

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

CARACTERIZAÇÃO DA CONSTANTE DE ESTRUTURA DO ÍNDICE
DE REFRAÇÃO (C_n^2) ATRAVÉS DE TRIANGULAÇÃO DE
POTÊNCIAS ÓPTICAS

GÚBIO DE OLIVEIRA

Niterói
2014

GÚBIO DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DA CONSTANTE DE ESTRUTURA DO ÍNDICE DE
REFRAÇÃO (C_n^2) ATRAVÉS DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS
ÓPTICAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de
Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva

Niterói
2014
GÚBIO DE OLIVEIRA

CARACTERIZAÇÃO DA CONSTANTE DE ESTRUTURA DO ÍNDICE DE
REFRAÇÃO (C_n^2) ATRAVÉS DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS
ÓPTICAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal
Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de
Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Aprovado em 16 de maio de 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva - Orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Thiago Vieira Nogueira Coelho
Universidade Federal de Juiz de Fora

Niterói
2014

Dedico este trabalho a meus familiares, amigos, aos colegas do LaCop, aos professores e todos os demais funcionários do Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da UFF.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, pois Ele é quem me dá forças e ânimo para seguir em frente.

A minha família pelo apoio incondicional, inclusive nos momentos de ausência e profundo estresse.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva e Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero, sempre disposto a me auxiliar em todos os aspectos; sanando minhas dúvidas e mostrando-me a direção a seguir.

Aos amigos Sydnei Bragantine Germano, Luiz Fernando Silva e demais colegas do LaCop, que me apoiaram e ajudaram nas inúmeras dificuldades vencidas.

Ao meu orientador Fabiano Vargas Silva Coelho e à Prof. Dra. Leni Joaquim de Matos que confiaram em mim e muito contribuíram para minha caminhada.

Resumo

O feixe óptico ao se propagar pela atmosfera sofre forte influência dos fatores climáticos ao longo de seu percurso. Fenômenos climáticos como a chuva, neblina e neve atenuam e espalham o sinal óptico. As variações de temperatura, pressão e umidade ocasionam alterações no índice de refração do meio impondo à luz os efeitos indesejados da turbulência atmosférica, a saber, a cintilação, o alargamento e a divagação do feixe. Como consequências desses fenômenos, têm-se a limitação da taxa de transmissão de dados e das distâncias dos enlaces ópticos em espaço livre.

Este trabalho apresenta a turbulência atmosférica, suas características e consequências. Em seguida, é exposta a técnica de medição da turbulência por triangulação de potências, determinando a constante de estrutura do índice de refração (C_n^2). Foram realizadas quatro provas experimentais visando à demonstração da viabilidade da técnica de medição de turbulência em ambiente externo.

Palavras-chave: Turbulência atmosférica, , divagação do feixe, cintilação, alargamento do feixe, sistema de rastreamento.

Abstract

The free space optical systems (FSO) performance is affected by phenomena such as absorption, scattering and atmospheric turbulence . As a result of turbulence occur Scintillation, Beam Spread and Beam Wander . The quantification of atmospheric turbulence is performed by so-called refractive index structure constant C_n^2 . By using the relation between C_n^2 and beam wander is possible to trace the optical beam using the technique of triangulation. In this work the turbulence measurements are made by four experimental setups using the technique above.

Keywords— atmospheric turbulence, free space optics, beam wander, scintillation, beam spread, tracking system.

Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1. Histórico	14
1.2. Motivação.....	15
1.3. Revisão bibliográfica	17
1.4. Organização da dissertação	18
CAPÍTULO 2 – EFEITOS ATMOSFÉRICOS	20
2.1. Efeitos atmosféricos sobre a luz.....	20
2.2. Impacto do clima.....	22
2.3. Absorção atmosférica.....	23
2.4. Espalhamento atmosférico	24
2.5. Atenuação atmosférica	27
2.6. Turbulência atmosférica.....	27
2.7. Efeitos da turbulência atmosférica sobre as áreas de aplicação do LASER	30
2.7.1. FSO (<i>Free Space Optics</i>).....	30
2.7.2. Comunicações satélite (<i>laser satcom</i>)	31
CAPÍTULO 3 – TEORIA DA TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA	33
3.1. Turbulência atmosférica.....	33
3.2. Constantes de estrutura	35
3.2.1. Função estrutura.....	36
3.2.2. Constante de estrutura do índice de refração	36
3.3. Divagação do feixe (<i>Beam Wander</i>)	39
3.3.1. Modelo geral da divagação do feixe	39
3.3.2. Casos especiais para a formulação da divagação do feixe.....	41
CAPÍTULO 4 TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS	43
4.1. Análise qualitativa.....	43
4.2. Análise quantitativa.....	45
4.3. Dispositivo original	48
4.3.1. Resolução do dispositivo original.....	49
CAPÍTULO 5 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	52
5.1. Histórico	53
5.2. Arranjo experimental I	53

5.3. Análise de resultados do Arranjo I.....	59
5.4. Arranjo experimental II.....	60
5.5. Análise de resultados do Arranjo II	63
5.6. Arranjo experimental III	64
5.7. Análise de resultados do Arranjo III.....	72
5.8. Arranjo experimental IV	74
5.9. Análise de resultados do Arranjo IV.....	81
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO	83
CAPITULO 7 BIBLIOGRAFIA.....	85
CAPITULO 8 ANEXOS	88
8.1. Especificações cintilômetro	89
8.2. Especificações fotodetectores	90
8.3. Especificações colimador.....	92
8.4. Especificações <i>beam expander</i>	93

Índice de Figuras

Figura 1-1: Utilização do cintilômetro em aeroportos.....	16
Figura 1-2: Câmera CCD.....	17
Figura 2-1: O espectro eletromagnético	21
Figura 2-2: Gráfico da distribuição de chuvas na cidade do Rio de Janeiro.	22
Figura 2-3: Curva característica do espectro de absorção	24
Figura 2-4: Espalhamento Rayleigh	25
Figura 2-5: Comprimento de onda x Espalhamento Rayleigh	26
Figura 2-6: Espalhamento Mie	27
Figura 2-7: Variação de C_n^2 com a altitude.....	28
Figura 2-8: Representação da cintilação.....	29
Figura 2-9: <i>Beam Wander</i>	29
Figura 2-10: O enlace FSO.....	30
Figura 2-11: Aplicações do <i>laser satcom</i>	31
Figura 3-1: Vórtices do escoamento turbulento	34
Figura 3-2: Teoria da cascata de energia	35
Figura 3-3: Gráfico C_n^2 x Tempo	38
Figura 3-4: Divagação do feixe	39
Figura 3-4: Representação do w_o	41
Figura 4-1: Posição da Gaussiana no momento $t_0(a)$; Posição da Gaussiana no momento t_1	44
Figura 4-2: Arranjo contendo 4 fotodetectores em um anteparo.....	45
Figura 4-3: Posição dos fotodetectores no anteparo.....	46
Figura 4-4: Dispositivo original	49
Figura 5-1: Arranjo Experimental I.....	54
Figura 5-2: Projeção do feixe LASER no anteparo de papel vegetal.....	55
Figura 5-3: Gaussiana calculada.....	55
Figura 5-4: Feixe óptico parado.....	56
Figura 5-5– Resposta a 200 Hz	57
Figura 5-6– Resposta a 1,0 kHz	58
Figura 5-7– Resposta a 1,5 kHz	58

Figura 5-8– Conjunto colimador expansor	61
Figura 5-9: Projeção do sinal LASER (a); Projeção do sinal LASER e do sinal do Apontador LASER	61
Figura 5-10: Projeção do sinal óptico no papel vegetal.....	62
Figura 5-11: Gráfico V x Amostras do ruído do Arranjo Experimental II.....	62
Figura 5-12: Desenho esquemático do Arranjo Experimental III	64
Figura 5-13: Receptor posicionado no corredor	64
Figura 5-14: Projeção do feixe LASER no papel vegetal	65
Figura 5-15: Gaussiana calculada.....	66
Figura 5-16: Gaussiana calculada no programa Origin.....	67
Figura 5-17: Variação dos valores do eixo x sob o efeito da turbulência gerada pela pistola de ar quente	68
Figura 5-18: C_n^2 calculado no dia 30 de novembro de 2013	68
Figura 5-19: Medida mais turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.	69
Figura 5-20: Medida menos turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.....	69
Figura 5-21: Medida mais turbulenta - Análise espectral.....	70
Figura 5-22: Medida menos turbulenta - Análise espectral.....	70
Figura 5-23: Ruído de 20 mV no fotodetector central.....	71
Figura 5-24: Desenho representando o Arranjo Experimental IV.....	74
Figura 5-25: Transmissor próximo à janela externa e vista do prédio D da Escola de Engenharia.....	75
Figura 5-26: C_n^2 calculado no dia 20 de dezembro 2013.	76
Figura 5-27: Medida mais turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos	77
Figura 5-28: Medida menos turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.....	77
Figura 5-29: Média mais turbulenta- Análise espectral.....	78
Figura 5-30: Média menos turbulenta- Análise espectral.....	78
Figura 5-31: Ruído de 37 mV no fotodetector central.....	79
Figura 5-32: Ruído de 53 mV no fotodetector central.....	79
Figura 5-33: Ruído de 48 mV no fotodetector central.....	80

Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Atenuação do FSO sobre efeito da neblina	23
Tabela 5-1: C_n^2 calculado sob o efeito da pistola de ar quente	68
Tabela 5-2: Relação turbulência e dispersão dos centros instantâneos.	81

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Histórico

Desde o início dos tempos o homem se pergunta por que as estrelas brilham. As diferentes civilizações e culturas responderam a este questionamento das mais diversas formas. As lendas indígenas brasileiras contam que as estrelas são crianças travessas que fugiam de suas mães e se esconderam no céu. [1]

Os gregos antigos também teorizaram sobre o brilho das estrelas. Aristóteles em 300 AC atribuiu a cintilação destes astros à fraqueza da visão humana. Os planetas por estarem mais próximos da Terra podiam ser vistos com clareza, já as estrelas estariam tão distantes que não se poderiam fixar suas imagens de forma satisfatória. [2] A teoria da fraqueza da visão humana se tornou popular.

No século XVI, novas ideias surgiram, mas nenhum consenso com relação à questão. Kepler acreditava que o brilhar das estrelas advinha de uma propriedade intrínseca e que elas realmente mudavam de cor. Já Leonardo Da Vinci acreditava que a cintilação não decorria da natureza das estrelas, e sim de uma ilusão de óptica. Brahe afirmava que o fenômeno em questão era produto do movimento das estrelas que se deslocavam tão rapidamente que pareciam cintilar. [3]

Foi Isaac Newton, no século XVIII, quem finalmente determinou que a causa da cintilação das estrelas estava no ar atmosférico. Durante sua discussão sobre a construção de um novo telescópio que teria espelhos substituindo lentes em alguns estágios, ele descreve como a turbulência atmosférica seria responsável pela alteração do caminho percorrido pela luz proveniente das estrelas. Em seu trabalho, Newton sugere que os telescópios sejam construídos em locais elevados, como no alto de montanhas, evitando-se, assim, a turbulência atmosférica. [4]

Em 1922 Richardson [5] propôs uma análise qualitativa da turbulência atmosférica através do estudo do número de Reynolds, introduzindo a teoria da cascata energética, esta análise é desenvolvida no Capítulo 3. Kolmogorov [6] em 1941 estudou a turbulência em fluidos incompressíveis, analisando também o número de Reynolds e suas hipóteses deram origem a novos trabalhos sobre turbulência atmosférica. Em 1960, Tatarski estudou os efeitos da turbulência atmosférica sobre a propagação de ondas eletromagnéticas planas e esféricas, mais especificamente no espectro óptico, propondo uma análise quantitativa baseada nas hipóteses de Kolmogorov. Tatarski introduz a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 como medida da turbulência atmosférica, como é abordado no Capítulo 3 [7] .

Após 1960 com o advento da criação do LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) por Mainman [8] e o rápido crescimento de suas aplicações, os estudos sobre a turbulência atmosférica se intensificaram e podem-se encontrar trabalhos de Lawrence e Strohbehn, Prokhov, Fante, Uscinski, Ishimaru, Rytov e Andrews [9], todos sobre a turbulência atmosférica e as consequências na propagação da luz.

1.2. Motivação

A criação do LASER implicou no surgimento de uma infinidade de aplicações em diversas áreas do conhecimento. Nas telecomunicações, por exemplo, o LASER abriu as portas para o desenvolvimento das comunicações ópticas em meios confinados e não confinados. Assim, como consequência imediata os estudos dos efeitos do meio na propagação da luz ganharam notória importância.

A comunicação óptica no espaço livre, mais conhecida como FSO (*Free Space Optics*), é um sistema de comunicação ponto-a-ponto onde a informação é transmitida através de uma portadora óptica em um meio não confinando, o ar. Nesses sistemas, o receptor e o transmissor são posicionados, normalmente, distantes de 4.000m e as taxas de transmissão chegam a 2,5 Gbps [Anexo 8.1]. Como o ar é o principal canal de comunicação desses

sistemas, a portadora óptica fica suscetível às condições atmosféricas. Entre os fatores atmosféricos que influenciam a propagação da luz pode-se citar chuva, a neve, a neblina e a turbulência atmosférica.

A turbulência atmosférica é a variação do índice de refração do ar quando este sofre aquecimento pelas superfícies expostas principalmente ao sol. As consequências de tal fenômeno são os efeitos que o mesmo impõe na propagação da luz: cintilação, *beam wander* e *beam spread*. Estes efeitos levam a variações da potência óptica nos fotodetectores dos transceptores, podendo ocasionar perda da informação. No mercado já existem equipamentos comerciais para a medida da turbulência atmosférica, entre eles o cintilômetro que se utiliza de um feixe LASER para medidas de turbulência câmeras CCD (*Charge-couple Device*) e caracterizadores de feixe. Na figura 1-1 observa-se a utilização do cintilômetro para medidas de turbulência atmosférica em aeroportos-e na figura 1-2 um caracterizador de luz .

Este trabalho tem como principal objetivo caracterizar a turbulência atmosférica utilizando-se da técnica de triangulação de potências ópticas [10], através da quantificação do parâmetro chamado constante de estrutura do índice de refração (C_n^2). O dispositivo proposto realiza o rastreamento do centro do feixe luminoso, podendo inclusive auxiliar na compensação das variações de posição impostas pela turbulência atmosférica.



