baseado no material Neodímio foi o de Tungstato de Cálcio dopado com íons de Neodímio. Este Laser fora descoberto em 1961, e foi usado em pesquisas por vários anos até o cristal de Ítrio e alumínio, como material base para o Neodímio, ser descoberto. (5)

### 1.2 Comunicações Ópticas em espaço Livre

Comunicações ópticas em espaço livre, mais conhecidas como Free Space Optics ou FSO é um sistema de comunicação banda-larga e de alta taxa de transmissão de informação sem fio que utiliza uma portadora óptica para transmitir informação através do ar. Embora interesses recentes se concentrem em taxas de transmissão cada vez maiores oferecidas por sistemas ROF do inglês Radio Over Fiber, que se baseiam na redundância de sistemas via fibra óptica com sistemas de radio frequência, as vantagens que os benefícios que as comunicações ópticas wireless proporcionam são evidentes, tais como: menor massa, potência consumida, e volume se comparado aos sistemas de RF, alto ganho associado a um feixe colimado que é intrínseco a natureza do Laser, e a ausência de restrições regulatórias por parte das agências competentes para o uso de frequência e largura de banda. Os sistemas FSO são sistemas ponto-a-ponto basicamente compostos por dois transceptores bidirecionais alinhados necessariamente em visada direta. Atualmente estes sistemas são capazes de superar taxas de transmissão de dados maiores que 1,25 Gbps de voz, dados, e vídeo [Fsona -SonaBeam]. Portátil, os sistemas FSO são reconhecidos como uma tecnologia de transmissão de dados extremamente segura, onde a interceptação do canal de comunicação e sua demodulação não autorizada do sinal apresentam grande grau de dificuldade. Não requer licenciamento do espectro

como nas comunicações via rádio (RF), e por utilizar uma portadora óptica é imune a interferências eletromagnéticas. Além disso, é uma tecnologia de baixo custo quando comparado às fibras ópticas, mas que ao mesmo tempo possui largura de banda equivalente. Nesse contexto, o *FSO* surge como uma das soluções para a crescente demanda por Largura de Banda, assim como, para o gargalo da última milha (6).

Comprimentos de onda típicos utilizados em sistemas *FSO* são 850 nm e 1550 nm, onde Lasers infravermelhos de baixa potência são ou podem operar em modo seguro aos olhos humanos, veja Figura 1.4. Todavia as limitações de potência dos Lasers restringem o range de aplicabilidade. E dependendo das condições do tempo os links FSO podem se estender de alguns de algumas centenas de metros até pouco mais que um quilômetro, o que é suficiente para sanar o problema de última milha. Entretanto, esse tipo de sistema está sujeito inevitavelmente a efeitos atmosféricos que degradam o feixe óptico que limitam severamente o alcance deste, cujas causas são a turbulência atmosférica, o espalhamento e absorção devido a partículas suspensas no ar, entre outros, de onde se torna evidente na atenuação, deflexão e defasamento do sinal óptico, havendo assim comprimentos de ondas específicos onde a influência atmosférica é bastante reduzida, ou seja, há uma janela de baixa atenuação para determinadas faixas de comprimento de onda, veja Figura 1.5. Nesse sentido, faz-se necessário o estudo de técnicas com o propósito de entender e mitigar tais efeitos para aprimorar os sistemas FSO (7).



Figura 1.4 Exemplo de Transceptores do sistema FSO



Figura 1.5 Janela de transmissão atmosférica

A turbulência atmosférica é a variação aleatória do índice de refração do ar à medida que ocorre mudanças de temperatura, pressão e umidade na atmosfera. Assim, essas constantes alterações do índice de refração ao longo do tempo acabam por criar um meio turbulento que ao interagir com feixe óptico degrada as características do mesmo como, por exemplo, amplitude, fase e direção de propagação. Essa interação gera três efeitos bem conhecidos: Divagação, Cintilação e o Espalhamento do feixe. Sendo os dois

primeiros os maiores responsáveis pela degradação dos enlaces *FSO*. Na literatura é possível encontrar algumas técnicas e dispositivos para medir turbulência atmosférica como, por exemplo, interferômetros a fibra óptica, cintilômetros, sensores de frente de onda *Shack-Hartman*, câmeras *CCD*, *PSD* e detectores de quadrante (6).

O presente trabalho apresenta os avanços da técnica inicialmente apresentada no SBrT 2009 [18] e em artigo recentemente aceito para publicação [15]. Nestes trabalhos, o objetivo foi validar a técnica de triangulação por amplitude e mostrar que é possível rastrear o feixe óptico e, consequentemente, medir a divagação do feixe (*Beam Wander*) para monitorar a turbulência atmosférica através do cálculo do  $C_s^2$ . O dispositivo utilizado para comprovar a técnica era composto de três detectores devidamente colocados no plano do receptor e um microprocessador para realização dos cálculos. Também, é importante salientar que na ocasião os experimentos foram realizados em regime quase-estático e, para simular a divagação do feixe foram utilizados estágios de translação controlados manualmente no plano receptor. No trabalho aqui apresentado, foram realizados experimentos em regime dinâmico, ainda em ambiente de laboratório. Para isso o feixe óptico, ainda foi movimentado mecanicamente de tal forma a simular parcialmente o efeito da turbulência atmosférica, Através da análise analítica e estatística dos resultados, a técnica tem-se mostrado robusta e confiável para sua utilização em campo.

#### 1.3 Motivação

Além disto, existe o interesse em novas tecnologias, no entanto não é só o interesse que faz com que se desenvolvam pesquisas. Existe, certamente, um interesse prático que movimenta esse tipo de setor de Telecomunicações.

No nosso caso, a utilização de sistema ópticos não confinados que usam o ar como meio de transmissão é uma solução que vem sendo implementada para a solução de problemas de última milha. Cujas vantagens além da não necessidade de regulamentação por meio de entidades competentes, possui imunidade eletromagnética, o que significa que não haverá interferência por conta de fontes de propagação eletromagnética, a informação é segura devido à dificuldade de interceptação do sinal óptico, devido ao feixe óptico ser bem paralelo, e largura de banda equivalente a da fibra, devida sua natureza óptica. Dentre outros, podemos citar o custo de instalação deste sistema ser comparavelmente mais viável que sistemas de rádio frequência, que além de volumoso, consome uma quantidade de potência considerável e necessita de licenciamento para operação.

Sistemas FSO atuam basicamente em comprimentos de onda de 800 e de 1550nm, que além da segurança ocular, existem equipamentos de telecomunicações que atuam nessas faixas, o que facilita na interoperabilidade dos sistemas não confinados com sistemas confinados.

Das desvantagens da utilização desta tecnologia estão, a interferência atmosférica inerente ao meio de propagação, sistema com modo de funcionamento ponto a ponto. Correlacionado a interferência atmosférica podemos citar a turbulência, dentre atenuação e espalhamento devido as partículas em suspensão no fluído atmosférico. Assim a turbulência pode ser descrita por três tipos que são a abertura, o espalhamento e a movimentação transversal em relação ao plano de recepção que é chamado de divagação de feixe. Tratando especificamente de divagação de feixe, esta existe devido a alterações no índice de refração relacionadas ao aumento de temperatura do meio onde o fluido atmosférico se encontra mais próximo da superfície terrestre. A movimentação do fluido atmosférico, ou fluxo, desta massa de ar que possui uma variedade de índices de refração faz com que ocorram modificações na direção de propagação do feixe luminoso. Esta mudança pode ser percebida no plano do receptor através de movimentação transversal em relação a um plano cartesiano pré-definido. Onde esta divagação do feixe é relacionada ao grau de turbulência atmosférica, que é quantizado pela constante estrutural ou de estrutura para índice de refração  $C_n^2$ .

O capitulo 1 trata da introdução ao tema de comunicações ópticas em espaço livre bem como faz conexão ao objetivo do trabalho.

O capitulo 2 trata basicamente da teórica e cálculos pertinentes ao objeto de estudo. Neste, o leitor encontrará...

O capitulo 3 trata de fato a medida da turbulência. Aqui estão descritas informações sobre a descrição da técnica utilizada bem como informações do sistema de recepção, transmissão, simulação numérica de resultados

O capitulo 4 trata dos resultados obtidos do experimento.

O capitulo 5 trata de...

## 2 SISTEMAS FSO E TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

### 2.1 Introdução Teórica

Os Estudos clássicos de turbulência se concentravam em flutuações no campo de velocidade de um fluido viscoso. Particularmente, fora observado que a velocidade de ventos longitudinais associados a uma atmosfera turbulenta flutua aleatoriamente entorno de um valor médio. Ou seja, o campo de velocidade do vento assume uma natureza aleatória ou estocástica, o que significa dizer que a cada ponto do espaço e do tempo com um fluxo, a velocidade pode ser representada por uma variável aleatória.

Assim uma movimentação turbulenta da atmosfera na presença de vapor e gradientes de temperatura abre oportunidades às possíveis perturbações no índice de refração da atmosfera, perturbações estas que são representadas na forma de células ou bolhas de ar.

Em estudos iniciais promovidos por Kolmogorov, sugerem que uma subclasse de bolhas de ar cuja uma das propriedades é de consistência estatística, o que permite que se tenha um tratamento teórico adequado.



Figura 2.1 Células de turbulência devidas a aquecimento atmosférico

Turbulência é definida por flutuações no índice de refração devido a ligeiras variações da temperatura onde, de forma geral, o processo que ocasiona esse fenômeno é basicamente descrito como processo de aquecimento de alguma superfície que aquece o campo atmosférico mais próximo, assim esse campo atmosférico sofrerá alterações devido a mistura por convecção de camadas mais frias com camadas mais quentes que estão em ascensão. De maneira mais específica tal perturbação atmosférica, nomeada Turbulência Atmosférica, é descrita pelo processo de aquecimento da superfície terrestre, aquecendo a superfície terrestre é provocado o aquecimento do ar que esteja próximo a esta superfície, mudando sua densidade e consequentemente seu índice de refração, devido a mistura do ar mais frio com o mais quente, que é resultado da convecção. Gerando assim o que é formalmente chamado de células de turbulência. No decorrer deste processo ocorre a redistribuição aleatória espaço-temporal do índice de refração, causador de uma variedade de efeitos na frente de onda óptica, resultado das não homogeneidades atmosféricas supracitadas. Efeitos estes que resultam em alargamento (*Beam Spread*) e variações aleatórias transversais ao plano de recepção da posição

relativa do centro do feixe, chamado de divagação de feixe (*Beam Wander*), veja Figura 2.2. Além da mudança na forma de propagação, a turbulência atmosférica destrói a coerência espacial do feixe de laser, o que é chamado de Cintilação (*Scintillation*), veja Figura 2.3. Tal perda limita a qualidade na recepção do feixe de Laser. (7) (6)



Figura 2.2 Variação transversal no plano do receptor



Figura 2.3 Perda de coerência espacial causando redistribuição aleatória de Potência

## 2.2 Teoria de turbulência de Kolmogorov

Considerando a atmosfera um fluido viscoso, experimentos dizem que esta tem dois estados distintos de movimentação: Laminar e Turbulento, veja Figura 2.4 e Figura 2.5. A distinção entre ambos os estados vem do fato de que não ocorre "mistura" no fluxo laminar, estado para o qual as características de velocidade do fluxo são uniformes ou que venham a mudar de maneira regular. No entanto em um fluxo turbulento a velocidade perde a sua uniformidade devido à dinâmica da mistura do fluxo e assim adquirindo subfluxos aleatórios chamados vórtices turbulentos.