Figura 1-1: Utilização do cintilômetro em aeroportos

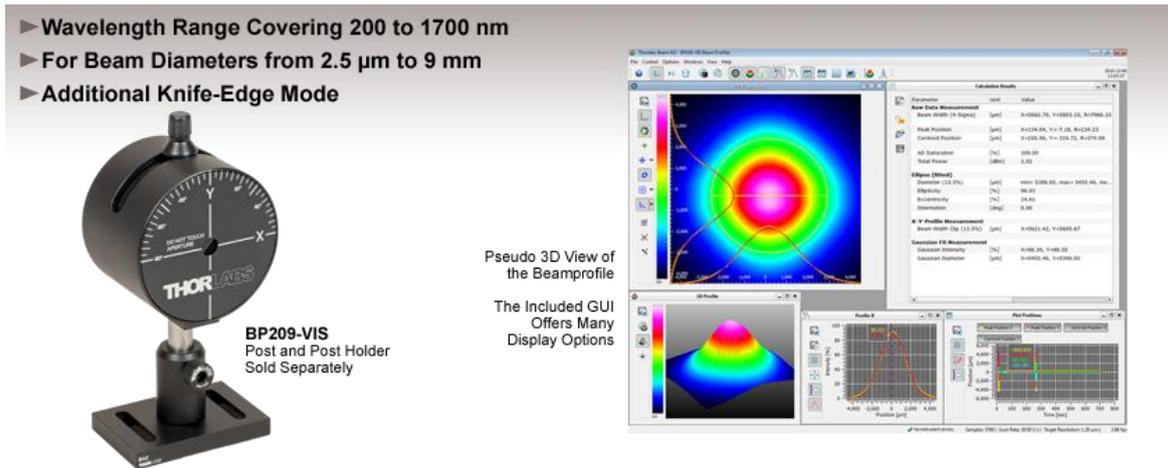


Figura 1-2: Caracterizador de luz

1.3. Revisão bibliográfica

Vários são os trabalhos publicados sobre o estudo da turbulência atmosférica. Entre os experimentos mais recentes pode-se citar a utilização de uma câmara de turbulência [11]. Neste trabalho, é proposto um experimento capaz de controlar a temperatura e a intensidade do vento em uma câmara para simular várias condições de turbulência atmosférica. Com um LASER, injeta-se luz na câmara e determina-se a posição instantânea do centro do feixe utilizando-se de uma câmera CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Com as variações na posição do centro do feixe óptico devido à turbulência, calcula-se o C_n^2 e o relaciona com as variações de temperatura e vento que foram previamente definidas.

Outro experimento relacionado à medida de turbulência utilizou-se de um *Rangefinder*, equipamento de medição de distâncias baseado em LASER [12]. Posicionando o equipamento a 5,4 m de um anteparo para reflexão do sinal LASER, utilizaram-se placas aquecedoras para a simulação da turbulência atmosférica. Foram apresentadas três medidas de C_n^2 com suas respectivas análises espectrais. Verificou-se que o *Beam Wander*, em especial, apresentou característica exponencial negativa com valores significativos até 200 Hz.

A técnica utilizada nessa dissertação para as medidas de turbulência atmosférica baseia-se no princípio da triangulação de potências [13]. Basicamente, mensura-se o grau de turbulência atmosférica pelas medidas das intensidades de potência óptica recebidas em quatro fotodetectores posicionados em um anteparo. No caso, a simulação da turbulência é realizada por meio de estágios de translação instalados na base do anteparo. Verificou-se que a técnica é capaz de rastrear o feixe óptico e medir turbulência pelo tratamento estatístico da variação da posição dos centros instantâneos.

1.4. Organização da dissertação

Este trabalho foi organizado em dois blocos: O primeiro bloco, Capítulos 1 ao 3, apresenta os aspectos teóricos da turbulência atmosférica e o segundo bloco, Capítulos 4 ao 6, traz os aspectos experimentais e seus resultados.

No Capítulo 1 encontra-se um breve histórico do fenômeno da turbulência atmosférica, as primeiras observações, o interesse dos pensadores da antiguidade, o estudo pela astronomia e o início da pesquisa pela engenharia. Na parte dedicada à motivação é apresentado um panorama da influência da turbulência atmosférica na propagação da luz e como é realizada a sua medida. O capítulo termina apresentando estudos sobre a turbulência atmosférica e a técnica de triangulação de potências explorada nessa dissertação.

O Capítulo 2 apresenta os efeitos da atmosfera sobre a propagação da luz. Começando pelos fenômenos climáticos, como chuva, neve e a neblina, e a conseqüente degradação do sinal óptico que, por sua vez, pode vir a inviabilizar a instalação de sistemas de comunicação óptica. A interação da luz com a atmosfera dá origem a fenômenos tais como a absorção, espalhamento, atenuação e turbulência. Este último fenômeno é dividido em três outros, cintilação, *Beam Wander* (divagação do feixe) e o alargamento do feixe (*Beam Spread*). O capítulo termina apresentando a relação entre a turbulência atmosférica e os sistemas ópticos que operam na banda C, com ênfase no FSO e na comunicação satélite.

No Capítulo 3 há um aprofundamento do estudo da turbulência, apresentando-se os elementos necessários à compreensão dos experimentos propostos neste trabalho. Assim, descreve-se sucintamente a teoria de turbulência em fluidos incompressíveis de Kolmogorov aplicada à atmosfera, tornando-se possível o tratamento estatístico da turbulência através das constantes de estrutura de temperatura e índice de refração. O capítulo segue estudando a teoria do *Beam Wander*, necessária para compreensão da técnica, aqui utilizada, que mensura o C_n^2 caracterizando a turbulência atmosférica local.

O Capítulo 4 traz a técnica da triangulação de potências ópticas para a caracterização da turbulência atmosférica. São realizadas as análises qualitativa e quantitativa da técnica e é apresentado o dispositivo para a medida da turbulência. Por fim, o capítulo relaciona a potência encontrada em cada um dos fotodetectores do dispositivo com a posição instantânea do centro do feixe óptico incidente, resultando no rastreamento do feixe.

O Capítulo 5 apresenta os quatro experimentos realizados, tendo a medida de turbulência atmosférica em campo como o principal objetivo. Os experimentos foram denominados Arranjo Experimental de I a IV. No Arranjo Experimental I, foi verificada a

resposta em frequência do dispositivo, no Arranjo Experimental II, estendeu-se a distância de medida, no Arranjo Experimental III foi realizada medida *indoor* de turbulência atmosférica e no experimento IV foi realizada a medida em campo de turbulência *outdoor*.

O Capítulo 6 é a conclusão do trabalho, apresentando as perspectivas futuras e ideias a serem implementadas sobre o tema.

CAPÍTULO 2

EFEITOS ATMOSFÉRICOS

O clima e a turbulência atmosférica são os dois principais fatores causadores da degradação do sinal nos enlaces ópticos. Com isso, neste capítulo são abordados os principais efeitos do clima tais como a chuva, neblina e neve; e os efeitos atmosféricos, entre eles, a turbulência, absorção e espalhamento na propagação da luz. No final do capítulo são apresentadas em linhas gerais as principais interações entre a turbulência atmosférica e a performance da propagação da luz em meios não confinados, a exemplo do FSO (*Free Space Optics*) e os sistemas de comunicação satélite.

2.1. Efeitos atmosféricos sobre a luz

Para facilitar a compreensão dos efeitos da atmosfera sobre a luz se faz necessária uma breve explanação sobre este fenômeno. A natureza da luz pode ser interpretada de duas maneiras, pela teoria clássica da onda eletromagnética (1873) ou pela teoria quântica de Planck interpretada por Einstein (1955). Na teoria clássica, a luz é estudada como sendo uma onda eletromagnética de pequeno comprimento de onda, na ordem de 10^{-12} a 10^{-16} m, estando sujeita às leis de Maxwell. Na teoria quântica, a luz seria composta por pacotes de energia chamados fótons. Esta última teoria complementou os conhecimentos da natureza da luz já existentes, porém, a primeira continua sendo amplamente aceita e será à base deste trabalho.

O espectro eletromagnético é o conjunto de todas as ondas eletromagnéticas de diferentes frequências, ou comprimentos de onda, e são separadas em bandas. A onda eletromagnética referente aos comprimentos de onda da luz encontra-se nas regiões do infravermelho, visível e ultravioleta do espectro eletromagnético. A figura 2-1 apresenta o espectro eletromagnético.

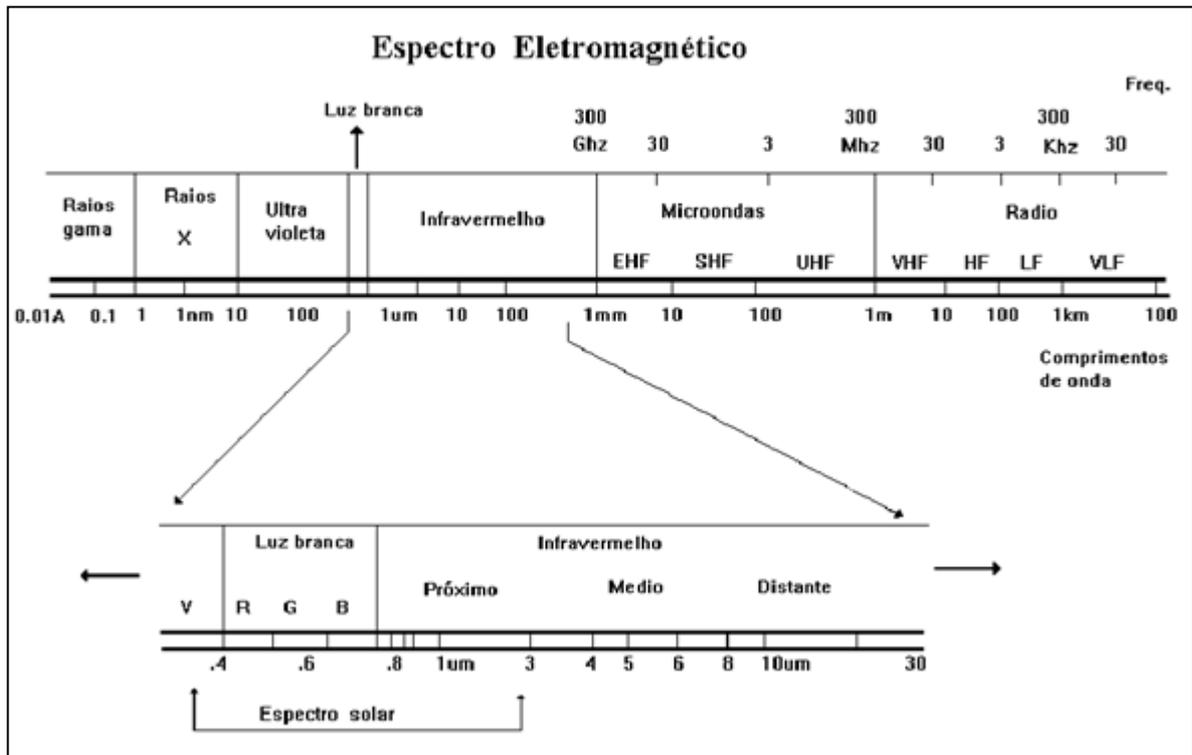


Figura 2-1: O espectro eletromagnético.

A atmosfera terrestre é composta de moléculas de gases e pequenas partículas em suspensão. A luz interage com estes componentes dando origem a uma gama de fenômenos que influenciam sua propagação, tais como a turbulência, absorção e espalhamento.

A absorção, espalhamento e a turbulência são os três principais fenômenos que influenciam o sinal óptico. A absorção e o espalhamento pelas moléculas de gases e partículas em suspensão são dependentes do comprimento de onda e dão origem, principalmente, à atenuação. A turbulência do canal óptico com origem na alteração aleatória do índice de refração do meio traz como consequências a divagação e o alargamento do feixe, além da cintilação. Outros fenômenos atmosféricos como a chuva, neblina e neve também devem ser levados em consideração no estudo dos fatores de degradação do sinal óptico.

2.2. O impacto do clima

O clima exerce notória influência nos sistemas ópticos em espaço livre. Por exemplo, locais com grande ocorrência de neblina podem inviabilizar a implantação de sistemas ópticos, pois a atenuação da portadora óptica pode chegar a 271 dB/km [14]. Os fenômenos meteorológicos que mais influenciam o FSO dependem, principalmente, do comprimento de onda da portadora óptica, são eles: chuva, neve e neblina.

A chuva possui as maiores partículas entre os fenômenos aqui citados. Seus tamanhos variam de 200 μm a 2000 μm sendo significativamente maiores que o comprimento de onda utilizado no FSO. As gotas de chuva são aproximadamente esferas e a atenuação tem sua principal origem no espalhamento. A atenuação advinda da precipitação causa atenuação moderada, na maioria dos casos, por exemplo, uma chuva de 25 mm/hora atenua o sinal em 6 dB/km, levando-se em conta que os enlaces FSO são, em sua maioria, menores que 500m, a atenuação seria de 3dB no total. Por exemplo, as chuvas no estado do Rio de Janeiro em período de grande precipitação não chegam a 40 mm/dia [15], como se pode concluir na figura 2-2, exercendo, portanto pouca influência no enlace FSO.

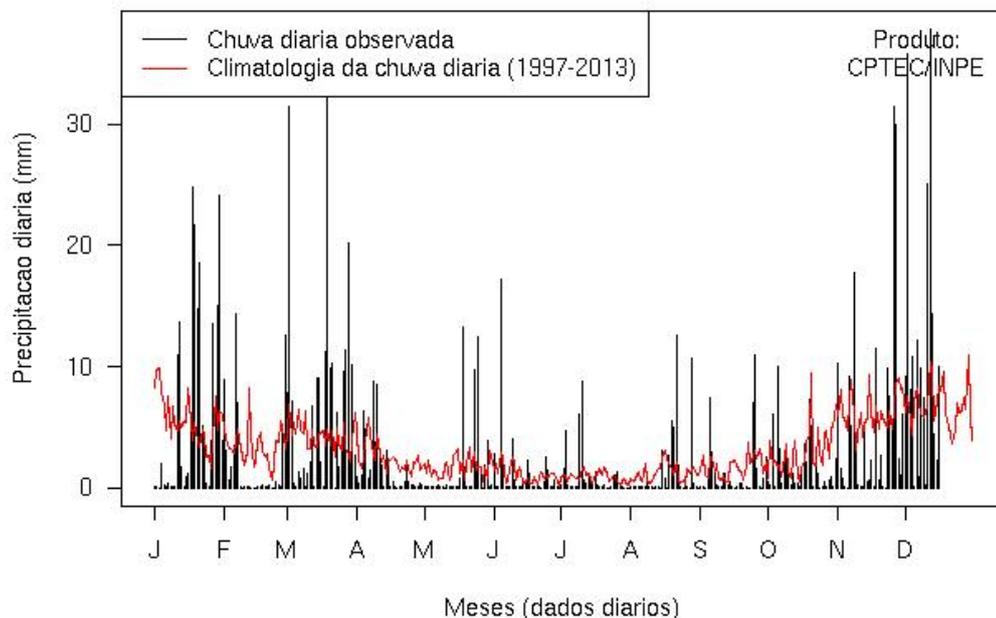


Figura 2-2: Gráfico da distribuição de chuvas na cidade do Rio de Janeiro.