Figura 2.4 Fluxo Turbulento, ocorrido na falta de uniformidade na movimentação



Figura 2.5 Fluxo Laminar, onde as características de velocidade do fluxo são uniformes

Em estudo anterior relacionado ao fluxo turbulento, *Reynolds* usou a teoria da similaridade para definir uma quantidade não dimensional, quantizada da seguinte forma  $R_e = Vl/v$ , que atualmente é chamado de número de *Reynolds*. Onde as quantidades, V[m/s] e l[m], são respectivamente a velocidade característica e a dimensão do fluxo em questão, e  $v[m^2/s]$  é a viscosidade cinemática do fluido avaliado. Sendo assim a transição da movimentação de um fluxo dado como laminar para um nomeado turbulento ocorre quando o número de *Reynolds* assume um valor crítico, para o qual acima deste limite, a movimentação é considerada turbulenta.

A turbulência é um processo fundamentalmente não linear, descrito pelas equações de *Navier-Stokes*. Porém, por conta das dificuldades em solucioná-las, *Kolmogorov* desenvolveu uma teoria estatística para turbulência que se baseia na análise dimensional, simplificações adicionais e aproximações. No entanto, a teoria de turbulência como é conhecida não deriva dos primeiros princípios. (7)

## 2.3 Flutuações na velocidade

A teoria clássica de turbulência desenvolvida no início dos anos 40 por Kolmogorov levava em conta flutuações em ambas, magnitude e direção da velocidade de um fluido. Sua teoria foi apresentada em termos de um conjunto de hipóteses baseados em um discernimento puramente físico. Sendo assim, para um número de Reynolds suficientemente grande, foi provado teoricamente que para células ou estruturas em pequena escala da turbulência são estatisticamente homogêneas, isotrópicas, e independente de estruturas em grande escala, e mais, que o movimento associado às estruturas em pequena escala é unicamente determinado pela viscosidade cinemática vdo fluido e uma taxa média de dissipação  $\varepsilon[m^2/s^3]$  de energia da turbulência pela massa do fluido.

Para entender a estrutura da turbulência atmosférica, é conveniente adotar uma ferramenta de visualização chamada teoria de energia da turbulência cascateada proposta por Richardson veja Figura 2.6.



Figura 2.6 Modelo de estrutura da Turbulência Atmosférica proposto por Richardson

A fonte de energia provocadora de turbulências em grande escala é tanto vento cortante quanto convecção conforme descrito anteriormente no tópico 2.2. Levando-se em consideração a teoria de cascateamento da Turbulência atmosférica, onde a velocidade dos ventos aumenta até que se atinja um ponto no qual exceda o valor crítico do número de Reynolds, sendo assim, esta ação cria uma instabilidade local de massas de ar, conceituando os vórtices, com características dimensionais ligeiramente menores que o fluxo dito normal. De uma forma descritiva, sob a influência de forças inerciais, vórtices maiores se subdividem em vórtices menores formando um contínuo e homogêneo conjunto de pequenos vórtices, transferindo energia de uma macro escala  $L_0$ , chamada de turbulência em escala externa, para uma micro escala  $l_0$ , chamada de turbulência em escala interna. A família de vórtices esta limitada entre  $L_0$  e  $l_0$ , que formam um subintervalo inercial. Em escalas menores que *l*<sub>0</sub> pertencem a um intervalo de dissipação viscoso, onde vórtices turbulentos desaparecem e a energia restante é dissipada na forma de calor.

Turbulência em escala externa,  $L_0$ , denota um tamanho em escala sob o qual as propriedades de turbulência são independentes do fluxo normal. Em uma camada de superfície acima de 100 m,  $L_0$  assume um crescimento linear na ordem da altura acima do solo a partir do ponto de observação.

Células de ar turbulentas ou Turbilhões em menor escala que  $L_0$  são assumidos como estatisticamente homogêneos e isotrópicos, todavia células de ar que são iguais ou maiores que  $L_0$  são geralmente assumidas como anisotrópicos, e suas estruturas não são muito bem definidas. Acima de uma determinada altura, dada como 100m, a dimensão horizontal de  $L_0$  é em geral muito maior que sua dimensão vertical por conta da estratificação atmosférica. Na medida em que esses turbilhões se tornam cada vez menores, o montante relativo de energia se dissipa à medida que a força viscosa aumenta até o ponto em que a energia dissipada se equilibre a aquela fornecida pela energia cinética do fluxo original. Quando isto acontece, o número de Reynolds é reduzido na ordem de uma unidade e o tamanho do turbilhão associado então define a escala interna de turbulência  $l_0$ . A escala interna tem o tamanho típico na ordem de 1 a 10 mm próximo ao chão, no entanto fica na ordem de centímetros ou mais na troposfera e estratosfera. (7)

## 2.4 Flutuações na temperatura

Historicamente, as ideias fundamentais e caracterização da turbulência foram desenvolvidas em termos da flutuação da velocidade. Todavia, as ideias básicas de Kolmogorov em relação a flutuações na velocidade também foram aplicadas em escalares passivos conservativos, tal como potencial de temperatura, que é relacionada à temperatura T em Kelvin, a uma taxa de decrescimento de temperatura, e a altura acima da superfície terrestre. As flutuações na temperatura são consideradas passivas, pois não trocam energia com a velocidade de turbulência. A associação da escala interna  $l_0$  e da escala externa  $L_0$  de flutuações de temperatura de menor escala forma as fronteiras inferior e superior do range inercial, ou no caso de flutuações na temperatura, o range inercial convectivo. O mecanismo de dissipação de não homogeneidades da temperatura é a difusão molecular, e não a viscosidade como no caso da flutuação na velocidade. (7)

### 2.5 Flutuações no índice de refração

O índice de refração n um dos mais importantes parâmetros atmosféricos para a propagação de onda óptica, é extremamente sensível a flutuações de temperatura em pequenas escalas. Particularmente, flutuações na temperatura combinada a um ambiente turbulento induz a um comportamento aleatório no índice de refração atmosférico. A um certo ponto R do espaço e do tempo t, o índice de refração pode ser matematicamente expressado por:

$$n(R,t) = n_0 + n_1(R,t),$$
 (2.1)

onde  $n_0 = \langle n(R,t) \rangle \cong 1$  é o valor médio do índice de refração e  $n_1(R,t)$  representa o desvio aleatório de n(R,t) do seu valor médio; assim  $\langle n_1(R,t) \rangle = 0$ . Normalmente variações temporais no índice de refração são suprimidas devido ao tratamento da propagação da onda óptica. Isto significa que esta mantém uma única frequência à medida que se propaga. É costume, todavia, expressar o índice de refração na forma:

$$n(R) = 1 + n_1(R),$$
 (2.2)

onde n(R) esta normalizada por seu valor médio  $n_0$ .

Flutuações no índice de refração estão relacionadas também às correspondentes flutuações da pressão. Particularmente, o índice de refração para a atmosfera pode ser escrito para comprimentos de onda no visível e no I.V. como:

$$n(R) = 1 + 77, 6 \times 10^{-6} (1 + 7, 52 \times 10^{-3} \cdot \lambda^{-2}) \frac{P(R)}{T(R)} \approx 1 + 79 \times 10^{-6} \frac{P(R)}{T(R)},$$
 (2.3)

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda em  $[\mu m]$ , P é a pressão atmosférica em milibars, e T é a temperatura em Kelvin. A dependência do comprimento de onda é pequena para frequências ópticas, então é escolhido  $\lambda \approx 0.5 \mu m$  como um valor típico na igualdade da equação 2.3 . Sendo as flutuações na pressão normalmente negligenciadas, vemos que as flutuações no índice de refração associadas às regiões do visível e do I.V. próximo do espectro são devidos principalmente a flutuações aleatórias na temperatura, sendo que flutuações na umidade contribuem somente na região do I.V. distante. (7)

# 2.6 Fatores que influenciam diretamente nas comunicações em espaço livre

#### 2.6.1 Seção transversal e amplitude do espalhamento

Quando uma partícula é iluminada por uma onda, parte da potência incidente é espalhada, e a outra parte é absorvida pela partícula. As características desses dois fenômenos, absorção e espalhamento, são mais bem descritos assumindo a incidência de uma onda plana.

Considerando uma onda plana linearmente polarizada que se propaga através de um meio com constante dielétrica  $\varepsilon_0$  e permeabilidade  $\mu_0$  cujo campo elétrico é dado por:

$$E_i(r) = \hat{e}_i \cdot e^{i\,k\,i\,\cdot\,r} \tag{2.4}$$

A amplitude  $|E_i|$  tem dimensão [Volts/metro],  $k = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$  é chamado número de onda,  $\lambda$  comprimento de onda,  $\hat{i}$  é o vetor unitário na direção de propagação,  $\hat{e}_i$  é o vetor unitário na direção de polarização.



Figura 2.7 Onda incidente em partícula

A onda incidente na partícula veja Figura 2.7, cuja constante dielétrica relativa é dada por:

$$\varepsilon_r(r) = \frac{\varepsilon(r)}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r'(r) + i\varepsilon_r''(r), \qquad (2.5)$$

Onde  $\varepsilon_r(r)$  é geralmente complexo e é função da posição radial na medida em que a partícula tem perda e é não homogênea. O campo a uma distância R do ponto de referência na partícula, em direção do vetor unitário  $\hat{O}$ , consiste do campo incidente  $E_i$  e campo espalhado pela partícula  $E_s$ . Com a distância  $R < D^2 / \lambda$  (Onde D é o diâmetro da partícula), o campo  $E_s$  tem variações na amplitude e na fase por conta da interferência entre as contribuições de diferentes partes da partícula, e o ponto de observação r é dito ser em campo próximo a partícula. Quando  $R > D^2 / \lambda$ , todavia, o campo espalhado  $E_s$ , se comporta como ondas esféricas e é dado por:

$$E_{s}(r) = f\left(\hat{O}, \hat{i}\right) \left(e^{ikR} / R\right) \qquad para \qquad R > D^{2} / \lambda, \qquad (2.6)$$

 $f(\hat{O},\hat{i})$ , representa a amplitude, fase e a polarização da onda espalhada em campo distante na direção de  $\hat{O}$  quando a partícula é iluminada por uma onda plana incidente na direção de  $\hat{i}$  com amplitude unitária, e é chamada de amplitude de espalhamento. Deve-se notar que mesmo a onda incidente ser linearmente polarizada, a onda espalhada geralmente tem polarização elíptica. Considere a densidade de fluxo de potência espalhada  $S_s$  a uma distância R da partícula na direção de  $\hat{O}$  causada por uma densidade de fluxo de potência incidente  $S_i$ . Onde  $S_i$  e  $S_s$  são as magnitudes dos vetores de densidade de fluxo de potência incidente e espalhada, respectivamente, definidas como nas equações abaixo:

$$S_{i} = \frac{1}{2} \left( E_{i} \times H_{i}^{*} \right) = \frac{\left| E_{i} \right|^{2}}{2\eta_{0}} \hat{i}, \quad e \quad S_{s} = \frac{1}{2} \left( E_{s} \times H_{s}^{*} \right) = \frac{\left| E_{s} \right|^{2}}{2\eta_{0}} \hat{O}$$
(2.7)

Sendo  $\eta_o = \sqrt{\binom{\mu_0}{\varepsilon_0}}$  a impedância característica do meio.

Considerando a potência total espalhada em todos os ângulos entorno da partícula, a seção transversal da partícula que deveria produzir uma quantidade de espalhamento é chamada de espalhamento devido à seção transversal,  $\sigma_s$ , e é dado por:

$$\sigma_{s} = \int_{4\pi} \sigma_{d} \, d\omega = \int_{4\pi} \left| f(\hat{O}, \hat{i}) \right|^{2} \, d\omega = \left( \frac{\sigma_{t}}{4\pi} \right) \int_{4\pi} p(\hat{O}, \hat{i}) \, d\omega \tag{2.8}$$

Onde  $d\omega$  é o elemento diferencial de ângulo,  $\sigma_d$ , é o espalhamento diferencial devido à seção transversal da partícula.

Seguidamente, considerando a potência absorvida pela partícula, a seção transversal que corresponderia a este é chamada de  $\sigma_a$ , ou seja, absorção devida à seção transversal da partícula.

E finalmente, a soma das seções transversais de espalhamento e de absorção é chamada de seção transversal total ou seção transversal de extinção. (8) (9)
$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a \tag{2.9}$$

# 2.6.2 Propriedades Gerais das perdas devidas às seções Transversais de Partículas

Se o tamanho da partícula é muito maior que o comprimento de onda, o espalhamento devido a seção transversal total  $\sigma_i$  é aproximadamente duas vezes o espalhamento devido a seção transversal geométrica  $\sigma_g$  da partícula na medida em que o tamanho desta aumenta. De forma a ilustrar isso, considere uma onda incidente com densidade de fluxo de potência  $S_i$ , veja Figura 2.8:



Figura 2.8 Densidade de fluxo de potência incidente em uma partícula

O produto do fluxo total de potencia incidente,  $S_i$ , com a perda devida a seção transversal geométrica  $\sigma_g$  é tanto espalhado quanto absorvido pela partícula. Atrás da partícula, deveria existir uma região de sombra onde praticamente não existiria onda, no entanto o espalhamento da onda, a partir da partícula, é exatamente igual à onda incidente com defasagem de 180° e o fluxo do espalhamento é  $S_i \sigma_g$  em magnitude. O fluxo total espalhado e absorvido se aproxima por  $S_i \sigma_g + S_i \sigma_g$  e a seção transversal  $\sigma_i$  tem aproximação por:

$$\sigma_{t} = \frac{2S_{i}\sigma_{g}}{S_{i}} = 2\sigma_{g}$$
(2.10)

É visto que a potência total absorvida, quando a partícula é muito grande, não pode se maior que  $S_i \sigma_g$ , e assim a absorção devida a seção transversal  $\sigma_a$  se aproxima da constante de espalhamento devido a seção transversal geométrica:

$$\sigma_a \to \sigma_g \tag{2.11}$$

Se o tamanho da partícula for muito menor que o comprimento de onda, o espalhamento de seção transversal  $\sigma_s$  é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda e diretamente proporcional ao quadrado do volume da partícula. Nota-se que o campo espalhado  $E_s$  é causado pelo campo incidente na partícula, e assim  $E_s$  a uma distância R é proporcional ao campo incidente  $E_i$ , e ao volume V do espalhamento:

$$|E_s| = |E_i| \begin{bmatrix} (const)V \\ R \end{bmatrix}$$
(2.12)

A constante nesta equação 2.12 tem dimensão  $[comprimento]^{-2}$ , e uma vez sendo função do comprimento de onda, é proporcional a  $\lambda^{-2}$ . Equacionando isto para a equação 2.12 é obtido:

$$|E_s| \sim |E_i| \frac{V}{R\lambda^2} \sim |E_i| \frac{|f(\hat{O},\hat{i})|}{R}$$

Todavia,  $\sigma_s \sim |f(\hat{O}, \hat{i})|^2 \sim V^2/\lambda^4$ . Essas características de pequenas partículas são geralmente chamadas de <u>espalhamento Rayleigh</u>. Onde a relação leva também em consideração outros parâmetros como massa da partícula, velocidade da luz e propriedades dielétricas do meio onde a partícula se encontra. (9)

#### 2.7 Efeitos Atmosféricos

Os efeitos atmosféricos sobre enlaces ópticos em espaço livre são uma questão importante a ser tratada. Esses efeitos atmosféricos atuam diretamente no feixe óptico e são inerentes ao meio de transmissão, agindo de forma destrutiva nas características de distribuição de potência e de propagação da luz, que podem ser percebidos no plano. Essa interferência, percebida no plano receptor, tem causa devida a turvação por aerossóis diversos e turbulência atmosférica, caracterizados respectivamente como atenuação, devido à absorção e espalhamento, e divagação de feixe transversal ao plano de recepção.

O vapor de água na troposfera é susceptível a variações numa escala de 1 a 3% em concentração. Um número menor de constituintes, que influenciam a turvação em frequências ópticas, são também encontrados na atmosfera em concentração variada. Alguns destes constituintes são aerossóis tais como partículas de poeira, óxidos de carbono, compostos de enxofre e nitrogênio, hidrocarbonetos e ozônio.

A turvação atmosférica é definida por se constituir de todas as partículas que absorvem e espalham a luz. Para o estudo da propagação de feixes ópticos, a turvação atmosférica pode ser dividida em duas classes. A primeira inclui moléculas gasosas, aerossóis, névoa fraca e neblina. A atenuação ou perda por extinção da energia da luz do feixe de Laser para esta categoria é geralmente devida ao espalhamento Rayleigh e Mie. O feixe direto retém um percentual dessa energia mesmo após de percorrer toda a atmosfera. A segunda classe da Turvação consiste de nuvens opacas, bem como de neblina e nevoeiro densos. Perdas por espalhamento são muito frequentes onde a maior parte da energia do feixe aparece como luz difusa.

A absorção ocorre quando o fóton é absorvido por moléculas gasosas da atmosfera que transforma o fóton em energia cinética da molécula. Como consequência, a absorção é o mecanismo pelo qual a atmosfera sofre aquecimento. Absorção atmosférica é altamente dependente do comprimento de onda. Como exemplo, a absorção no  $O_2$  e  $O_3$ essencialmente elimina a propagação de comprimentos de onda abaixo de 200nm, no entanto existe uma pequena absorção em comprimentos de onda na faixa do visível (400 a 700nm). Átomos e moléculas são caracterizados por seus índices de refração, sendo a parte imaginária deste índice, *k*, relacionada ao coeficiente de absorção, *a*, pela equação seguinte:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a, \qquad (2.13)$$

onde  $N_a$  é a concentração de partículas absorventes,  $\sigma_a$  é a capacidade de absorção da seção transversal analisada.

Os tipos de componentes absorsores determinam o quão forte será a atenuação. Esses tipos podem ser divididos em duas classes gerais: absorsores moleculares e aerossóis. Por isso mesmo em transmissões com ar limpo existem perdas.

O espalhamento de ondas eletromagnéticas no visível e no infravermelho ocorre quando a radiação se propaga através de partículas e moléculas presentes no ar. O espalhamento da luz tem uma dependência muito forte ao comprimento de onda, no entanto não ocorre perda de energia como acontece na absorção, mas sim uma redistribuição no caminho da luz.

Causado por moléculas de ar e neblina que tem tamanho pequeno se comparado ao comprimento de onda de transmissão, o espalhamento Rayleigh, também chamado de espalhamento molecular se aplica somente em atmosfera muito limpa. Para estas pequenas moléculas o espalhamento a comprimentos de onda maiores que aproximadamente 3000nm é negligenciável. Em comprimentos de onda abaixo de 1000m, o espalhamento Rayleigh provoca a cor azul do céu como consequência que a luz azul sofre muito mais espalhamento que qualquer outro comprimento de onda no visível. A formula clássica para espalhamento Rayleigh é dada por:

$$\sigma_s = \frac{f e^4 \lambda_0^4}{6\pi \varepsilon_0^2 m^2 c^4} \cdot \frac{1}{\lambda^4}, \qquad (2.14)$$

onde f é a força de oscilação, e é a carga do elétron,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda correspondente a frequência natural,  $\omega_0 = 2 \pi c / \lambda_0$ ,  $\varepsilon_0$  é a constante dielétrica, c é a velocidade da luz, e m é a massa da entidade oscilante.

O espalhamento Mie, conhecido também por espalhamento por aerossol, é caracterizado por partículas com tamanho comparável ao comprimento de onda de transmissão. Diferentemente do Rayleigh, o espalhamento por partículas de tamanho

comparável ou maior que o comprimento de onda é concentrado na direção de propagação. Perdas por espalhamento diminuem rapidamente com o incremento do comprimento de onda, eventualmente chegando próximo ao caso do espalhamento Rayleigh. O espalhamento Mie é responsável pela cor avermelhada do pôr do sol. Uma fórmula empírica simplificada que pode ser encontrada na literatura e é usada pela comunidade FSO há algum tempo para calcular o coeficiente de atenuação devido ao espalhamento Mie é dada a seguir:

$$\gamma = \frac{3.91}{V} \cdot \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-\delta},\tag{2.15}$$

onde  $\delta = 0.585 (V)^{1/3}$  para V<6Km,  $\delta = 1.6$  para V > 50Km,  $\delta = 1.3$  para 6Km<V<50Km.

Na formula, V esta correlacionada à visibilidade, e  $\lambda$  é o comprimento de onda de transmissão.