A neve provoca atenuação de sinal maior que a chuva, porém significativamente menor que a neblina. O espalhamento advindo da neve não tende a ser um problema para o FSO tendo em vista o tamanho dos flocos, muito maiores, em comparação com o comprimento de onda usado ordinariamente. A atenuação provocada pela neve tem valores compreendidos entre 3 dB/km e 30 dB/km. [14]

A neblina é o fator de maior degradação do sinal óptico, pois as partículas de neblina, menores que $100\mu\text{m}$, se aproximam do comprimento de onda da luz utilizado no FSO [16]. Este fenômeno climático ocorre principalmente em regiões próximas ao mar ou montanhosas. A perda pode chegar a 271 dB/km o que permite concluir que o enlace FSO pode se tornar inviável.

Na tabela 2-1 verifica-se a variação da atenuação com a densidade de neblina e a comparação com os valores encontrados para o dia claro. Vale observar que a atenuação causada pela neblina fina se compara ao da chuva grossa (25 mm/hora) com atenuação de 4,22 dB/km, valor notoriamente mais expressivo que o de um dia claro onde a atenuação é de 0,06dB/km.

Condição do tempo	Visibilidade	Perda (dB/km)
Neblina densa	0 a 50 m	-271,65
Neblina moderada	500 m	-20,99
Neblina leve	770 m	-12,25
Neblina fina	1,9 Km	-4,22
Bruma	2,8 km	-2,58
Chuva Grossa	2,8 km	-2,58
Bruma leve	5,9 km	-0,96
Claro	18,1 km	-0,24
Muito claro	23 km	-0,06

Tabela 2-1: Atenuação do LASER sob o efeito da neblina

2.3. Absorção Atmosférica

A atmosfera terrestre é um meio que tem como característica a absorção. Este fenômeno ocorre quando um fóton interage com moléculas gasosas da atmosfera e é absorvido, tendo, então, sua energia luminosa convertida em cinética ou térmica [9]. A absorção tem grande relação com o comprimento de onda do sinal que atravessa a camada atmosférica. Como exemplo, a absorção gerada por O_2 e O_3 elimina principalmente comprimentos de onda na faixa de $2\mu\text{m}$ e quase não exerce influência no comprimento de onda do visível.

As moléculas podem ser caracterizadas pelo seu índice de refração, cuja parte imaginária k , coeficiente de extinção, é relacionada com α_a coeficiente de absorção como se segue [14]:

$$\alpha_a = \frac{4\pi k}{\lambda} = \sigma_a N_a = A_a \quad (2-1)$$

onde σ_a é a capacidade de absorção de uma determinada partícula e N_a é a concentração de partículas de absorção. Sendo assim, o coeficiente de absorção α é função da densidade de partículas e de suas características intrínsecas ligadas à absorção.

Os sistemas ópticos operando nos comprimentos de onda na faixa do infravermelho tem absorção principalmente por partículas de dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3) e vapor de água (H_2O). Uma curva característica do espectro de absorção pode ser observada na figura 2-3 [14]

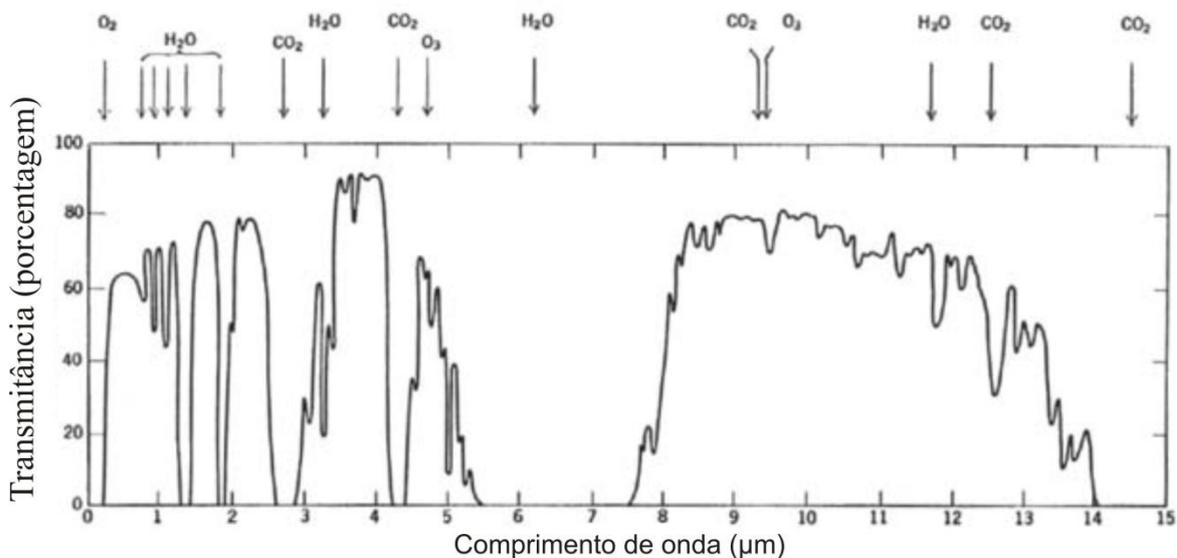


Figura 2-3: Curva característica do espectro de absorção.

A absorção molecular, na região de 0,7 a 2,0 μm , tem sua ocorrência relacionada principalmente com o vapor de água e a partir de 2,0 μm com a combinação do vapor de água e do dióxido de carbono [16].

2.4. Espalhamento atmosférico

O espalhamento de ondas eletromagnéticas ocorre quando o sinal ao passar por uma determinada camada de ar encontra moléculas ou partículas que vão mudar aleatoriamente a direção do seu deslocamento. Assim como na absorção, o espalhamento tem grande relação com o comprimento de onda. Entretanto, no espalhamento ocorre o redirecionamento e redistribuição da luz, diminuindo a quantidade de potência óptica no receptor, diferentemente da absorção, onde a energia do sinal é atenuada. O tipo do espalhamento é determinado pelo tamanho físico das partículas, podendo ser em sua maioria espalhamento Rayleigh ou Mie [14]. O tamanho da partícula pode ser descrito como:

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

Onde λ é o comprimento de onda do sinal transmitido e r o raio da partícula em questão. Para $x_0 \ll 1$, o espalhamento é Rayleigh, para $x_0 \approx 1$, o espalhamento é Mie e para $x_0 \gg 1$, o espalhamento pode ser tratado utilizando-se óptica geométrica.[17]

O espalhamento Rayleigh, ou espalhamento molecular, é causado por moléculas e partículas pequenas em comparação com o comprimento de onda do sinal. A luz ao incidir sobre estas partículas induz um desbalanceamento de cargas que geram dipolos que oscilam na mesma frequência do sinal incidente- e os elétrons energizados reirradiam espalhando a luz, como segue na figura 2-4.

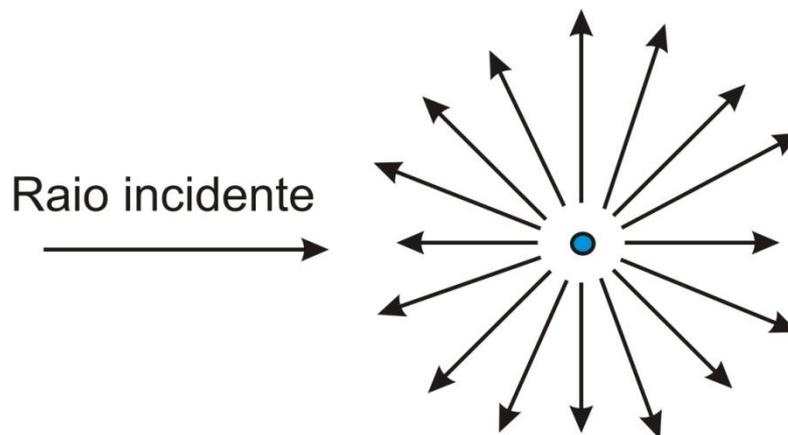


Figura 2-4: Espalhamento Rayleigh.

O coeficiente de espalhamento Rayleigh pode ser descrito como sendo:

$$S_a = \frac{0,827NA^3}{\lambda^4} \quad (2-3)$$

onde N é a quantidade de moléculas por unidade de volume e A a área de secção transversal do espalhamento. Como se pode perceber, o fator de Rayleigh, λ^{-4} , demonstra a relação inversa entre comprimento de onda e a influência deste espalhamento. Assim, no IR, pode-se negligenciar este fenômeno. A figura 2-5 de mostra a influência do espalhamento Rayleigh com relação ao comprimento de onda do sinal [14].

Como exemplo do espalhamento \Rayleigh, pode-se citar o fenômeno da coloração azulada do céu, onde as partículas em suspensão são bem menores que o comprimento de onda da luz, favorecendo, principalmente, o espectro da cor azul.

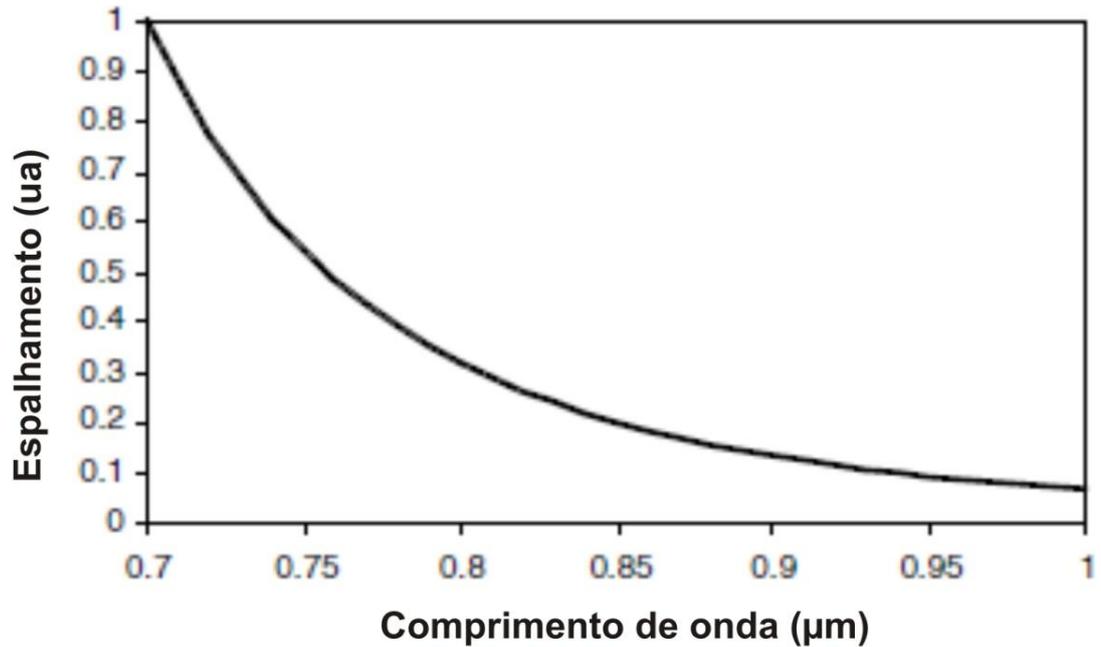


Figura 2-5: Comprimento de onda x Espalhamento Rayleigh.

O espalhamento Mie, ou espalhamento por aerosol, ocorre quando a luz incide sobre uma partícula da mesma ordem de magnitude em comparação com comprimento de onda do sinal incidente. O cálculo do coeficiente do espalhamento Mie é dado por [16]:

$$S_a(\lambda) = 10^5 \int_0^\infty Q_d \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n' \right) \pi r^2 \frac{d(r)}{dr} dr \quad (2-4)$$

Onde n_i é a concentração da partícula, r_i o raio desta partícula e Q_i a eficiência do espalhamento da mesma. O espalhamento Mie é considerado para efeitos de atenuação somente quando há a presença de neblina, nevoeiro ou poluição, neste caso as partículas são grandes o suficiente para causarem deterioração considerável do sinal. Segue representação do espalhamento Mie na figura 2-6.

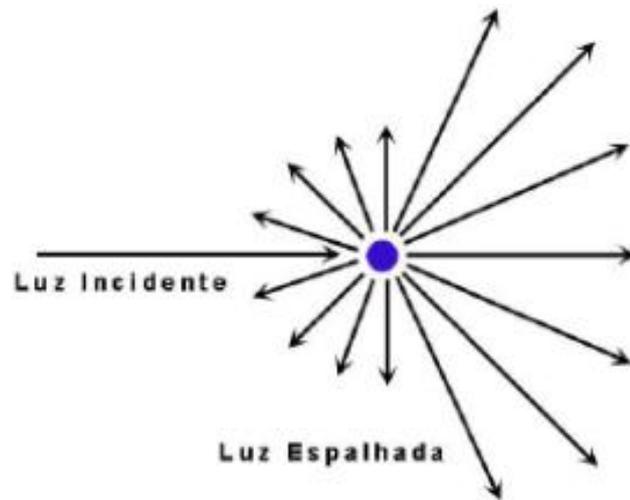


Figura 2-6: Espalhamento Mie.