A turbulência atmosférica é provocada pelo processo de aquecimento da superfície terrestre, e que provoca um aquecimento do ar que esteja próximo a terra, mudando sua densidade e consequentemente seu índice de refração. Por convecção, essas camadas de ar aquecidas sobem se misturando a camadas de ar em temperatura mais baixa, tornando o meio heterogêneo ou turbulento, gerando o que é chamado de células ou bolhas de ar. Distorções na frente da onda óptica, devido a não-homogeneidades na atmosfera, resultam em alargamento (*Beam Spread*) e variações aleatórias transversais no plano de recepção da posição do centro do feixe, chamado de divagação de feixe (*Beam Wander*). Além da mudança na forma de propagação, a turbulência atmosférica destrói a coerência espacial do feixe de laser, o que é chamado de Cintilação. Tal perda limita a qualidade na recepção do feixe de Laser. (6)

# **3 MEDIDA DA TURBULÊNCIA**

Na técnica aqui em desenvolvimento utilizada para medir a turbulência atmosférica levam-se em consideração os efeitos do *Beam Wander* (deslocamento radial) e *Beam Spread* (alargamento do feixe). Porém, para o calculo da constante Cn2 será levado somente em consideração o deslocamento radial. Desta forma, os efeitos de *Beam Spread* e Cintilação não serão mais abordados.

## 3.1 Panorama atual

Para que se compense o desalinhamento do feixe óptico são utilizados mecanismos que por atuação direta no dispositivo transceptor movimenta e corrige o deslocamento sofrido. São chamados comercialmente de sistemas de traqueamento (*Tracking Sytems*). Alguns sistemas utilizados são os Auto Tracking, Ginbals, Baseados em servo mecanismo, projetos de espelho direcionador, Sistemas Micro-eletromecânicos (MEMS), Detectores quadrangulares, e arranjos CCD, veja as Figura 3.3 e Figura 3.4.

Os sistemas Auto Tracking usam normalmente dois comprimentos de onda, um como portador de dados e o outro com feixe de controle da cabeça transceptora. Sua característica é corrigir o desalinhamento do feixe de LASER automaticamente, no caso de a construção ou alguma edificação qualquer balançar.

Gimbals são dispositivos frequentemente utilizados como suporte de cabeças transceptoras e tem por característica a mobilidade em diferentes direções, sendo estas

vertical e horizontal veja Figura 3.1. Normalmente são visualizadas montagens de giroscópios no arranjo feito com o gimbal Figura 3.2.



Figura 3.1 Exemplo de Gimbal



Figura 3.2 Exemplo de Giroscópio



Figura 3.3 Exemplo de arranjo CCD (http://www.caha.es/CAHA/Instruments/LAICA/index.html)



Figura 3.4 Exemplo de sistema micro-eletromecanizado

No caso de espelhos direcionadores ou Steering mirror systems, veja Figura 3.4. São basicamente espelhos montados em uma plataforma com a capacidade de mudar o direcionamento do mesmo por meio de atuadores no caso elementos piezoelétricos veja Figura 3.5. Uma clara vantagem deste tipo de dispositivo esta no fato de não haver a participação de massas pesadas a serem movimentadas. Onde um espelho, de pequeno formato tem massa e peso menores, possibilitando assim uma rápida movimentação para realinhamento do feixe luminoso.



Figura 3.5 Plataforma de três pontos para movimentação do espelho

No caso de Servo motores, são geralmente usados no projeto de um Gimbal. Servo motores são robustos, porém seu consumo de energia é elevado. (6)

## 3.2 Descrição da técnica Proposta

Nesta parte do texto iremos destacar os principais pontos, detalhes e as práticas desenvolvidas para a medida da turbulência atmosférica, no qual fora utilizado um

método que utiliza a intensidade do sinal óptico incidente no sistema. A técnica é chamada de triangulação por amplitude de sinal, que neste caso é óptico.

Nesta técnica uma série de etapas devem ser seguidas, afim de que os parâmetros necessários à viabilidade da técnica estejam realmente sob controle. A saber, o posicionamento do sistema de recepção em relação ao sistema de transmissão; Estabilidade mecânica do sistema, de forma que qualquer movimento possa interferir na medida. Controle de luminosidade ambiente afim de que somente a luz infra-vermelha da fonte luminosa seja obtida no sistema de recepção. Existem outras questões correlacionadas ao controle da fonte luminosa, no entanto assim como os exemplos anteriores serão trabalhados aqui neste texto com maior atenção.

#### 3.2.1 Sistema de Transmissão

No nosso sistema, em âmbito laboratorial, é feita uma montagem de um enlace horizontal onde o mesmo é composto por um sistema transmissor e por um sistema receptor. Esse sistema, por enquanto, ainda não transmite informação modulada, mas sim um sinal óptico em amplitude enviado continuamente. Essa montagem nos serve a simular por meio de movimentação mecânica veja a Figura 3.6, de forma controlada, a turbulência atmosférica provocada por efeitos térmicos, de pressão e de partículas em suspenção. O controle nessa simulação por movimentação mecânica é fundamental, pois qualquer folga que esse sistema possua pode interferir na realidade dos dados medidos.



Figura 3.6 Ilustração lúdica da movimentação mecânica do sistema transmissor

O sistema de transmissão é composto por suporte metálico, no qual havia preso um motor de passo, e neste um segundo suporte em material plástico no qual é acoplado ferrolho da extensão de fibra da fonte óptica, a qual será chamada aqui de cabeça transmissora veja a Figura 3.7.



Figura 3.7 Detalhe da Cabeça transmissora

O motor utilizado no experimento é constituído por passos de 1,8°. Em termos de resultado serão discutidas questões sobre o quanto se movimenta o feixe de laser em

relação ao anteparo a uma determinada distância, que serão abordadas em tópico pertinente ao caso.

O motor de passo foi controlado com uma placa multifunção da qual se emitiam pulsos digitais para a movimentação desejada. A placa utilizada foi da National Instruments NIUSB6216, veja a Figura 3.8, que foi utilizada também para a aquisição de dados.



Figura 3.8 Placas multifunção NI USB 6216

A fonte luminosa utilizada, veja Figura 3.10 atua na região do infra-vermelho, vibrando a 980 nm de comprimento de onda. Sua potência é de 600 mW. A esta fonte era acoplada a complexo sistema de controle de temperatura, o qual evitava superaquecimento e consequentemente sua inutilização. O módulo de controle de temperatura era o ILX Light Wave modelo LTD – 5525. O controle da alimentação do dispositivo emissor de luz é um fator importante e complementar ao controle de temperatura, pois assim se evitam variações no comprimento de onda central do LASER, e também a manutenção da correta alimentação do dispositivo.



Figura 3.9 Controlador de Temperatura ILX Lightwave LDT – 5525



Figura 3.10 Fonte Luminosa a 980 nm e seu sistema de controle de temperatura

#### 3.2.2 Sistema de Recepção

Qualitativamente, o sistema de recepção de sinais ópticos recebe o sinal óptico, que é transformado para sinal elétrico e enviado para um sistema de aquisição de dados e trabalhados posteriormente, veja a Figura 3.11.



Figura 3.11 Ilustração de esquema qualitativo

O sistema de recepção é dotado de um conjunto de quatro fotodetectores que no caso são responsáveis por receber o sinal óptico. Esse conjunto de receptores esta disposto em um plano e locados de maneira que cada um se situe em cada vértice de um triângulo equilátero, sendo que o quarto detector fica localizado de maneira estratégica no ponto central dente triângulo veja a Figura 3.12.

Este fotodetector central é utilizado, pelo menos até a versão do setup experimental, como elemento chave no alinhamento e centralização entre os sistemas de recepção e de transmissão. Bem como a aquisição de valor de referência como parâmetro de simulação numérica, que será abordada mais adiante.



Figura 3.12 Plano receptor com seus respectivos elementos foto sensíveis

Um parâmetro de relevância no sistema de recepção é a posição relativa dos fotodetectores em um plano de recepção em coordenadas cartesianas, veja a Figura 3.13:



Figura 3.13 Detectores dispostos num plano de recepção representado por coordenadas cartesianas

A posição relativa entre detectores e dos detectores em relação ao centro é importante, pois uma ligeira diferença, um deslocamento a mais de qualquer um dos três detectores pode levar a diferenças no resultado que se esta obtendo. Por exemplo, o deslocamento do detector D1 da figura 3-3 mais para dentro ou mais para fora do âmbito da figura do triângulo pode ocasionar erro na medida, veja a Figura 3.14:



Figura 3.14 Erro no rastreio/na medida de um feixe óptico. Gráfico (x,y) em [mm]

Fazendo uma análise do gráfico do rastreio do feixe óptico, onde a intenção era de deslocar o mesmo do ponto cartesiano (2,0) indo até o ponto (2,-2). Deste último ponto até o ponto (-2,-2) e posteriormente até o ponto (-2,0). O resultado não foi como o esperado.

Uma questão importante no nosso sistema é a simetria do feixe óptico que deve ter sua distribuição de potência o mais próxima de uma distribuição Gaussiana. Neste experimento foi utilizado um laser de bombeio que atua em 980nm e que tem uma potência de 600mW. Devido a sua potência e para garantirmos uma distribuição de potência óptica Gaussiana utilizamos um atenuador de 5dB para diminuir a intensidade do feixe de forma não saturar os receptores, e também um bobina de fibra com 5,5 km de comprimento para extrair os modos de propagação meridionais.

Além da simetria do feixe é importante que os níveis de ruído luminoso sejam evitados. Para isto é necessário que os níveis de luminosidade dentro do laboratório se mantenham baixos, apagando as luzes e quaisquer outras formas de fonte irradiante que possa interferir na medição do sinal óptico através dos fotodetectores.

Ainda tratando de ruído, fez-se necessário o uso de fios condutores bem isolados para que a foto corrente não sofresse com interferência exterior ao cabo que liga os fotodetectores ao circuito de recepção. Para isso foi usado um cabo de rede UTP – Unshielded Tranced Pair categoria 5E e conectores macho e fêmea da Furukawa. Cada condutor de sinal tem seu par aterrado no cabo.

No circuito de recepção foram utilizados resistores variáveis e capacitores. Os resistores variáveis, ou comercialmente chamados de trimpots, foram escolhidos, ao invés de resistências com valor fixo, pois é necessário um ajuste para que os fotorreceptores forneçam respostas de tensão equivalentes. Isso é feito, pois por melhor que seja o controle de qualidade do produto, no caso o fotodetector, ele pode ter ligeiras variações de características que certamente comprometeriam os cálculos para o rastreio do feixe luminoso. No caso dos capacitores o critério para escolha foi relativamente simples. Tal critério foi a escolha de valores de capacitâncias similares.

A parte de fixação e movimentação mecânica deve permanecer firmes e imóveis, pois de qualquer outra forma podem contribuir para adicionar ruído na medição através de vibração mecânica indesejável. Um fator que pode inviabilizar esses critérios é um mau ajuste das peças utilizadas, falta de lubrificação, ou desgaste da própria. Mesmo sendo a peça utilizada um parafuso micrométrico, os requisitos citados anteriormente são válidos.

### 3.3 Matemática da Medida de Turbulência

Na técnica aqui em desenvolvimento utilizada para medir a turbulência atmosférica levam-se em consideração os efeitos do *Beam Wander* e *Beam Spread*. Porém, para o cálculo da constante  $C_n^2$  será levado somente em consideração o deslocamento radial. Desta forma, os efeitos de *Beam Spread* e Cintilação não serão mais abordados.

A variável  $r_c$  representa o deslocamento radial do centro do feixe luminoso no plano do receptor provocado pelo efeito da divagação do feixe. A magnitude de  $r_c$  pode ser obtida por coordenadas retangulares através da seguinte relação de transformação,

$$r_c = \sqrt{x_0 + y_0} \tag{3.1}$$

O efeito de *Beam Wander* é caracterizado estatisticamente pela variância de  $r_c$  no plano de recepção.

A variância  $\langle r_c^2 \rangle$  em enlaces de FSO tem sido equacionada como uma relação empírica e depende dos parâmetros de largura do feixe W, do comprimento do enlace L, e da constante estrutural de índice de refração  $C_n^2$ ,

$$\langle r_c^2 \rangle = 2.42 \cdot C_n^2 \cdot W^{-\frac{1}{3}} \cdot L^3$$
(3.2)

cujo modelo é mais apropriado para turbulências fraca e intermediária.

Um feixe Gaussiano é caracterizado por sua distribuição de potência, no nosso caso um feixe circular com distribuição de potência Gaussiana. O objetivo dos cálculos a seguir é determinarmos o quanto o centro do da Gaussiana deslocou em relação ao centro de coordenadas do plano de recepção. Posteriormente, com a determinação do deslocamento do feixe, utilizamos os resultados destes cálculos para mensurarmos valores do grau de turbulência do meio Atmosférico.

Para um feixe de distribuição de potência gaussiana temos:

$$P_i(x, y) = P_0(x, y) \cdot e^{-\left(\frac{r_i(x, y)}{W}\right)}$$
(3.3)

Ou,

$$P_i = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)} \tag{3.4}$$

onde,  $r_i$ , W e  $P_0$  são a distância radial da posição do detector ao centro do feixe, a largura da Gaussiana e a potência óptica no centro do feixe respectivamente.

Em coordenada cartesianas temos que,

$$r_i = \sqrt{x^2 + y^2}$$
(3.5)

Substituindo na equação teremos,

$$P_i = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{W}\right)}$$
(3.6)

considerando agora que a mesma Gaussiana tenha deslocado seu centro com relação ao um eixo de coordenadas cartesianas ou seja, x0 e y0 deslocados em relação a origem. Temos que pensar em relação de deslocamento do feixe da origem até o ponto deslocado. ou seja a distância entre dois pontos, r, é o queremos determinar por hora.

Temos a distância entre dois pontos dada por,

$$r = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$
(3.7)

onde  $x_1$  e  $x_2$ ,  $y_1$  e  $y_2$  são pontos distintos num plano de coordenadas cartesianas. Num caso mais específico,

$$r_{i} = \sqrt{(x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2}}$$
(3.8)

aqui  $r_i$  representa a distância radial que o feixe se movimenta em relação aos fotodetectores. Assim substituindo na equação temos,

$$P_{i} = P_{0} \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{(x_{i} - x_{0})^{2} + (y_{i} - y_{0})^{2}}}{W}\right)}$$
(3.9)

No nosso sistema temos para cada um dos fotodetectores,

$$P_{1} = P_{0} \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{(x_{1} - x_{0})^{2} + (y_{1} - y_{0})^{2}}}{W}\right)},$$

$$P_{2} = P_{0} \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{(x_{2} - x_{0})^{2} + (y_{2} - y_{0})^{2}}}{W}\right)},$$

$$P_{3} = P_{0} \cdot e^{-\left(\frac{\sqrt{(x_{3} - x_{0})^{2} + (y_{3} - y_{0})^{2}}}{W}\right)},$$

e de uma forma mais geral,

$$P_1 = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{r_1}{W}\right)},$$
$$P_2 = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{r_2}{W}\right)},$$
$$P_3 = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{r_3}{W}\right)}.$$

O objetivo aqui é determinar o deslocamento da posição do ponto de maior intensidade do feixe, assim manipulando as equações que temos para chegarmos a um modelo que atenda ao objetivo mencionado anteriormente.

Normalizando as potências temos,

$$\overline{P_i} = \frac{P_i}{P_0} \tag{3.10}$$

Assim,

$$\overline{P_i} = e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)^2},$$

Organizando a igualdade, teremos

$$\ln \overline{P_i} = -\left(\frac{r_i}{W}\right)^2$$

resolvendo para o termo  $r_i^2$ ,

$$r_i^2 = -\ln \overline{P_i} \cdot W^2$$

Lembrado que a distância entre dois pontos é dada por

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

Assim,

$$r_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$$

Igualando os  $r_i^2$ , finalmente teremos

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + \ln \overline{P_i} \cdot W^2 = 0$$
(3.11)

Chegando a um sistema,

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + \ln \overline{P_1} \cdot W^2 = 0\\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + \ln \overline{P_2} \cdot W^2 = 0\\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + \ln \overline{P_3} \cdot W^2 = 0 \end{cases}$$
3.12

O sistema de equações apresentado acima é incorporado então em uma rotina computacional a qual irá nos retornar o resultado que esperamos, ou seja, o resultado de um par (x, y) que seja raiz deste sistema. (10)

A rotina computacional pode ser feita em qualquer linguagem que se queira, no entanto aqui foi usado o MatLab para o mesmo. Neste foi utilizada a função *fsolve* do programa que usa um algoritmo que otimiza o cálculo de equações não-lineares, o nome

é *Levenberg-Marquardt*. Onde através de um *guess value* são testadas todas as possibilidades de solução para o sistema.

O par (x, y) que é solução para o sistema é o que nos possibilita determinarmos o grau de turbulência atmosférico.

## 3.4 Simulação de um deslocamento.

O objetivo da simulação é de mensurar o quanto podemos realizar experimentalmente. Se o que se quer realmente é possível de realizar. Como forma de aferir se a rotina de programação esta correta foram feitas algumas simulações no MatLab. Anteriormente essas simulações eram feitas em Fortran, que funciona muito bem, no entanto o programa utilizado não funciona corretamente em plataformas Windows superior ao XP. A utilização do MatLab possibilita além da aquisição de dados, o tratamento matemático adequado e a geração de gráficos para análise numa mesma rotina.

Essas simulações foram atestadas em trabalho anterior o que não inviabiliza sua demonstração aqui neste trabalho, na verdade vem com forma de complementar o conteúdo do estudo.

No entanto é importante salientar questões relacionadas à resolução do sistema. Existem dois casos extremos que podem vir a ocorrer que levam em consideração a relação do tamanho da imagem projetada do feixe de laser em um anteparo e a distância relativa dos fotodetectores. No primeiro caso temos um tamanho do spot luminoso menor que o range do sistema.



Figura 3.15 Spot luminoso com tamanho muito menor que a distância entre detectores

Neste caso, mesmo se o feixe se movimentar, qualquer potência que seja lida é interpretada na parte do receptor como ruído, pois o feixe, assumido como Gaussiano, estará no centro do sistema de recepção. Logo o valor de potência detectada será aproximadamente igual à potência do ruído, assim o sistema de equações converge para o ponto (xc,yc)= (0,0). A única chance de detectar a posição do feixe é quando o detector coleta uma potência com SNR>1 (0 dB), porém o erro ainda seria muito grande. Veja o exemplo da Figura 3.16



Figura 3.16 Simulação computacional da movimentação de um feixe com 5,65 mm em um intervalo de 40 mm de deslocamento.



Figura 3.17 Erro absoluto referente a medição do deslocamento de 40 mm com um feixe Gaussiano de 5,65 mm de diâmetro

O segundo caso é quando temos o tamanho do spot luminoso maior que a distância entre os detectores. Onde mesmo que o feixe se movimente a potência incidente não causará variação de tensão nos fotodetectores, assim a potência lida será aproximadamente igual no plano de recepção. Como os 3 detectores estarão próximos, a relação entre "a diferença de potência de sinal entre os detectores" e a potência do ruído será muito pequena. É o caso onde o sistema fica cego e não consegue discernir sobre o quanto variou o feixe luminoso em relação ao anteparo.



Figura 3.18 Spot luminoso com tamanho muito maior que a distância entre detectores



Figura 3.19 Simulação computacional da movimentação de um feixe com 707 mm em um intervalo de 40 mm de deslocamento.



Figura 3.20 Erro absoluto referente a medição do deslocamento de 40 mm com um feixe Gaussiano de 5,65 mm de diâmetro

Os fotodetectores não são pontos perfeitos, e podem causar alguns erros na medição no experimento. Os fotodetectores usados possuem uma área de aproximadamente 6,16 mm<sup>2</sup>, e o spot Gaussiano com área de cerca de 301 mm<sup>2</sup>. Comparando as duas áreas temos  $\frac{6,16}{301} = 2\%$ . Que remete a uma razão entre a abertura do feixe e o tamanho do spot. O limite de detecção depende deste critério. Mais precisamente, o limite que um spot a um dado tamanho pode vir a ser detectado, ou seja,

$$P_n = P_c \cdot e^{-\left(\frac{d}{W}\right)^2}$$

Aplicando o logaritmo natural em ambos os lados, temos:

$$\ln(P_n) = \ln\left(P_c \cdot e^{-(d_W)^2}\right)$$

Resolvendo para a largura W do spot, temos:

$$W = \sqrt{-d^2 \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{P_n}{P_c}\right)}}$$
(3.13)

Sendo  $P_n$ ,  $P_c$ , d e W respectivamente a potência do ruído, potência incidente no fotodetector central, distância radial entre o fotodetector central e os localizados nos vértices de uma figura de triângulo e a largura do spot Gaussiano.

Assim sendo dom as medidas devidamente tomadas, com  $P_n = 1,1mv$ ,  $P_c = 90mv$  e d = 19,47mm, temos W = 9,27mm. Assumindo um valor de distância entre os fotodetectores de  $d = r\sqrt{3}$ . Sendo assim d = 33,72mm, com o limite de detecção de um spot de W = 9,27mm, temos uma razão de  $\frac{W}{d} = 0,27$ . A figura abaixo mostra a

simulação do deslocamento de um feixe no plano em azul e linha pontilhada, e o resultado calculado em vermelho e linha sólida.

Fazendo-se uma análise do comportamento do sistema a medida que se aumenta o tamanho da Gaussiana, é verificada um mudança no traçado da aquisição.

No primeiro exemplo temos uma Gaussiana pouco abaixo do limite de detecção. Notamos que os fotodetectores interpretam o sinal ainda como ruído, sendo o tamanho de 6.36mm ainda muito pequeno para causar qualquer efeito no sistema detector. Assim temos a medição de pontos muito próximos uns dos outros. Veja Figura 3.23.



Figura 3.21 Deslocamento simulado de um feixe no limite de resolução

No segundo exemplo temos uma evolução do comportamento. Notamos que com uma Gaussiana com um tamanho um pouco maior, acima do limite de detecção, começase a perceber, nos fotodetectores, uma diferença entre a potência de sinal e a potência do ruído fazendo-se discernir uma da outra. Veja Figura 3.24.