2.5. Atenuação atmosférica

O fenômeno da atenuação atmosférica é a composição da absorção atmosférica e espalhamento atmosférico. Também conhecida como extinção, a atenuação atmosférica foi estudada por BEER que em sua Lei expressa matematicamente o seguinte [18]:

$$\tau = \exp [-\alpha(\lambda) L] \quad (2-5)$$

onde τ é a transmitância ou transmissão atmosférica (adimensional), L é a distância na qual o sinal propaga, $\alpha(\lambda)$ é o coeficiente de atenuação ou extinção. O produto $\alpha(\lambda)L$ é chamada profundidade óptica

O coeficiente de extinção é composto de duas partes como se segue:

$$\alpha(\lambda) = A_a + S_a, \quad [m^{-1}] \quad (2-6)$$

Onde A_a é o coeficiente de absorção (α_a) e S_a é o coeficiente de espalhamento

2.6. Turbulência atmosférica

A turbulência atmosférica é um fenômeno que tem origem no aquecimento da superfície da terra e por conseguinte da camada de ar adjacente. O movimento turbilhonar gerado pelo aquecimento do ar produz células de diferentes índices de refração que se movimentam

aleatoriamente influenciando na propagação do sinal óptico. Assim, o feixe de luz experimenta três efeitos sob o fenômeno da turbulência: a divagação do feixe, a cintilação e o alargamento do feixe. Estes fenômenos estão relacionados com o tamanho das células de turbulência encontradas na atmosfera

Para mensurar a turbulência foi estabelecido o coeficiente de estrutura do índice de refração, C_n^2 . Este coeficiente varia com o passar do dia, estando compreendido, ordinariamente, entre $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ nos momentos de maior insolação e $10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ no período noturno. O C_n^2 varia também com a altitude, diminuindo à medida que o sistema se afasta das superfícies aquecidas. A figura 2-7 apresenta o gráfico do perfil de turbulência a partir do solo até 10.000 metros. O C_n^2 varia com a altitude h a taxa de $h^{-4/3}$. Próximo ao solo o C_n^2 está entre $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ e $10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ enquanto a altitudes maiores que 10.000 metros é reduzido para $10^{-20} \text{ m}^{-2/3}$.

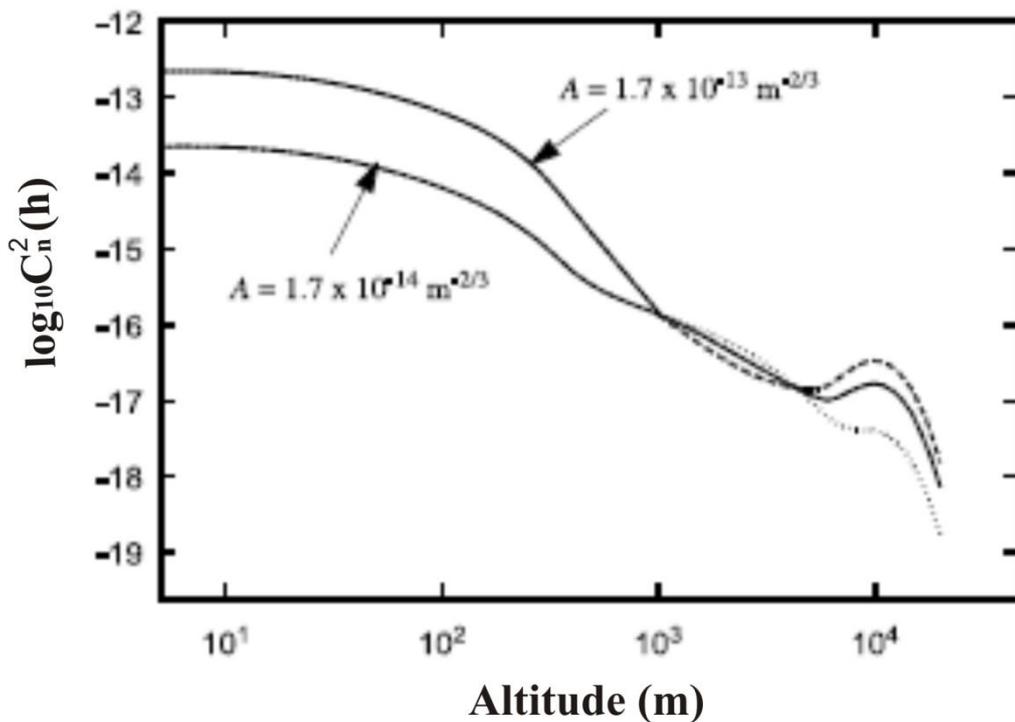


Figura 2-7: Variação de C_n^2 com a altitude.

A cintilação ocorre quando a luz atravessa região da atmosfera onde as células de índice de refração são relativamente menores que o diâmetro do feixe óptico. Assim a frente de onda é deformada, alterando-se a distribuição da potência óptica, ocorrendo, então, o aparecimento de “manchas” no plano do receptor (figura 2-8 (b)). A figura 2-8 (a) apresenta a propagação do sinal óptico por um meio onde as células de turbulência são menores que o feixe.

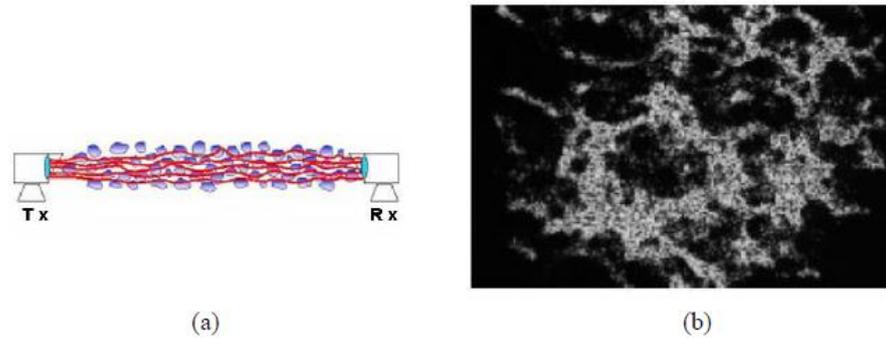


Figura 2-8: Representação da cintilação

O alargamento do feixe ocorre quando o feixe ao passar por um meio turbulento tem seu raio efetivo (W) aumentado. Este raio consiste na distância do centro do feixe onde a intensidade normalizada do sinal cai a $1/e$. O alargamento do feixe tem como consequência a diminuição da densidade de potência óptica no receptor, tendo em vista que esta densidade varia inversamente como o raio. [14]

A divagação do feixe (*Beam Wander*) ocorre quando a luz atravessa uma região onde as células de índice de refração são maiores, relativamente ao tamanho do diâmetro do feixe (W). Neste caso, ocorrem variações aleatórias da posição do centro do feixe óptico no plano do receptor. A figura 2-9 (a) apresenta o feixe LASER sob a influência das células de turbulência e a figura 2-9(b) demonstra as variações dos centros instantâneos do feixe no plano do receptor.

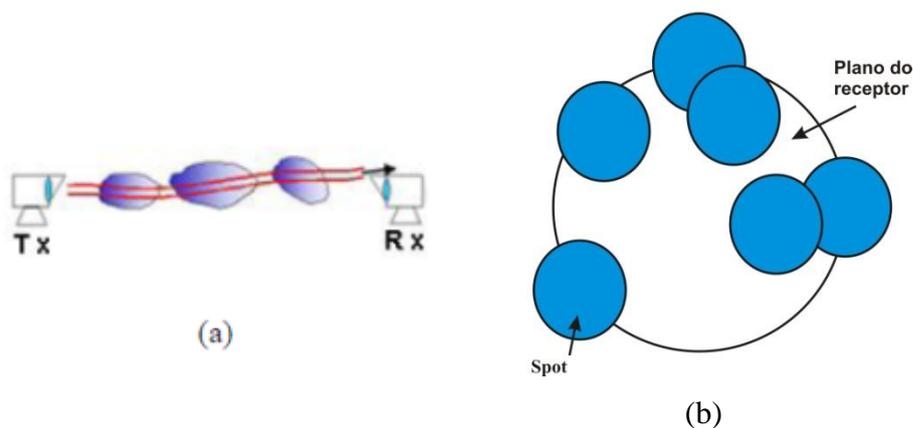


Figura 2-9: Efeito do *Beam Wander* sobre a propagação da luz (a). Alteração do posição do spot de luz no plano do receptor (b).

2.7. Efeitos da turbulência atmosférica sobre as áreas de aplicação do LASER

Até o momento foram apresentadas algumas características da luz, fatores de degradação da potência óptica e sua interação com a atmosfera e com os fenômenos climáticos. Nesta seção é apresentada a influência da turbulência atmosférica em dois sistemas ópticos no espaço livre. Os comprimentos encontrados nestes sistemas variam desde a região do visível (400 nm) ao infravermelho (1650 nm).

A construção de sistemas baseados em LASER exige do projetista um grande conhecimento das propriedades atmosféricas. O projeto deve levar em consideração não somente as exigências tecnológicas, mas também as ambientais. A determinação da exequibilidade do projeto será pautada nos seguintes parâmetros envolvendo a potência óptica: quantidade emitida, quantidade atenuada, absorvida ou espalhada e quantidade detectada. A sensibilidade do sistema e a taxa de transmissão determinarão a adequabilidade da proposta, verificando-se o atendimento às exigências do projeto. Desta forma, o estudo das condições atmosféricas e suas influências sobre a propagação da luz se tornam imperativos na consecução de um sistema satisfatório.

2.7.1. FSO (*Free Space Optics*)

Como já visto anteriormente, *Free-Space Optics* ou Sistema de Comunicação Óptica em Espaço livre consiste na utilização de uma fonte de luz, para emissão de um sinal óptico e estabelecer um enlace de comunicação em meio não confinado. Este sistema opera na faixa do IR (infravermelho) utilizando comprimentos de onda compreendidos entre 850 e 1550 nm coincidindo com janelas de transmissão atmosférica, sofrendo, assim, menor atenuação durante a propagação. A transmissão é realizada ponto a ponto com dois transceptores, um em cada extremo do sistema como ilustrado na figura 2-10.



Figura 2-10: O enlace FSO.

O FSO é bastante suscetível à turbulência atmosférica. Este sistema é ordinariamente comissionado a poucas dezenas de metros do solo. Analisando a figura 2-7 pode-se perceber que a turbulência atmosférica apresenta maior intensidade em altitudes até 100 metros, afetando principalmente os enlaces horizontais. A turbulência atmosférica sobre este sistema pode atingir valores altos na ordem de 10^{-12} a 10^{-14} tornando, em alguns casos, inviável a sua implementação, dependendo de quão crítico é o alinhamento para o desempenho do enlace.

2.7.2. Comunicações Satélite (*laser satcom*)

A comunicação satélite com o uso do LASER ou *laser satcom*, tem sido pesquisada e desenvolvida desde os anos de 1960 pelas agências espaciais dos Estados Unidos da América, NASA (*National Aeronautics and Space Agency*), europeia, ESA (*European Space Agency*) e japonesa, NASDA (*National Space Development Agency*), através de vários programas [19].

Laser satcom é a tecnologia que se utiliza do espectro óptico para a transmissão de informações em substituição ao espectro na faixa do microondas (300 MHz a 300 GHz) entre satélites e bases receptoras. A exemplo do FSO, são utilizados transceptores equipados com fontes LASER capazes de enviar e receber dados pela modulação da luz. As distâncias envolvidas nestes enlaces são da ordem de centenas a milhares de quilômetros exigindo o refinamento dos mecanismos de alinhamento e controle do sistema. Os avanços tecnológicos alcançados nos últimos 50 anos permitem vislumbrar as comunicações satélite por LASER como exequíveis, com a manutenção de enlaces consistentes com a previsão de taxas de transferência de 2,5 Gbps [19]. A figura 2-11 apresenta algumas utilizações do *laser satcom*.

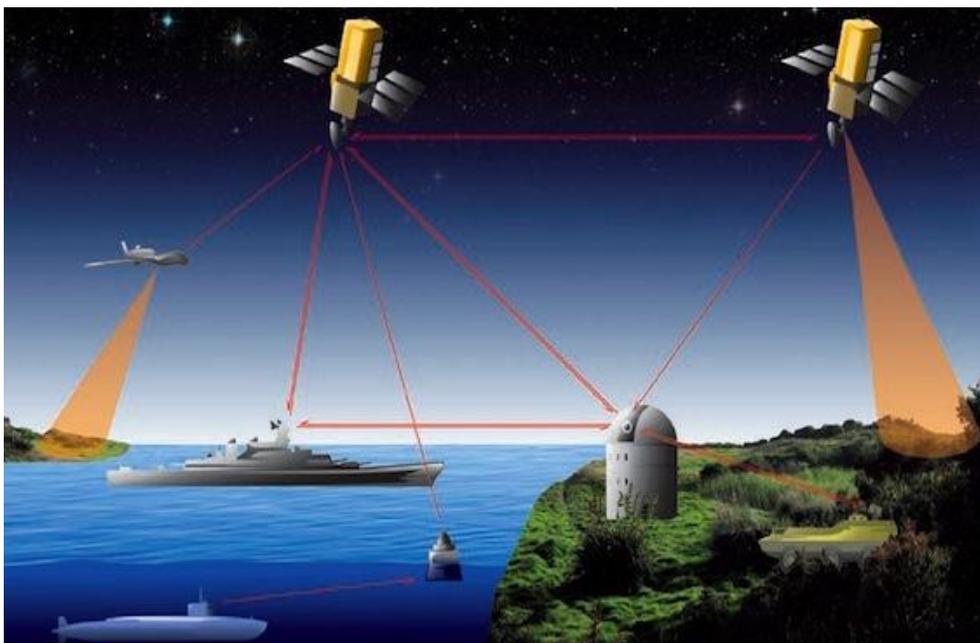


Figura 2-11: Aplicações do *laser satcom*.

Apesar das vantagens encontradas nos enlaces satélite a LASER, a turbulência atmosférica provoca perturbações no sinal, principalmente em enlaces que contemplem estações em terra. Seguem algumas utilizações do *laser satcom* com uma breve descrição da influência da turbulência atmosférica:

- **Satélite-satélite:** Devido às grandes altitudes envolvidas e a diminuição exponencial da turbulência com o aumento da altitude, espera-se pouca ou nenhuma influência da turbulência atmosférica neste tipo de enlace.
- **Satélite-estação em terra:** Neste tipo de enlace o LASER sofre influência da turbulência atmosférica apenas na região próxima ao receptor. Na maior parte do caminho, o feixe óptico não percebe a ocorrência dos fenômenos advindos da turbulência atmosférica, por se propagar em espaço livre, sofrendo apenas o alargamento devido ao espalhamento geométrico. Sendo assim, a influência do *Beam Wander* não é relevante e apenas a cintilação se torna fator de degradação do sinal.
- **Estação em terra-satélite:** Diferentemente do caso anterior, o feixe óptico ao sair do transmissor primeiramente passa pela camada da atmosfera sujeita a turbulência e só depois atinge o espaço livre. Sendo assim, tanto o *Beam Wander* quanto a cintilação se tornam fatores de degradação do sinal.

CAPÍTULO 3

TEORIA DA TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA

Neste capítulo são apresentados os conhecimentos teóricos necessários à compreensão da técnica de medição de turbulência por triangulação de potências ópticas. Iniciando-se pela teoria clássica de turbulência de Kolmogorov [6], apresentando as simplificações necessárias ao tratamento estatístico das flutuações do índice de refração e a definição da constante de estrutura do índice de refração C_n^2 . Na sequência, são determinadas as características do feixe óptico gaussiano desde o plano no transmissor até o receptor e por fim define-se a divagação do feixe (*Beam Wander*) e sua relação com o C_n^2 .

3.1. Turbulência atmosférica

O fluido possui dois tipos de escoamento principais, o laminar e o turbulento. No escoamento laminar o fluido se move em camadas, ou lâminas, uma camada escorregando sobre a camada adjacente, sempre no sentido do escoamento geral. Já no escoamento turbulento as partículas do fluido apresentam movimento caótico, com deslocamentos transversais ao escoamento geral, provocando o surgimento de vórtices.

Considerando-se a atmosfera um fluido viscoso, a turbulência sofrida é um processo fundamentalmente não linear e governado pelas equações de Navier-Stokes. Por conta da dificuldade de soluções de tais equações, Kolmogorov, em 1941, sugeriu uma

subclasse de vórtices, que por possuírem a consistência estatística necessária, podem receber um tratamento teórico simplificado. Estes vórtices são gerados próximos às superfícies aquecidas, geralmente o solo, e apresentam pequenas dimensões, na ordem de milímetros. À medida que o observador se afasta do solo, são encontrados vórtices maiores, com dimensões na ordem de centímetros, a 100 m de altitude. A região onde são encontrados os menores vórtices foi denominada de escala interna (l_0) e a região que apresenta os maiores vórtices de escala externa (L_0). Entre l_0 e L_0 é encontrada a subescala inercial onde as variações das médias do índice de refração ocorrem de forma lenta, podendo-se, então, considerar uma única media para toda a subescala, o que facilita o tratamento estatístico das variações. A figura 3-1 ilustra a criação dos vórtices

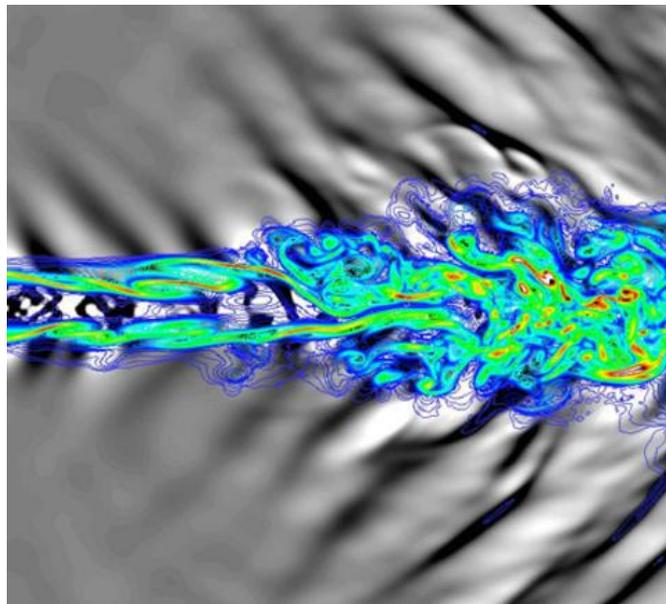


Figura 3-1: Vórtices do escoamento turbulento

Cabe ressaltar que os fenômenos de cintilação e *Beam Wander* estão relacionados ao tamanho das células de turbulência, ou seja, dos vórtices. Sendo assim, nas regiões mais próximas ao solo, onde os vórtices são pequenos, predomina a cintilação e a nas regiões mais distantes do solo, o predomínio é do *Beam Wander*. A teoria de cascata de energia (figura 3-2) ilustra a subescala inercial (L_0, l_0) [5].

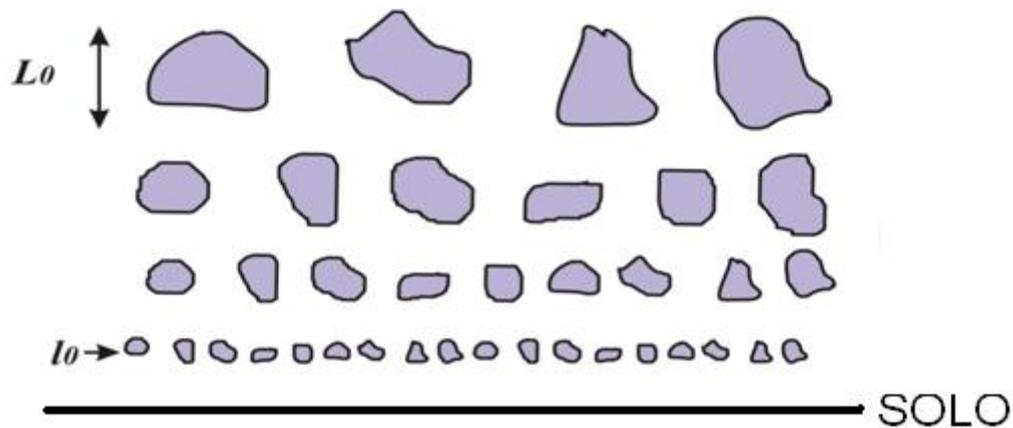


Figura 3-2: Teoria da cascata de energia

3.2. Constantes de estrutura

O tratamento estatístico das flutuações espaciais do índice de refração e da temperatura depende da existência de homogeneidade estatística e de uma média para todo o intervalo espacial estudado. Porém, as médias variam em breves intervalos espaciais dificultando o tratamento estatístico. Notadamente, se forem discriminados intervalos pequenos de distância entre os pontos de observação, encontra-se uma homogeneidade estatística localizada. Nestes intervalos a variação da média é tão lenta que pode-se determinar uma única média para todo o intervalo. Sendo assim, o processo passa a ser considerado aleatório e estacionário. Utilizando-se a teoria de Kolmogorov e a cascata de energia, podem-se determinar estes pequenos intervalos espaciais, denominados subescala inercial (L_0, l_0). Sendo assim, as correlações entre as variações de qualquer um dos pontos do campo (do índice de refração e da temperatura) observados independem de suas posições espaciais, dependendo apenas da separação entre seus vetores de posição. Tais campos, como os definidos pela subescala inercial, são caracterizados pela função de estrutura. A temperatura e índice de refração da atmosfera podem receber este tratamento especial, dando origem à constante de estrutura da temperatura e constante de estrutura do índice de refração.

3.2.1- Função estrutura

Os parâmetros atmosféricos, tais com a temperatura e o índice de refração, não podem ser tratados como processos estritamente estacionários, pois suas médias variam em pequenos intervalos espaciais, como dito anteriormente. Sendo assim, Kolmogorov, em 1974, propôs a função estrutura como parte de sua nova teoria estatística [20]. A aplicação desta teoria no estudo da turbulência permite dizer que um processo aleatório $x(t)$ pode ser expresso com sendo:

$$x(t) = m(t) + x_1(t) \quad (3-1)$$

onde $m(t)$ é a média e $x_1(t)$ é a variação no instante t do parâmetro estudado, satisfazendo $\langle x_1(t) \rangle = 0$. Assim, a função estrutura associada ao processo aleatório $x(t)$ pode ser definida como sendo [9] :

$$D_x(t_1, t_2) = \langle [x(t_1) - x(t_2)]^2 \rangle = [m(t_1) - m(t_2)]^2 + \langle [x_1(t_1) - x_1(t_2)]^2 \rangle \quad (3-2)$$

Tendo em vista que a média na subescala inercial varia lentamente, a diferença entre as medias na equação 3-2 se aproxima de zero e a função estrutura se torna:

$$D_x(t_1, t_2) \cong \langle [x_1(t_1) - x_1(t_2)]^2 \rangle \quad (3-3)$$

ou seja, as variações do processo se tornam mais importantes que o processo em si.

3.2.2- Constante de estrutura de índice de refração

O índice de refração n é considerado um fator de grande importância na comunicação FSO. A sua forte relação com a temperatura somada à mistura ocasionada pela turbulência altera sensivelmente a direção do feixe de luz degradando o sinal óptico. O índice de refração pode ser expresso matematicamente como sendo

$$n(R, t) = n_0 + n_1 (R, t) \quad (3-4)$$

onde R é uma determinada posição no espaço, t o tempo, $n_0 = \langle n(R, t) \rangle \cong 1$ é o valor da média do índice de refração e $n_1 (R, t)$ representa o desvio aleatório de $n(R, t)$ com relação a sua média e $\langle n_1 (R, t) \rangle = 0$. Pode-se assim expressar o índice de refração como sendo:

$$n(R) = 1 + n_1 (R) \quad (3-5)$$

onde $n(R)$ foi normalizado pelo seu valor n_0 . Tendo em vista que no tratamento de propagação da luz o tempo pode ser suprimido, a equação passa a depender apenas da posição R .

As flutuações na temperatura e pressão determinam a flutuação do índice de refração para a faixa de comprimento de onda do infravermelho (IR) [9]:

$$n(R) \cong 1 + 79 \times 10^{-6} \frac{P(R)}{T(R)} \quad (3-6)$$

onde P é a pressão em milibares e T a temperatura em kelvin.

O campo aleatório do índice de refração é, ainda, estatisticamente homogêneo e isotrópico, sendo assim, suas variações depende apenas da distância escalar entre dois vetores de posição $R = |R_1 - R_2|^2$. Kolmogorov, uma análise dimensional, mostrou que a função estrutura do índice de refração (n) dentro da subescala inercial satisfaz a lei universal de potência de 2/3:

$$D_n = \langle (n_1 - n_2)^2 \rangle = C_n^2 R^{\frac{2}{3}}, \quad l_0 \ll R \ll L_0 \quad (3-7)$$

Onde n_1 e n_2 representam os índice de refração em dois pontos separados pela distância R e C_n^2 é a constante de estrutura do índice de refração em $m^{-4/3}/s^2$. O comportamento encontrado para escalas onde $R \ll l_0$ varia com o quadrado da separação entre os pontos observados. A forma assintótica da constante de estrutura fica então:

$$D_n(R) = \begin{cases} C_n^2 R^{\frac{2}{3}}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_n^2 l_0^{-4/3} R^2, & 0 \ll R \ll l_0 \end{cases} \quad (3-8)$$

O C_n^2 é a constante de estrutura do índice de refração e indica o quão forte são as flutuações do índice de refração e conseqüentemente a turbulência do local. Os valores típicos do C_n^2 variam de $10^{-17}m^{-2/3}$, que corresponde à turbulência fraca a $10^{-13}m^{-2/3}$ ou mais, correspondendo a turbulência forte.

A exemplo do desenvolvimento utilizado para o índice de refração, a função de estrutura da temperatura é definida matematicamente como sendo:

$$D_T(R) = \begin{cases} C_T^2 R^{\frac{2}{3}}, & l_0 \ll R \ll L_0 \\ C_T^2 l_0^{-4/3} R^2, & 0 \ll R \ll l_0 \end{cases} \quad (3-9)$$

Onde T_1 e T_2 são as temperaturas dois pontos de uma determinada região e R a distância entre estes dois pontos e C_T^2 a constante de estrutura de temperatura.

O C_n^2 se relaciona como a constante de estrutura de temperatura C_T^2 como segue:

$$C_n^2 = \left(79 \times 10^{-6} \frac{P}{T^2}\right)^2 C_T^2 \quad (3-10)$$

A figura 3-3 apresenta um gráfico de medida de C_n^2 realizada por um cintilômetro, para um dia claro [9]. Tendo em vista que as variações na temperatura influenciam na constante de estrutura do índice de refração, verifica-se no gráfico o aumento do C_n^2 nos momentos de maior insolação, ou seja, no período compreendido entre 12h e 14h.

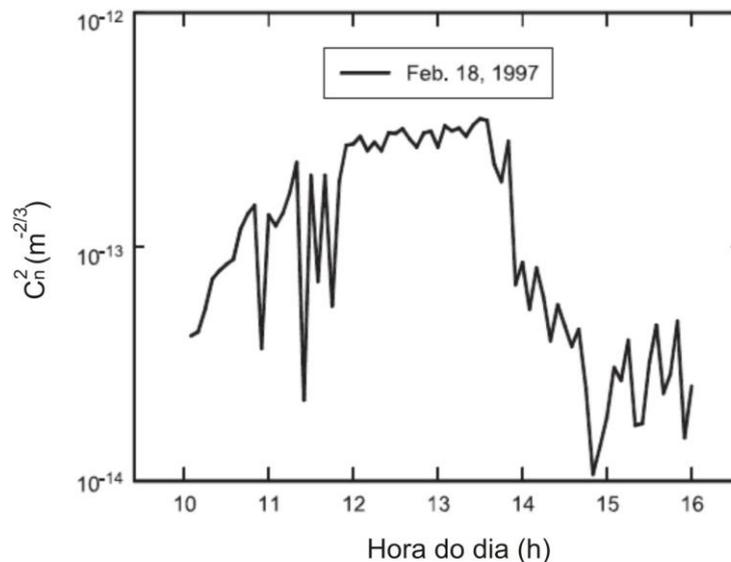


Figura 3-3: Gráfico C_n^2 x Tempo

3.3. A divagação do feixe (*Beam Wander*)

O feixe óptico ao atravessar uma região de turbulência atmosférica sofre três principais fenômenos, a cintilação, o alargamento do feixe e a divagação do feixe. Estes fenômenos devem-se à alteração aleatória do índice de refração sofrida pelo ar quando do aquecimento durante os períodos de maior insolação, principalmente. Este efeito é medido estatisticamente pela variância da distância entre o centro do feixe óptico e a origem do sistema de coordenadas cartesianas.

3.3.1. Modelo geral da divagação do feixe

O *Beam Wander* é a variação contínua e aleatória da posição do centro instantâneo do feixe óptico no plano do receptor. Este efeito, no receptor, se assemelha a variações angulares do transmissor. O efeito *Beam Wander* sobre o centro instantâneo do feixe óptico, implica num movimento em 2D composto de duas escalas espaciais com diâmetros típicos W_{xx} diferindo em pelo menos uma ordem de grandeza: termo curto (WST) e termo longo (WLT). O conjunto das posições instantâneas do centro do feixe projetado no plano do receptor denomina-se termo curto (WST) e é representado na figura 3-4 pelos círculos menores (azuis). O conjunto dos termos curtos delimita um círculo maior denominado termo longo (WLT).