Figura 3.22 Erro absoluto na medida do deslocamento

No terceiro exemplo é verificada uma melhora considerável, agora com a modelagem de uma gaussiana de 14,14mm. No entanto o ruído ainda é fator limitante, dado que o range solicitado é de 40mm, como mostra a simulação. Veja Figura 3.25.



Figura 3.23 Modelagem computacional de uma Gaussiana com 6,36mm

No quarto exemplo a melhora já é significativa. Podemos perceber na modelagem um range de detecção de 20mm. Veja Figura 3.26.



Figura 3.24 Modelagem computacional de uma Gaussiana com 10,6mm

Conforme podemos observar nos gráficos subsequentes, a medida em que se aumenta o tamanho da largura do feixe o range de detecção melhora. Veja em Figura 3.25, Figura 3.26, Figura 3.27.



Figura 3.25 Modelagem computacional de uma Gaussiana com 14,14mm



Figura 3.26 Modelagem computacional de uma Gaussiana com 17,67mm



Figura 3.27 Modelagem computacional de uma Gaussiana com 19,09mm

## 3.5 Simulações

A seguinte simulação com largura do spot da Gaussiana W=9,27 mm.

A fim de analisar o comportamento do sistema, ou seja, sua resolução e seu range dinâmico foi feita uma simulação com diferentes valores de largura de feixe (W). O resultado da simulação é mostrado a seguir.

Como podemos observar, existe um valor de W que, dependendo da distância "d" entre os detectores, maximiza o valor máximo medido para o deslocamento radial



Figura 3.28 Ponto de otimização entre tamanho da Gaussiana e posições dos fotodetectores da posição radial que pode ser detectada



Figura 3.29 Análise feita com o programa Origin

O gráfico nos mostra que quando ajustada a distância *d* entre os fotodetectores a razão  $\frac{W}{d} = 0.95$  maximiza a posição radial que pode ser detectada com um erro de aproximadamente 2 %. Assim o ponto ideal de distância entre fotodetectores é aproximadamente o tamanho *W* da Gaussiana.

## 4 Experimento

#### 4.1 Análise Preliminar

De forma a determinarmos a posição do feixe em um plano é necessário a caracterização de alguns parâmetros. Um deles é a caracterização do diâmetro do feixe ou tamanho do spot luminoso. Esta caracterização é feita com a manipulação de dados no Programa Origin.

O feixe de laser é projetado em um anteparo, constituído de uma base e de papel vegetal, formando a imagem que é obtida com o auxilio de uma webcam, cujo filtro infravermelho foi previamente retirado, veja Figura 4.1. É necessário que saibamos o perfil de distribuição de potência desse feixe, então com o auxílio do programa ImageJ traçamos um perfil em escala de cinza de acordo com a foto, veja Figura 4.2. Esses dados de perfil em escala de cinza serão manipulados com o auxílio do programa Origin, veja Figura 4.3. Este nos fornecerá a largura do perfil Gaussiano do Spot luminoso.


Figura 4.1 Imagem do laser projetada em anteparo de papel vegetal



Figura 4.2 Perfil de distribuição de potência do feixe de LASER



Figura 4.3 Aproximação da curva por ajuste Gaussiano

Para a manipulação dos dados devemos ter uma escala de medida previamente estabelecida para que o resultado obtido seja satisfatório, ou seja, queremos um resultado do tamanho do Spot em milímetros, pois a escala de medida dos dados se encontra em unidades pixels. Isto é feito utilizando uma ferramenta do ImageJ, que é a seleção em linha (Straight line selection), em uma foto de régua. Com a ferramenta selecionada, selecione um ponto inicial na escala da figura da foto da régua, arraste até o ponto que deseja estabelecer como ponto final e relacione as medidas da régua com as feitas em pixels. Lembrando que esta ferramenta fornecerá o tamanho dessa linha em pixels. A relação necessária à medida é mostrada a seguir:

$$x_{mm_{Spot}} = \frac{x_{pixels_{Spot}} * z_{mm_{régua}}}{y_{pixels_{régua}}}$$
(4.1)

É necessário também adequarmos a curva em relação aos eixos cartesianos. Para isso ajustamos o offset (y0) e o ponto central (x0) obtidos com a ferramenta de fitting Gaussiano (fit to Gaussian).

Com a escala e eixos ajustados é novamente utilizada a ferramenta fit to Gaussian para obtermos a largura da Gaussiana em milímetros.



Ainda temos que adequar a gaussiana obtida com a que será usada no script MatLab. A largura fornecida pelo programa Origin pode ser modelada da seguinte forma para efeitos de cálculo,

$$W = \sqrt{\frac{W_0^2}{2}}$$

Sendo assim uma largura com resultado de 26,90mm no Origin, tem aproximadamente 19,02mm de largura na realidade.

Assim são exibidos alguns resultados obtidos com os parâmetros dados.



Figura 4.4 Rastreio do feixe na horizontal



Figura 4.5 Rastreio do Feixe ao longo do eixo de coordenadas

### 4.2 Resultado experimental

Os resultados que serão mostrados foram executados em ambiente laboratorial, nas dependências da faculdade de engenharia da Universidade Federal Fluminense, no Laboratório de Comunicações Ópticas.

Estes foram executados em regime dinâmico, cuja simulação de turbulência fora feita com auxilio de um motor de passo.

As condições do ambiente na hora da medição eram de total escuro, de forma que não houvesse qualquer tipo de perturbação no receptor, que além do sinal infravermelho detecta luz ambiente. Ações foram tomadas com relação a estabilidade de parte de fixação do sistema na bancada, onde todos os parafusos forma devidamente apertados.

Conexões elétricas da parte do receptor foram refeitas como forma de evitar algum possível distúrbio. No caso cabo de rede, e conectores RJ45 foram utilizados substituindo assim os cabos coaxiais que ali atuavam.

Suporte foi construído para acomodar a terminação óptica da qual emite o feixe de LASER, utilizado para simulação da turbulência. O material usado para a fabricação do mesmo foi Polipropileno e cola quente. Neste foi colocada uma base especifica para a terminação óptica, que é muito comum em muitos equipamentos. Esse suporte foi acoplado a um motor de passo, reutilizado de uma impressora, para que este tivesse movimentação tornando possível a nossa experimentação.

O LASER usado funciona no comprimento de onda de 980 nm com uma potência de 600 mW. Para seu funcionamento foi utilizado uma fonte de corrente variável, e para seu controle de temperatura foi usado equipamento dotado de um elemento Pealtier. Esse controle de temperatura e corrente é importante para evitar um mau funcionamento ou perda desse dispositivo.

Após a devida calibração de posição do sistema, foi feita uma medição da dinâmica de deslocamento do feixe óptico no plano receptor, mostrada na Figura 4.6. Para esta medida, o motor de passo foi controlado pela interface feita em Matlab, e foi imposto a este um movimento oscilatório horizontal de um passo para a esquerda e outro para a direita de  $1.8^{\circ}$ /passo. Este ângulo de deslocamento angular da fonte, e considerando a distância L=33 cm do arranjo experimental, impõe um deslocamento radial no plano receptor de r<sub>c</sub>=10.37 mm, para cada lado, totalizando 20.74 mm. Através da placa de aquisição, foram coletadas 100000 amostras de tensão dos circuitos dos fotodetectores durante 3 segundos. A taxa de amostragem superior a 33kHz é suficiente para amostrar um deslocamento radial do feixe de 15kHz, muito superior à frequência de

deslocamento radial citado na literatura para o efeito do Beam Wander, tipicamente de 1kHz.



Figura 4.6 Rastreamento do feixe óptico no domínio do tempo



Figura 4.7 Detalhe em vermelho da Figura 4.6

O resultado mostrado na Figura 4.6 foi obtido resolvendo o sistema de equações (3.12), usando Pc=90mV. Além da posição instantânea do centro do feixe, o sistema de equações (3.12) calculou a largura do feixe gaussiano com média de W~19,5mm. Note da Figura 4.6 que o valor calculado do deslocamento radial do feixe oscila entre -8 mm e até 12 mm, totalizando uma excussão de 20 mm, que está em concordância com o valor imposto no experimento de 20.74mm. Na Figura 4.7 é mostrado em detalhe parte do traçado em destaque da Figura 4.6. A largura deste traçado, diretamente ligado à resolução do dispositivo em desenvolvimento, indica a presença de ruído nos fotodetectores. Para melhor avaliar o ruído nos fotodetectores e consequentemente a resolução do sistema nas condições do arranjo experimental, foi feito um experimento com a cabeça transmissora em repouso, durante 3 segundos e em tempo real. O resultado deste experimento é mostrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 Rastreamento do feixe óptico em tempo real com o feixe óptico em repouso, durante 3 segundos, mostrando uma variação deslocamento radial máxima de

aproximadamente 0.4mm.

A Figura 4.8 mostra a variação do deslocamento radial em torno de um ponto central, com uma concentração de pontos dentro de uma área de aproximadamente 0,37 mm x 0,40 mm. O valor dos parâmetros para este experimento foram os mesmos adotados no resultado apresentado na Figura 4.7. Como apontado no experimento anterior, à presença de ruído nos fotodetectores provoca um erro absoluto  $\varepsilon_{r_c}$  no cálculo do deslocamento radial definido como sendo:

$$\mathcal{E}_{r_c} = \sqrt{(x_c - \bar{x})^2 + (y_c - \bar{y})^2}$$
 (4.2)

Na ausência de ruído, todas as posições (xc, yc) convergiriam para um único ponto na posição média  $(\bar{x}, \bar{y})$ . Com o auxílio da equação (9) e os dados do experimento mostrado na Figura 4.8 foram calculadas a distribuição de probabilidade do erro absoluto  $\varepsilon_{r_c}$  do deslocamento radial, e a correspondente função de densidade de probabilidade, mostradas na Figura 4.9 (a) e Figura 4.9 (b).



Figura 4.9 (a) Função distribuição de probabilidade do erro absoluto do deslocamento radial, e (b) Função densidade de probabilidade do erro de movimentação radial.



Figura 4.10 Função distribuição de probabilidade do erro absoluto do deslocamento radial

Da análise das funções estatísticas da Figura 4.9 tem-se que a média e o desvio padrão do erro absoluto do deslocamento radial são, respectivamente, 0,083mm e 0,04mm. Note, na Figura 4.9 (b) que em torno do valor médio do deslocamento radial medido, de aproximadamente 11.555mm, é percebida a presença de um erro médio de 0.08mm e ainda com a existência de valores extremos de 0.12mm, em plena concordância com a estatística mostrada na Figura 4.9.