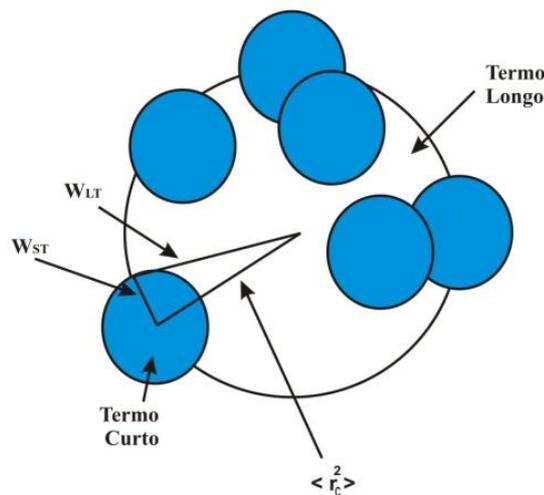


Figura 3-4: Divagação do feixe.

Tomando-se o termo longo como primeiro termo da equação e elevando ao quadrado tem-se [9]:

$$W_{LT}^2 = W^2(1 + T) = W^2(1 + 1,33\sigma_R^2 A^{5/6}) \quad (3-11)$$

Baseado no conceito de termo curto e longo, escreve-se a equação:

$$W_{LT}^2 = W^2 + W^2 T_{ss} + W^2 T_{LS} \quad (3-12)$$

onde W^2 é a parcela que representa a difração, $W^2 T_{ss}$ representa a parcela do *Beam Breathing* e $W^2 T_{LS}$ representa a parcela do *Beam Wander*. Matematicamente o *Beam Wander* é a variância do centro instantâneo do feixe no plano do receptor. Esta variância pode ser expressa por [9]:

$$\langle r_c^2 \rangle = W^2 T_{LS} = 4\pi^2 k^2 W^2 \int_0^L \int_0^\infty \kappa \phi_n(\kappa) H_{LS}(\kappa, z) (1 - e^{-\Lambda L \kappa^2 \xi^2 / k}) d\kappa dz \quad (3-13)$$

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

$$H_{LS}(\kappa, z) = \exp[-\kappa^2 W^2(z)] = \exp[-\kappa^2 W_0^2(\theta_0^2 + \Lambda_0^2)] \quad (3-14)$$

$$\phi_n(\kappa) = 0,033 c_n^2 \kappa^{-11/3} \left[1 - \exp\left(-\frac{\kappa^2}{\kappa_0^2}\right) \right] \quad (3-15)$$

onde κ_0 caracteriza a escala dos obstáculos (exterior ou interior) e $W(z)$ é o tamanho do feixe gaussiano no receptor distante L do transmissor e W_0 (figura 3-5) é o raio do feixe no plano do transmissor. Vale ressaltar que θ_0 é chamado de parâmetro de curvatura e que Λ_0 é conhecido como taxa de Fresnel. Para um valor fixo de $z = L$ e raio de curvatura F_0 , o parâmetro de curvatura identifica-se e o feixe é colimado, convergente ou divergente, sendo $\theta_0 = 1$, $\theta_0 < 1$ e $\theta_0 > 1$ respectivamente.

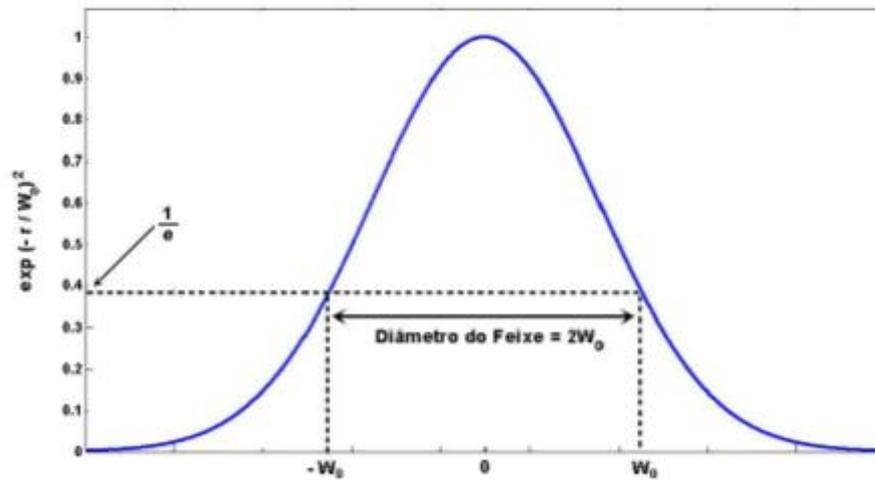


Figura 3-5: Representação do W_0 .

Resolvendo-se a integral da equação 3-13, chega-se a generalização da variância do centro do ponto de maior intensidade do feixe óptico [9]:

$$\langle r_c^2 \rangle = 7,25 C_n^2 L^3 W_0^{1/3} \int_0^1 \xi^2 \left\{ \frac{1}{|\theta_0 - \theta_0|^{1/3}} - \left[\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2 (\theta_0 - \theta_0 \xi)^2} \right]^{1/6} \right\} d\xi \quad (3-16)$$

3.3.2. Casos especiais para a formulação da divagação do feixe

Existem casos especiais onde a equação da variância pode ser reduzida levando-se em conta cada um dos fatores de seus casos especiais como segue:

Feixe colimado ($\kappa_0 = 0, \theta_0 = 1$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3} \quad (3-17)$$

Feixe Focado ($\kappa_0 = 0, \theta_0 = 0$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3} \quad (3-18)$$

Feixe colimado ($\kappa_0 \neq 0, \theta_0 = 1, \theta_0 = 0$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,42 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3} \left[1 - \left(\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{1/6} \right] \quad (3-19)$$

Feixe Focado ($\kappa_0 \neq 0, \theta_0 = 1, \theta_0 = 1$)

$$\langle r_c^2 \rangle = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{-1/3} \left[1 - \frac{8}{9} \left(\frac{\kappa_0^2 W_0^2}{1 + 0,5 \kappa_0^2 W_0^2} \right)^{1/6} \right] \quad (3-20)$$

Neste trabalho a principal equação utilizada foi a (3-40). Calculando-se, então, as posições instantâneas do feixe em relação à origem (r_c) de um determinado plano cartesiano, pode-se calcular o C_n^2 através do tratamento estatístico da variação destas posições.

CAPÍTULO 4

TÉCNICA DE TRIANGULAÇÃO DE POTÊNCIAS ÓPTICAS

Nos capítulos anteriores foram apresentadas as informações necessárias à compreensão da técnica de triangulação de potências ópticas. Foram abordados assuntos relativos aos fatores ambientais que influenciam na propagação do sinal óptico com ênfase na turbulência atmosférica, a teoria envolvendo a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 e sua relação com o *Beam Wander*.

Neste capítulo será apresentada a técnica de triangulação de potências ópticas, propriamente dita, sua análise qualitativa e quantitativa, o cálculo da posição instantânea do centro do feixe óptico e a relação entre a alteração desta posição e a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 . No final do capítulo é apresentada a resolução do dispositivo utilizado nos experimentos deste trabalho.

4.1. Análise qualitativa

Verificou-se no estudo dos capítulos anteriores que a luz ao se propagar pela atmosfera pode sofrer a influência de vários fenômenos, entre eles a turbulência atmosférica. Os efeitos da turbulência são: a cintilação, o alargamento do feixe e a divagação do feixe (*Beam Wander*). Neste trabalho, o *Beam Wander* estará em foco e os demais efeitos serão negligenciados por não apresentarem elementos que auxiliem na técnica aqui agora aplicada.

Considerando-se que a projeção do feixe óptico gaussiano apresenta formato circular ao incidir no plano do receptor. Esta projeção tem sua posição modificada à medida que o feixe de luz é influenciado pela turbulência atmosférica. Esta movimentação da projeção do feixe é o efeito do *Beam Wander* percebido pelo receptor do sinal óptico. A figura 4-1 ilustra a ocorrência acima.

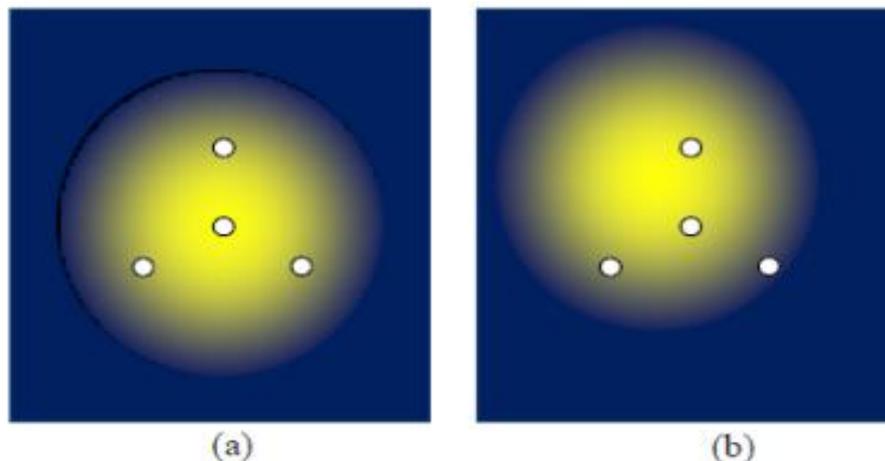


Figura 4-1: Posição da Gaussiana no momento t_0 (a); Posição da Gaussiana no momento t_1 .

Tomando-se por base o efeito do *Beam Wander* sobre a projeção circular do feixe óptico no plano do receptor, concluiu-se que com a quantidade adequada de fotodetectores pode-se calcular a posição instantânea do centro deste feixe. Neste experimento, foram utilizados quatro fotodetectores. Três destes fotodetectores são posicionados de forma a constituírem os vértices de um triângulo equilátero e o quarto fotodetector no centro do triângulo. Estes fotodetectores são fixados a um anteparo onde o feixe LASER incide e são assim impressionados pela potência óptica. Para o tratamento das informações dos fotodetectores é utilizado um circuito de recepção. A figura 4-2 exemplifica o arranjo.

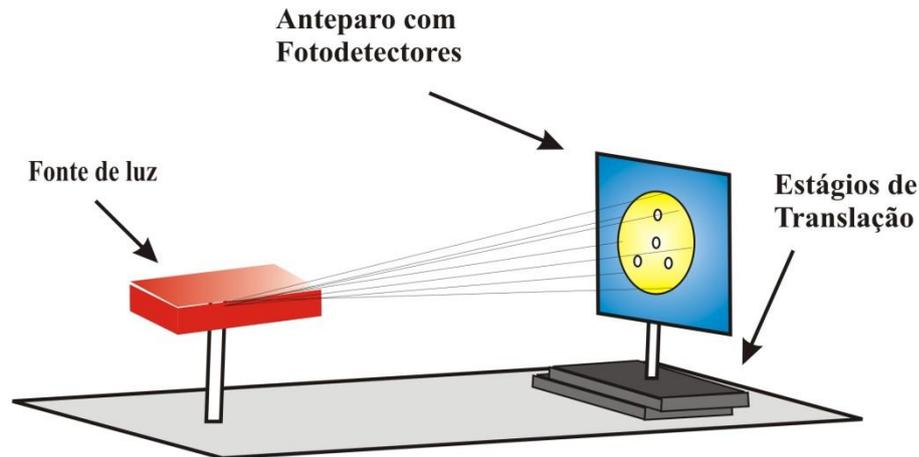


Figura 4-2: Arranjo contendo 4 fotodetectores em um anteparo

Sabendo-se, então, as características da distribuição gaussiana de potência óptica no plano do receptor, a posição dos fotodetectores e a intensidade de potência incidente em cada um deles, pode-se calcular a posição do centro do feixe óptico e sua variância com o tempo causada pelo *Beam Wander*. Com estes dados chega-se à constante de estrutura do índice de refração que é uma medida da turbulência atmosférica.

4.2. Análise quantitativa

Tendo em vista o exposto na seção anterior, pode-se, neste momento, descrever matematicamente a técnica de medida de turbulência por triangulação de potências. Partindo-se da condição inicial onde o feixe de luz encontra-se parado pode-se determinar a distância radial r_1 entre um ponto aleatório D_1 e o centro da projeção gaussiana pela expressão:

$$P(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} \quad (4-1)$$

onde W é a largura do feixe óptico, P_0 a potência central da distribuição gaussiana e $P(x, y)$ a potência no fotodetector em questão. Utilizando-se então três fotodetectores D_i , onde $i=1,2,3$ em posições conhecidas (x_i, y_i) em relação à origem do plano cartesiano, como mostrado na figura 4-3, pode-se determinar a potência P_i incidente em cada um deles.

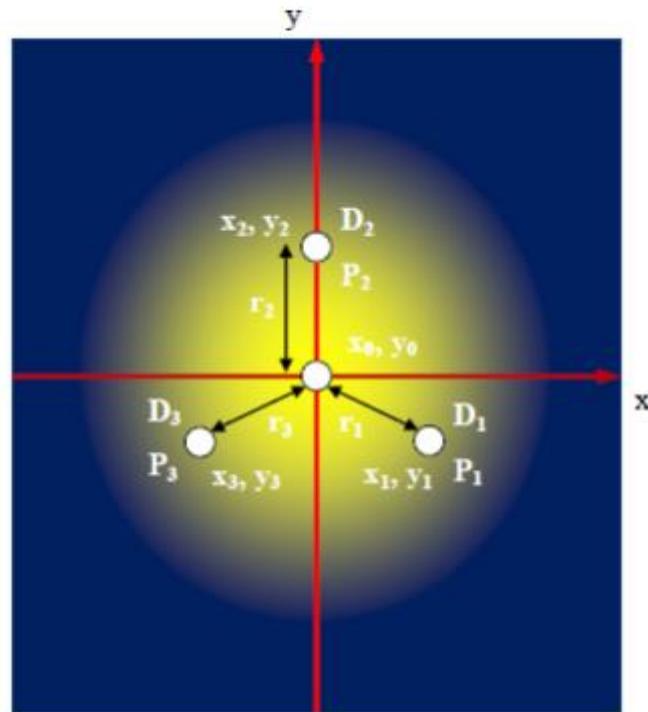


Figura 4-3: Posição dos fotodetectores no anteparo.

De posse desta última informação são calculadas as distâncias radiais r_i de cada fotodetector ao centro do feixe como segue:

$$P_i(x, y) = P_0 e^{-\left(\frac{r_i}{w}\right)^2} \quad (4-2)$$

$$e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} = \frac{P_i}{P_0} \quad (4-3)$$

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

$$e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2} = \bar{P}_i \quad (4-4)$$

$$\ln\left(e^{-\left(\frac{r}{w}\right)^2}\right) = \ln \bar{P}_i \quad (4-5)$$

$$\left(\frac{r_i}{w}\right)^2 = -\ln \bar{P}_i \quad (4-6)$$

Chega-se então a equação que define as distâncias radiais como sendo:

$$r_i^2 = W^2(-\ln \bar{P}_i) \quad (4-7)$$

Levando-se em consideração que a distancia radial r_i se relaciona com as coordenadas retangulares como se segue:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \quad (4-8)$$

E substituindo em 4-7 monta-se um sistema de equações que definirá a posição do centro do feixe óptico pelo par ordenado (x_0, y_0) :

$$\begin{cases} (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_1) = 0 \\ (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_2) = 0 \\ (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 - W^2(-\ln \bar{P}_3) = 0 \end{cases} \quad (4-9)$$

Sabendo-se então a posição do centro do feixe (x_0, y_0) pode-se calcular a sua distância r_c do centro cartesiano:

$$r_c = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \quad (4-10)$$

Como visto no capítulo 4 quando foi estudada a turbulência atmosférica, a constante de estrutura do índice de refração C_n^2 se relaciona com a variância da distância do centro do centro do feixe ao centro de referência $[r_c^2]$ pela equação

$$[r_c^2] = 2,72 C_n^2 L^3 W_0^{1/3} \quad (4-11)$$

considerando-se o feixe colimado.

Como citado anteriormente, a variação da posição do centro no plano do receptor é devida ao *Beam Wander* e agora de posse da variância deste centro pode-se então mensurar a turbulência atmosférica através do cálculo do C_n^2 diretamente da equação 4-11.

4.3. Dispositivo original

Para a prova da técnica proposta, foi desenvolvido, originalmente, em 2009 na UFF [13] um dispositivo baseado na análise qualitativa apresentada. Este dispositivo contava com os seguintes componentes:

Diodo *laser* de bombeio (LD) com fibra pigtail HiBi – 980nm Pirelli ;

- Fibra óptica padrão (STD) com comprimento de onda de corte de 1300nm;
- Fonte de corrente (FC) Newport 5030;
- Controlador de temperatura (CT) ILX Light Wave LDT-5525;
- Filtro modal (MF);
- Anteparo com quatro fotodetectores (Di);
- Anteparo com papel vegetal;
- Câmera fotográfica Canon G3;
- Conversor analógico-digital (ADC) da National Instruments 6210;
- Computador pessoal (PC);

O funcionamento do dispositivo original ocorria da seguinte forma [13]:

A distribuição da potência da luz na saída do LD não corresponde a uma gaussiana circular. Então, foi necessário conectar a saída do laser a uma fibra óptica padrão para, ao projetar a luz no anteparo, esta possuir uma distribuição gaussiana circular no plano do receptor após propagação pelo ar. O LD é excitado por uma fonte de corrente da Newport e resfriado por um controlador de temperatura da LightWave, como citado anteriormente. O filtro modal é conectado na saída da fibra padrão para eliminar os modos de alta ordem e os modos que se propagam pela casca, para garantir o feixe gaussiano circular sobre o anteparo. A luz se propaga da saída do MF e chega até ao anteparo com os quatro fotodetectores, após percorrer 21 cm. Nos fotodetectores, a potência óptica é convertida em um sinal elétrico de valor proporcional à intensidade luminosa. Esse sinal é, então, enviado para um conversor analógico-digital, para transmitir os dados para um computador. Com a informação das potências ópticas em cada fotodetector, o computador pode resolver o sistema de equações e calcular a posição do feixe em um determinado instante.

A figura 4-4 ilustra o dispositivo inicial. [13]:

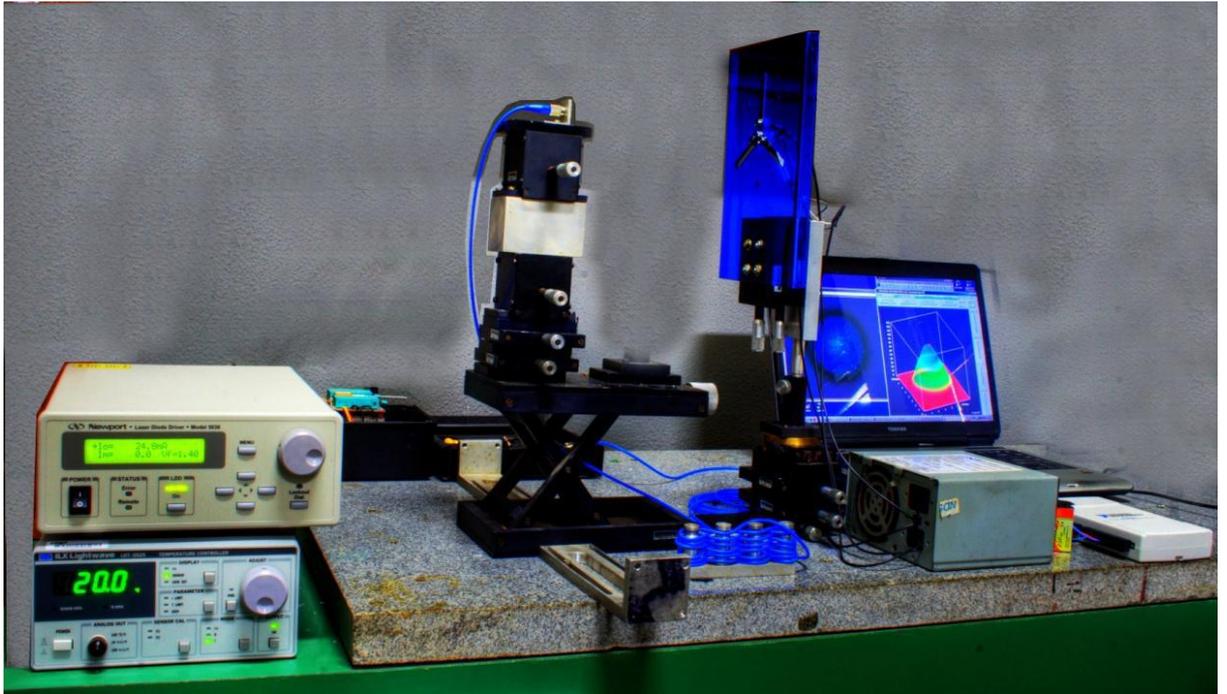


Figura 4-4: Dispositivo original

4.3.1. Resolução do dispositivo original

O desenvolvimento de uma nova técnica demanda também o cálculo da resolução do dispositivo original desenvolvido para a prova da técnica. A distância entre os fotodetectores, o tamanho da gaussiana W e a relação sinal ruído SNR são fatores muito importantes para a performance da técnica. Analisando a posição dos fotodetectores percebem-se duas possibilidades extremas.

Possibilidade 1.- Distância entre os fotodetectores $\gg W$.

Nesta condição os valores de intensidade de potência óptica percebidos pelos fotodetectores se tornam muito baixos. Os fotodetectores se encontram, então, fora ou quase fora da projeção circular da gaussiana. Quando isto ocorre, os valores de potência se tornam menores que os valores do próprio ruído ($P_{ruído}$). Sendo assim, o sistema de equações 4-9 (sistema de equações) converge para $(x_c, y_c) = (0,0)$, mesmo havendo movimento do feixe.

Verifica-se que a relação entre o sinal recebido (P_i) e a potência do ruído ($P_{ruído}$) é imperativa para a determinação da posição do centro do feixe óptico. A relação sinal ruído, SNR é dada pela equação

$$SNR = 10 \log \left(\frac{P_i}{P_{ruído}} \right) \quad (dB) \quad (4-12)$$

A determinação da posição do centro do feixe no caso da possibilidade 1 ocorre apenas se pelo menos um fotodetector apresentar $SNR > 0$ dB, porém o erro neste cálculo se torna muito alto. Para otimizar a medida, obtendo-se erro menor que 1%, é interessante que pelo menos um fotodetector apresente $SNR > 20$ dB. Porém, como o modelo utiliza um esquema de cálculo iterativo onde três equações precisam ser satisfeitas o SNR pode ser menor ($SNR = 18,5$ dB).

Possibilidade 2 – Distância entre fotodetectores $\ll W$.

Nesta condição os fotodetectores encontram-se tão próximos uns aos outros em comparação com a projeção do feixe que se comportam como um ponto, aparentando ser um fotodetector. Sendo assim as variações de potência ΔP nos fotodetectores se tornam menores que $P_{ruído}$, resultando em convergência do sistema de equações 4-9 para $(x_c, y_c) = (0,0)$.

Sendo assim, cálculo da distância ótima entre os fotodetectores com relação ao W se torna imperativa. O $r_{crítico}$ representa o valor da distância entre os fotodetectores de maior sensibilidade aos movimentos do feixe óptico e poder calculado como sendo

$$r_{crítico} = \frac{\sqrt{2}}{2} W \quad (4-13)$$

Após a análise das duas possibilidades de posicionamento dos fotodetectores com relação ao tamanho da gaussiana W , pode-se, então, proceder ao cálculo da resolução do dispositivo utilizado nos experimentos.

Derivando-se a equação 4-1 chega-se à expressão da resolução Δr do dispositivo

$$\Delta r = \frac{W^2 \exp\left[\left(\frac{r}{W}\right)^2\right]}{2rP_0} \Delta P \quad (4-14)$$

Porém, quando o feixe se move a potência de um dos fotodetectores aumenta enquanto de outro diminui do mesmo valor. Sendo assim, ao invés de ter a diferença de potência mínima igual à potência do ruído, pode-se admitir que seja a metade, então $\Delta P = \frac{P_{ruído}}{2}$.

Substituindo o $r_{crítico}$ e o ΔP na equação 4-14 pode-se agora de terminar a resolução limite R_L , ou seja, a melhor resolução que o sistema pode empreender.

$$R_L(W) = \frac{W \exp\left[\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2\right] P_{ruído}}{\sqrt{2}P_0} \quad (4-15)$$

CAPÍTULO 5

EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Nos capítulos anteriores foram apresentados os conhecimentos que embasaram o desenvolvimento da técnica de triangulação de potências ópticas e do dispositivo para a medida de turbulência atmosférica.

Neste capítulo é apresentado o arranjo experimental utilizado para medida de turbulência atmosférica real. Este arranjo é resultado do desenvolvimento do dispositivo utilizado na prova da técnica de triangulação [10]. Para tanto, foram utilizados quatro arranjos experimentais visando a medida real de turbulência atmosférica que contaram com um sistema de transmissão e outro de recepção, tendo como principais diferenças entre eles a distância dos aparatos e os ambientes de propagação da luz. O objetivo final dos experimentos aqui apresentados se encontra no Arranjo IV , ou seja, a realização de medida de turbulência atmosférica real.

O Arranjo I foi feito em bancada com o transmissor e receptor separados de 89 centímetros, dentro do laboratório. O Arranjo II foi montado dentro do laboratório, porém fora de bancada a uma distância de 3 metros. O Arranjo III foi montado no corredor da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF) e contou com 42 metros de distância entre receptor e transmissor. Por fim o Arranjo IV foi montado entre os Blocos D e E da Escola de Engenharia contando com 30 metros de distância e realizando uma medida real de turbulência. Os tópicos que seguem apresentam o histórico do desenvolvimento dos arranjos, e os experimentos de forma detalhada, assim como a análise de cada um deles em sequência.

5.1. Histórico

Os arranjos desenvolvidos neste trabalho são a evolução de dois outros realizados, originalmente, também na UFF, nos anos de 2009 e 2011. O primeiro experimento, o dispositivo original, [13] simulou o movimento do feixe sob efeito da turbulência atmosférica através de estágios de translação que realizavam o movimento horizontal e vertical do anteparo com os fotodetectores. Assim, pode-se comprovar que o dispositivo proposto naquele trabalho é capaz de acompanhar o movimento relativo do feixe óptico. Porém, em sua análise, ele descreve o movimento do anteparo por estágios de translação como fonte de erro em suas medidas, devido à deflexão dos parafusos micrométricos utilizados no arranjo. Foi desenvolvido, então, no segundo experimento [21] um sistema alternativo de simulação de turbulência através da movimentação do feixe LASER com o auxílio de um motor de passo. Movimentava-se a fonte *laser* ao invés do anteparo com os fotodetectores, automatizando assim o sistema e diminuindo o erro da movimentação dos estágios de translação. O movimento realizado pelo motor de passo tinha frequência aproximada de 3 Hz, significativamente inferior ao valor de *Beam Wander* encontrado na literatura de 200 Hz [16]. Com relação ainda aos dois experimentos anteriores, foram utilizados, neste novo arranjo, fotodetectores com características que possibilitam maior sensibilidade aos movimentos e menor ruído proveniente da luz do laboratório. Estes componentes possuem densidade espectral de sensibilidade centrada em 880 nm, evitando, assim, a luz no espectro do visível e o conseqüente ruído. Além disso, o ângulo da abertura numérica é de apenas 10° , [Anexo 8.2] aumentando a resposta a pequenos movimentos.

5.2. Arranjo Experimental I

O Arranjo Experimental I teve o objetivo de aumentar a frequência do movimento oscilatório do feixe de até 1,5 kHz, mantendo-se o rastreamento do feixe, visando a verificação da resposta do sistema a frequências mais próximas as encontradas na natureza (200 Hz) [16]. Para tanto, o dispositivo original foi alterado, recebendo um espelho utilizado para refletir o feixe óptico e que se movimentava de forma controlada. Este espelho foi fixado à bobina de um alto-falante, que quando excitado por um gerador de funções fazia o espelho vibrar na mesma frequência da função gerada. A figura 5-1 apresenta um desenho esquemático do arranjo e traz em destaque no canto esquerdo superior o alto-falante contendo o espelho e no canto superior direito o anteparo com os fotodetectores.