Com o objetivo de comparar o resultado estatístico do erro absoluto obtido pela análise dos dados experimentais com o valor teórico esperado, foi desenvolvida uma expressão analítica, baseada na equação (3.6). Então, calculando a taxa de variação da potência em qualquer dos fotodetectores, temos:

$$\frac{dP_i}{dr} = \frac{\Delta P_i}{\Delta r} = \frac{P_c \cdot 2 \cdot r \cdot e^{-(r/W)^2}}{W^2}$$
(4.3)

Desta forma podemos equacionar qual é o valor da variação do deslocamento  $\Delta r$ em função da variação de potência no fotodetector  $\Delta P$ , obtendo:

$$\Delta r = \frac{W^2 \Delta P \, e^{\left(r/W\right)^2}}{2 \cdot r \cdot P_o} \tag{4.4}$$

Considerando que a variação de potência  $\Delta P$  tem origem no ruído no fotodetector, a quantidade  $\Delta r$  passa a representar o erro induzido por esse ruído na medida do experimento. A Figura 4.11 mostra o valor das tensões medidas nos 3 fotodetectores durante 30ms do experimento da Figura 4.8.



Figura 4.11 Tensões medidas nos fotodetectores durante 30ms do experimento da Figura 4.8

A análise estatística dos dados das tensões medidas da Figura 4.11 mostra a presença de um ruído médio de Pnoise= $\Delta P$  =1,1mV. Recorrendo à equação (10) com W=19,57mm, Pc = 90 mV e  $\Delta Pi$  = 1,1 mV, obtém-se  $\Delta r$ =0,32mm.

Contudo, o valor de  $\Delta r=0,32$ mm deve sofrer uma correção uma vez que no caso do feixe se mover, a potência coletada por um fotodetector cresce a um certo valor enquanto que nos outros a potência decresce na mesma proporção. Então, para que a diferença de potência entre dois fotodetectores seja de  $\Delta P$ , é necessário que haja uma variação de - $\Delta P/2$  em um, e de  $\Delta P/2$ . Assim, a equação (10) pode ser reescrita como:

$$R_{L} = \frac{W^{2} \Delta P e^{\left(r/W\right)^{2}}}{4 \cdot r \cdot P_{c}}$$

$$\tag{4.5}$$

onde RL é o limite da resolução do experimento, dado por

$$R_L = \frac{\Delta r}{2} = 0.16mm$$

que está em concordância com o valor mostrado na Figura 4.9 (b) para a soma da média com o desvio padrão do erro absoluto do deslocamento radial. (11)

## Conclusão

Neste trabalho foi mostrado o avanço no desenvolvimento de uma técnica capaz de caracterizar o grau de turbulência de um meio para uso em um enlace de FSO. A técnica aqui apresentada mostra reais possibilidades de sua aplicação em campo, rastreando a dinâmica do deslocamento radial do feixe óptico no plano receptor. A análise estatística e analítica mostraram perfeita concordância quantitativa, o que demonstra domínio da técnica em desenvolvimento. Desta análise, e da equação (4.6) foi mostrado que o limite de resolução da técnica para a medida do deslocamento radial depende fortemente da SNR nos foto-detectores, assim como da relação em campo entre a distância entre os foto-detectores do dispositivo e a largura do feixe óptico W.

## Referências

1. COLÉGIO SÃO FRANCISCO. *A arte na pré-história e as primeiras formas de comunicação. Portal São Francisco.* [Online] [Citado em: 29 de Julho de 2012.] http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/arte-na-antiguidade/pintura-rupestre-1.php.

2. WIKIPEDIA. *Arte Rurpestre*. [Online] [Citado em: 29 de Julho de 2012.] http://pt.wikipedia.org/wiki/Arte\_rupestre.

3. LAHANAS, MICHAEL. *Ancient Greek Communication Methods*. *Hellenica*. [Online] [Citado em: 29 de Julho de 2012.] http://www.mlahanas.de/Greeks/Communication.htm.

4. BELL, ALEXANDER G. *Photo Phone Transmiter*. *Google*. [Online] [Citado em: 29 de Julho de 2012.] http://www.google.com/patents/US235496.

KOECHNER, WALTER. Solid State Laser Engineering. 6<sup>a</sup> Edição. s.l.: Springer, 2006.
 978-0387-29094-2.

6. WILLEBRAND, HEINZ E GHUMAN, BAKSHEESH S. *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks.* 1<sup>a</sup> Edição. s.l. : Sams, 2001. 067232248X.

7. ANDREWS, LARRY C. E L., RONALD PHILLIPS. *Laser Beam Propagation Through random Media.* s.l. : Spie, 2005. 0819459488.

8. Balanis, Constantine A. Advanced Engineering Electromagnetics. s.l.: John Wiley & Sons, 1989. 0471621943.

9. ISHIMARU, AKIRA. *Wave propagation and scattering in Random Media.* 1<sup>a</sup>. s.l. : Academic Press, 1978. Vol. I. 0123747015.

10. HENRIQUE SILVA, VINICIUS NUNES. Desenvolvimento Experimental de uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre. Niterói : s.n., 2009.

11. NUNES SILVA, VINICIUS HENRIQUE. A New Triangulation Like Technique for the Evaluation of the Refractive Index Structure Constant in Free-Space Optical Links. JLT.
2011.

12. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ARTE RURPESTRE. *A arte rupestre pré-histórica*. [Online] [Citado em: 29 de Julho de 2012.] http://www.globalrockart2009.abarterupestre.org.br/arterupestre.asp.

13. SCHEPS, RICHARD. *Introduction to Laser diode-pumped solid state Lasers*. Washington : Spie, 2001. 0819442747.

# Anexos

### Programas

#### Simulações

razão r/W contra W/d

% % % % Universidade Federal Fluminense % Mestrado em Telecomunicações % % Matricula: M054.109.014 % % Aluno: Nelson Cevidanes Nascimento de Assis % % Disciplina: Tese % % Professor: Dr. Andres Pablo Lopez Barbero %

 %
 Tópico: Estudo Orientado
 %

 %
 %
 %

 %
 %
 %

 %
 %
 %

% Este programa objetiva trabalha a razão r/W contra W/d

%

% Limpeza do ambiente de trabalho

clear all;close all;clc

% \_

% Variaveis globais

global x1 x2 x3 y1 y2 y3 RMM i nv = 10;

PZ = 0.09; % Nivel de tensao em [V] volts

% Posicoes dos fotodetectores em [mm] milimetros.

x2= 0; y2= 19.47; x1=-y2\*sin((120\*pi)/180); y1=y2\*cos((120\*pi)/180); x3= y2\*sin((120\*pi)/180); y3=(y1);

% Excursão de valores [x,y] para simulação

A = str2double(input ('InsiraValorInicial: ','s')); B = str2double(input ('InsiraValorFinal: ','s')); C = str2double(input ('ValorDoIntervalo: ','s')); TG = C;alfa = B-A; delta = alfa/(C-1); xis = A:delta:B; jota = A:delta:B; posfeixe(:,1) =xis; posfeixe(:,2) = jota; l = 0;% Prelocação de memória  $pos_feixe = zeros(1);$  $largura_ = zeros(1);$ largura = zeros(1);VM = zeros(1);R = zeros(1); $VM_1 = zeros(1);$ valor\_max\_rc = zeros(1); % Largura da Gaussiana for  $W_{-} = 10$ :delta:200 l = l+1;% W\_=20;

 $W = sqrt((W_^2)/2);$ largura\_(l,1) = W\_; largura(l,1) = W;

#### % \_\_\_

%Cálculos

[L C] = size(posfeixe);
% Préalocamento de memória
% Loop para obtencao de niveis de tensao for j = 1:1:L;

 $r1 = (sqrt((x1 - posfeixe(j,1)).^2 + (y1-posfeixe(j,2)).^2));$   $r2 = (sqrt((x2 - posfeixe(j,1)).^2 + (y2-posfeixe(j,2)).^2));$   $r3 = (sqrt((x3 - posfeixe(j,1)).^2 + (y3-posfeixe(j,2)).^2));$  R(j,1) = r1; R(j,2) = r2; R(j,3) = r3;  $P1 = PZ * exp(-(R(j,1)/W).^2);$   $P2 = PZ * exp(-(R(j,2)/W).^2);$  $P3 = PZ * exp(-(R(j,3)/W).^2);$ 

VM(i,1) = P1;VM(j,3) = P2;VM(j,4) = P3;VM(:,2) = PZ;end % Geração do ruído Noise\_ = randn(size(VM)); Noise\_1 = Noise\_./100; Media = mean (Noise\_1); STDDEV= std(Noise 1): RANDNUMBER= Media + STDDEV: % Cálculo para adição de ruído ao sistema  $VM_1 = zeros(1);$ for i = 1:1:L%  $VM_1(i,1) = VM(i,1) + RANDNUMBER(1) + Noise_1(i,1);$ %  $VM_1(i,2) = VM(i,2) + RANDNUMBER(1,2) + Noise_1(i,2);$  $VM_1(i,3) = VM(i,3) + RANDNUMBER(1,3) + Noise_1(i,3);$ % %  $VM_1(i,4) = VM(i,4) + RANDNUMBER(1,4) + Noise_1(i,4);$  $VM_1(i,1) = VM(i,1) + Noise_1(i,1);$  $VM_1(i,2) = VM(i,2) + Noise_1(i,2);$ VM 1(i,3) = VM(i,3) + Noise 1(i,3); $VM_1(i,4) = VM(i,4) + Noise_1(i,4);$ end tic p=0; % Loop para obtencao do par [x, y] for i = 1:1:L p=p+1;  $r4 = (sqrt(log(VM_1(i,1)./VM_1(i,2)).*W^2));$  $r5 = (sqrt(log(VM_1(i,3)./VM_1(i,2)).*W^2));$  $r6 = (sqrt(log(VM_1(i,4)./VM_1(i,2)).*W^2));$ % Acúmulo de valores dos raios de deslocamento RMM(i,1) = abs (r4);RMM(i,2) = abs (r5);RMM(i,3) = abs (r6);% "chute" inicial para a solucao x0 = [0:0:0]:options = optimset('MaxFunEvals',500,'MaxIter',500,'Display','off','Algorithm','levenbergmarquardt'); [x,fval,exitflag] = fsolve(@triangi,x0,options); % Chamada da rotina otimizada pos feixe(i,1) = x(1,1);  $pos_feixe(i,2) = x(2,1);$ end  $Media_{(1,1)} = mean (pos_feixe(:,1));$ % Media da coluna 1  $Media_{(1,2)} = mean (pos_feixe(:,2));$ % Media da coluna 2 % disp ('Inicio') %Mostra informação no Command Window % disp ('Calculo do Erro') %pré-alocamento de memória  $delta_x = zeros(1);$ % tic inicia contador tic for i = 1:L $delta_x(i,:) = sqrt ((pos_feixe(i,1)-Media_(1,1))^2+(pos_feixe(i,2)-Media_(1,2))^2);$ 

end tempo cal err = toc; % toc finaliza contador tempo\_final = toc;  $rc = sqrt((pos_feixe(:,1)).^2 + (pos_feixe(:,2).^2));$ valor\_max\_rc (l,1)= max(rc); end [L C]=size(valor\_max\_rc); z = 10;k = 150;beta = k-z; denominador= L-1; vari = beta/denominador;  $W_t = z:vari:k;$ r i = 19.47; % d = 20.1;  $d=r_i*sqrt(3);$ valor\_max\_rc = valor\_max\_rc';  $W_div_d = W_t/d;$ rc\_div\_W = valor\_max\_rc./W\_t; % rc\_div\_W = r\_i./W\_t; maximo = max (rc div W);rc\_div\_W = rc\_div\_W./maximo; figure (3) plot (W\_div\_d, rc\_div\_W, 'b.') ylabel ('r\_c max / W ','fontsize',20) xlabel ('W / d', 'fontsize', 20) title('Ponto ótimo entre distância entre detectores e tamanho da Gaussiana', 'FontWeight', 'bold', 'fontsize', 20) grid

Simulação do caminho do feixe na diagonal

% % % Universidade Federal Fluminense % % Mestrado em Telecomunicações % % % Matricula: M054.109.014 % Aluno: Nelson Cevidanes Nascimento de Assis % % Disciplina: Tese % % Professor: Dr. Andres Pablo Lopez Barbero % % Tópico: Estudo Orientado % % % %Simulação do caminho do feixe na 

% Limpeza do ambiente de trabalho clear all;close all;clc

%

```
% Variaveis globais
global x1 x2 x3 y1 y2 y3 RMM i
nv = 10;
PZ = 0.09;
             % Nivel de tensao em [V] volts
% Posicoes dos fotodetectores em [mm] milimetros.
x_{2}=0;
y2=19.47;
x1=-y2*sin((120*pi)/180);
y1=y2*cos((120*pi)/180);
x3 = y2 * sin((120 * pi)/180);
y3=(y1);
% Excursão de valores [x,y] para simulação
A = str2double(input ('InsiraValorInicial: ','s'));
B = str2double(input ('InsiraValorFinal: ','s'));
C = str2double(input ('ValorDoIntervalo: ','s'));
alfa = B-A; %Lembrar que esse cálculo tem que ficar em módulo!!!!16/09/2010
delta = alfa/(C-1);
xis = A:delta:B;
jota = A:delta:B;
posfeixe(:,1) =xis;
posfeixe(:,2) = jota;
%
%Calculos
[L C] = size(posfeixe);
% Préalocamento de memória
VM = zeros(1);
R = zeros(1);
% Loop para obtencao de niveis de tensao
for j = 1:1:L;
  r1 = (sqrt((x1 - posfeixe(j,1)))^2 + (y1 - posfeixe(j,2))^2));
  r2 = (sqrt((x2 - posfeixe(j,1)))^2 + (y2 - posfeixe(j,2))^2));
  r3 = (sqrt((x3 - posfeixe(j,1)))^2 + (y3 - posfeixe(j,2))^2));
  R(i,1) = r1;
  R(j,2) = r2;
  R(i,3) = r3;
  P1 = PZ * exp(-(R(j,1)/W).^{2});
  P2 = PZ * exp(-(R(j,2)/W).^{2});
  P3 = PZ * exp(-(R(j,3)/W).^2);
  VM(j,1) = P1;
  VM(j,3) = P2;
  VM(j,4) = P3;
  VM(:,2) = PZ;
end
% Geração do ruído
Noise_ = randn(size(VM));
Noise_1 = Noise_./10000;
Media = mean (Noise 1);
STDDEV= std(Noise 1):
RANDNUMBER= Media + STDDEV;
```

% Cálculo para adição de ruído ao sistema VM 1 = zeros(1);for i = 1:1:L $VM_1(i,1) = VM(i,1) + Noise_1(i,1);$  $VM_1(i,2) = VM(i,2) + Noise_1(i,2);$ VM 1(i,3) = VM(i,3) + Noise 1(i,3); $VM_1(i,4) = VM(i,4) + Noise_1(i,4);$ end % Prelocação de memória pos feixe = zeros(1); tic p=0; % Loop para obtencao do par [x, y] for i = 1:1:Lp=p+1; $r4 = (sqrt(log(VM_1(i,1)./VM_1(i,2)).*W^2));$  $r5 = (sqrt(log(VM_1(i,3)./VM_1(i,2)).*W^2));$  $r6 = (sqrt(log(VM_1(i,4)./VM_1(i,2)).*W^2));$ % Acúmulo de valores dos raios de deslocamento RMM(i,1) = abs (r4);RMM(i,2) = abs (r5);RMM(i,3) = abs (r6);x0 = [0;0;0];% "chute" inicial para a solucao options = optimset('MaxFunEvals',500,'MaxIter',500,'Display','off','Algorithm','levenbergmarquardt'); [x,fval,exitflag] = fsolve(@triangi,x0,options); % Chamada da rotina otimizada $pos_feixe(i,1) = x(1,1);$  $pos_feixe(i,2) = x(2,1);$ end  $Media_{(1,1)} = mean (pos_{feixe(:,1)});$ % Media da coluna 1 $Media_{(1,2)} = mean (pos_feixe(:,2));$ % Media da coluna 2 disp ('Inicio') %Mostra informação no Command Window disp ('Calculo do Erro') delta x = zeros(1); % pré-alocamento de memória % tic inicia contador tic for i = 1:L $delta_x(i,:) = sqrt ((pos_feixe(i,1)-Media_{(1,1)})^2+(pos_feixe(i,2)-Media_{(1,2)})^2);$ end tempo\_cal\_err = toc; % toc finaliza contador disp ('Final Calculo Erro')  $rc = sqrt((pos_feixe(:,1)).^2 + (pos_feixe(:,2).^2));$ tempo\_final = toc; fprintf('%s %f %f %f ', 'Tempo final é:', tempo\_final); % Saída Formatada para exibir tempo total de aquisição e cálculo fprintf('\n'); figure (1) plot(pos\_feixe(:,1),pos\_feixe(:,2),'r.',posfeixe(:,1),posfeixe(:,2),'-.b') hold axis([-25 25 -25 25]) h = legend('Calculado','Simulado',8);

set(h,'Interpreter','none') xlabel ('Variação de x [milimetros] ','fontsize',20) ylabel ('Variação de y [milimetros] ','fontsize',20) title('Posição do feixe','FontWeight','bold','fontsize',20) grid figure (2) plot (pos\_feixe(:,2), delta\_x,'k.') xlabel ('Deslocamento radial [milimetros] ','fontsize',20) ylabel ('Erro Absoluto','fontsize',20) grid

### Cálculo

%	***************************************	*******	***************************************	
%	%			
%	Universidade Federal Fluminense	%		
%	Mestrado em Telecomunicações	%	%	
%	Matricula: M054.109.014	%		
%	Aluno: Nelson Cevidanes Nascimento de Assis		%	
%	Disciplina: Estudo dirigido	%		
%	Professor: Dr. Andres Pablo Lopez Barbero		%	
%	Tópico: Estudo Orientado	%		
%	%			
%**************************************				
%	%			
% Limpeza do ambiente de trabalho				
clear all; close all; clc				
% ************************************				
% Aquisição de Dados de Tansão				
•				
% Informações sobre a placa de aquisição				
disp ("Listagem de todos os dispositivos instalados!");				
out = daqnwinio;				
disp (Informações sobre a placa a ser utilizada!);				
(aqnwinio (maq);				
a = anaioginput(maaq, Dev1); % NI USB 6210 % Instanciando uma entrada anaiogica $a = addehennel(a; 1; 4); 0 (Adjaionende Conois)$				
cii = addchainiei(ai,1:4); % Adicionando Canais % Especificação de configuração de um concl.de entrade enclógico				
ai ChannalSkaw:				
al. Chalineiskew, set(ai 'InputType' 'SingleEnded'):				
set(al, Input I ype, SingleEnded), si ChannelskewMode – 'Minimum':				
ai. Chamiciske wivioue – Winnihum, ai TriggerTyne – 'Immediate'				
set(ch 'SensorRange' [-1 1])				
set(ch 'Input Range' [-1 1])				
set(ch 'UnitsRange' [-1 1])				
ai SampleRate $-33000$ .				
al.sampleKale – 55000;				

```
ai.SamplesPerTrigger = 3;
amostras = ai.SamplesPerTrigger;
% Declaração de variáveis Globais
global x1 x2 x3 y1 y2 y3 r1 r2 r3 i
sim = input('Capturar Amostras? (sim=1, nao=0):');
                                     % Questão!!!
i = 0;
W_ = 27.67981:
             % Diametro da Gaussiana Origin
                % Diametro da Gaussiana que eu preciso
W = sqrt((W_^2)/2);
% Posições relativas do fotodetectores no plano cartesiano em [mm]
x^2 = 0:
% y2= 19.0257;
y2=12;
x3=-y2*sin((120*pi)/180);
y3=y2*cos((120*pi)/180);
x1 = y2 * sin((120 * pi)/180);
y1=(y3);
% Alocação de memória para melhorar a performance do script
pos_feixe = zeros(1);
VM = zeros(1,4);
Tempo de aquisicao = zeros(1);
tempo_de_calculo = zeros(1);
Matriz_tempo_total = zeros(1);
tempao = zeros(1);
relogio = zeros(1);
while sim == 1
 i = i+1:
 start(ai) % Inicio a aquisição
data = getdata (ai);
tic
r1 = (sqrt(-log(data(i,1)./data(i,2)).*W^2));
 r2 = (sqrt(-log(data(i,3)./data(i,2)).*W^2));
 r3 = (sqrt(-log(data(i,4)./data(i,2)).*W^2));
 RM(i,1) = (r1);
 RM(i,2) = (r2);
 RM(i,3) = (r3);
% "chute" inicial para a solucao
 x0 = [0;0;0];
 options = optimset('MaxFunEvals',100,'MaxIter',100,'Display','off','Algorithm','levenberg-
marquardt');
 [x,fval,exitflag] = fsolve(@triang,x0,options); % Chamada da rotina otimizada
 tempo_final = toc*1000;
```

```
% Limpo o Command Window
 clc
ai.ChannelSkew:
pos_{feixe(i,1)} = x(1,1)
 pos_{feixe(i,2)} = x(2,1)
 VM(i,:) = data(i,:);
if i == 1
   tempao(i,:) = tempo_final;
 else tempao(i,:) = tempao((i-1),:) + tempo_final;
 end
i = 0;
 pause (0.1)
end
disp ('Calma,... ta acabando')
delta_x = zeros(1);
Media = median (pos_feixe);
for i = 1:L
delta_x(i,:) = sqrt ((pos_feixe(i,1)-Media(1,1))^2 + (pos_feixe(i,2)-Media(1,2))^2);
end
Media erro = median(delta x);
Desvio_Padrao = std(delta_x);
Erro = delta_x;
posicao = [pos_feixe(:,1) pos_feixe(:,2)];
estatistica = [Media Media_erro Desvio_Padrao];
tensao = VM;
Fotodetectores = [x1 y1;x2 y2;x3 y3];
P zero = max(VM);
Parametros = [P_zero W];
```

```
disp ('Fim!!!')
```