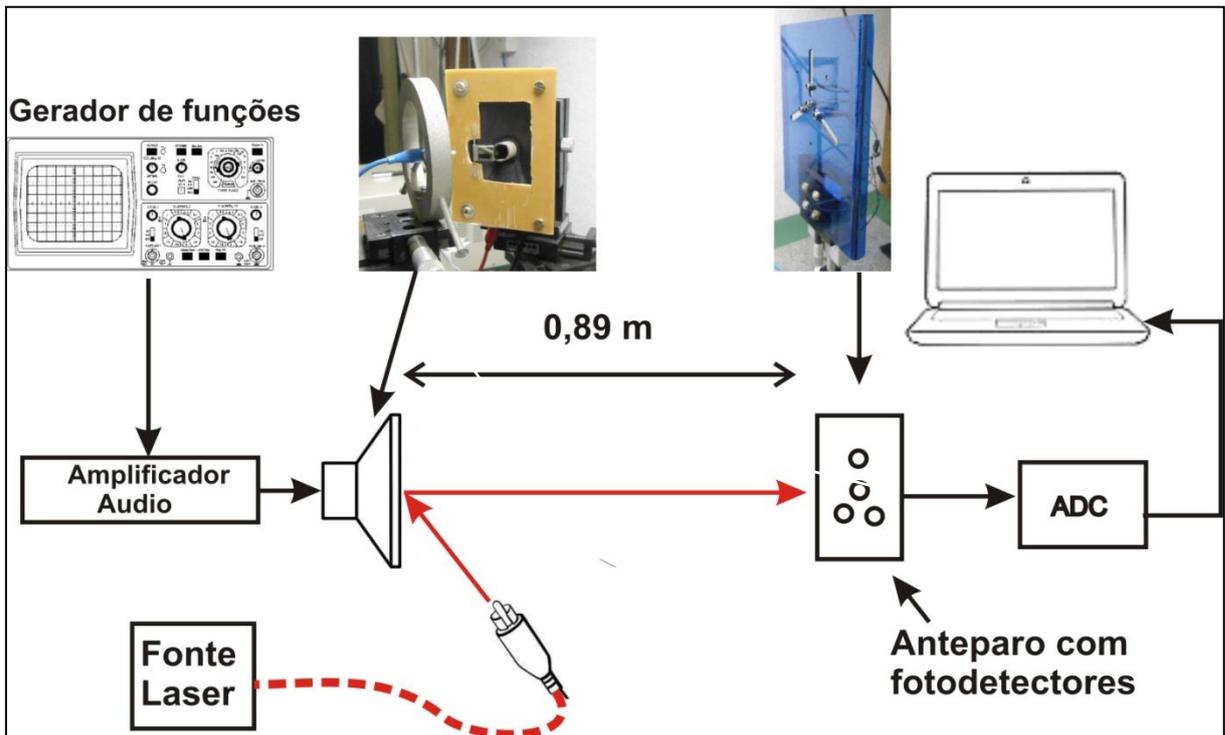


Figura 5-1: Arranjo Experimental I.

O sinal óptico gerado por um diodo *laser* (LD- Diodo LASER de bombeio 980nm EM4) é confinado na fibra (Fibra óptica SM em 1300nm) através de um dos seus conectores e ao sair na outra extremidade tem seu formato Gaussiano circular como desejado. A técnica de triangulação de potencias tem como premissa que a projeção do feixe óptico tenha distribuição Gaussiana. Este feixe é projetado em um espelho (Espelho 10 mm x 10 mm) que encontra-se fixado à bobina do alto falante (Alto-falante 4 ohms 1,5 W). Realiza-se então o alinhamento inicial do feixe refletido no espelho com uma câmera (Câmera Imperx IPX-VGA-210) posicionada a 0,89m de distância, na posição do receptor.

Em sequência um anteparo com papel vegetal é posicionado entre o espelho e a câmera. Com o laboratório as escuras tira-se uma fotografia do anteparo com a projeção da luz do LD como mostrado na figura 5-2:

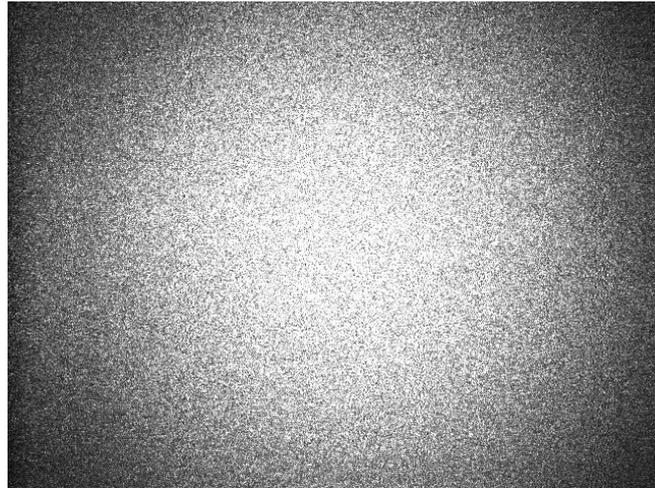


Figura 5-2: Projeção do feixe LASER no anteparo de papel vegetal.

Esta imagem após ser tratada através de um programa desenvolvido na plataforma MATLAB resulta nos dados que caracterizam a Gaussiana da projeção do sinal, em especial a informação da largura W da gaussiana que será utilizada no sistema de equações 4-9 para o cálculo da posição do centro do feixe. A figura 5-3 apresenta em azul os valores da intensidade de luz, no eixo x , da imagem e em vermelho a gaussiana calculada pelo programa no MATLAB. O W encontrado foi de 24,88 mm quando convertido o valor de pixels pra milímetros.

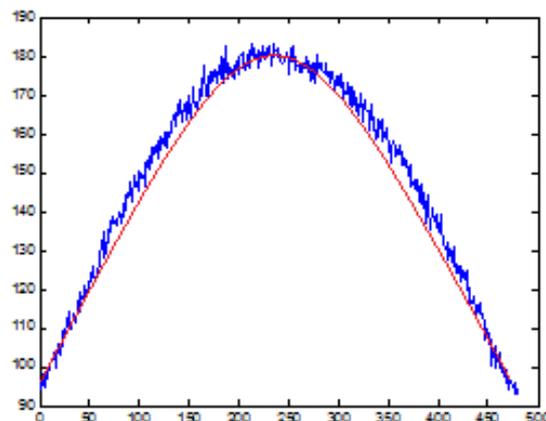
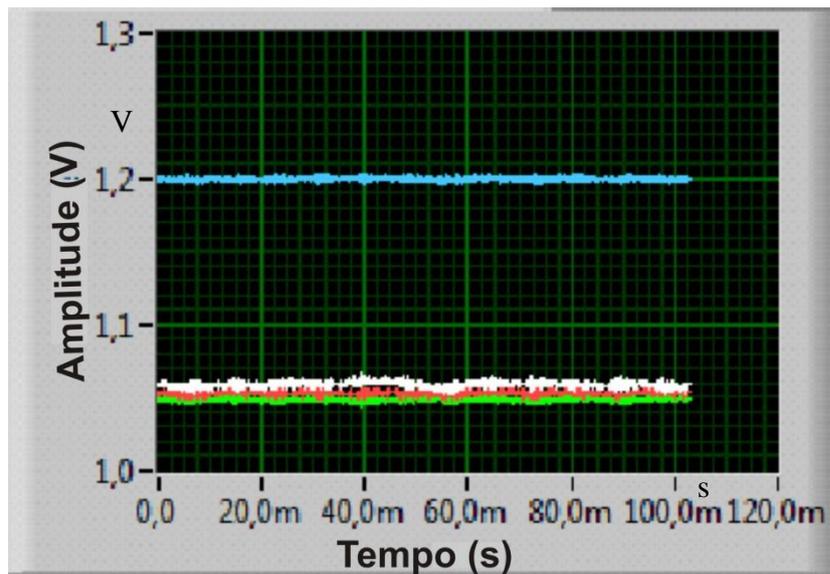


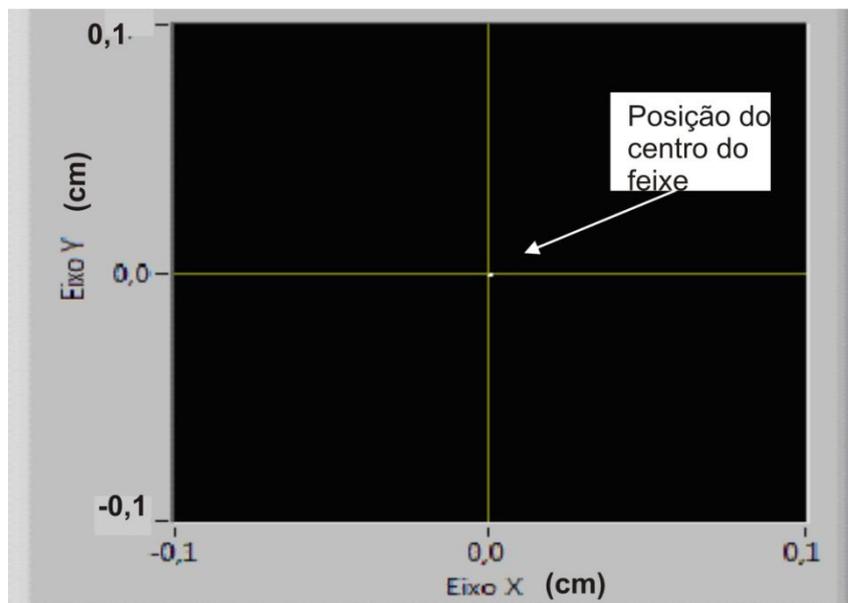
Figura 5-3: Gaussiana calculada (pixels).

Em um segundo momento, o anteparo com o papel vegetal é substituído pelo que contém os fotodetectores. Com o espelho ainda parado são realizadas as calibrações necessárias para garantir uma medida confiável. Os quatro fotodetectores são colocados um a um na posição (0,0) do anteparo e o circuito de recepção é ajustado para que as potências ópticas em cada um dos fotodetectores sejam iguais. Em seguida procede-se o alinhamento dos fotodetectores com o sinal óptico. Os três fotodetectores externos devem ter a mesma

potência óptica para que o centro do feixe seja coincidente com o fotodetector central. Para tanto foi utilizado o programa LABVIEW que apresenta, em tempo real, a tensão proporcional a potencia óptica dos quatro fotodetectores auxiliando no alinhamento do sistema. A figura 5-4 (a) Apresenta a tensão (V) dos quatro fotodetectores. A cor azul representa o fotodetector central e as cores branca, verde e vermelha os demais fotodetectores. A figura 5-4 (b) apresenta a posição do feixe (0,0) em relação ao plano cartesiano.



(a)



(b)

Figura 5-4: Feixe óptico parado.

Após a realização das devidas calibrações e alinhamentos, foram repetidos os testes com os estágios de translação, a exemplo do que foi feito em 2009 [13]. Os resultados foram similares aos encontrados com o dispositivo original. Em seguida, foram conduzidos testes com movimentos no espelho na direção horizontal, resultando deslocamentos no eixo x. Para tanto, um gerador de funções (Gerador de funções Tektronix AFG 3101) excita o alto falante por intermédio do amplificador de áudio (Amplificador de áudio PIGNOSE 9V), a bobina do alto-falante vibra na mesma frequência do sinal gerado e consecutivamente o espelho obedece ao mesmo movimento. A luz então, que no primeiro momento encontrava-se parada, passa a movimentar-se no sentido horizontal com a mesma frequência do sinal gerado, alterando-se então a posição da projeção do feixe.

Foram realizados movimentos em frequências 200 Hz, 1,0 kHz e 1,5 kHz. Os resultados são mostrados em conjuntos de três imagens, onde a superior esquerda representa a queda de tensão dos fotodetectores, a superior direita a posição histórica dos pontos que representam os centros instantâneos do feixe óptico e a imagem de baixo representa a FFT em Hz do movimento do centro do feixe. As medidas foram tomadas continuamente e a representação que segue equivale a períodos de 100 ms.

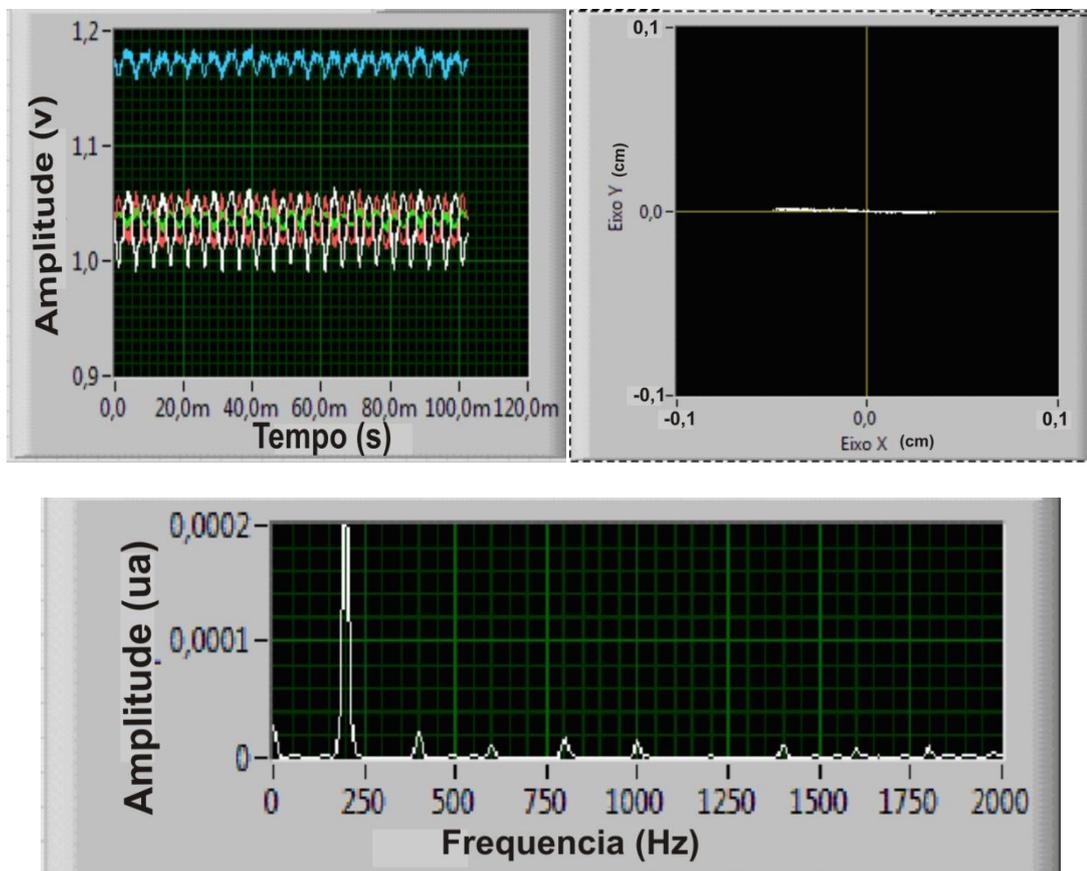


Figura 5-5: Resposta a 200Hz.

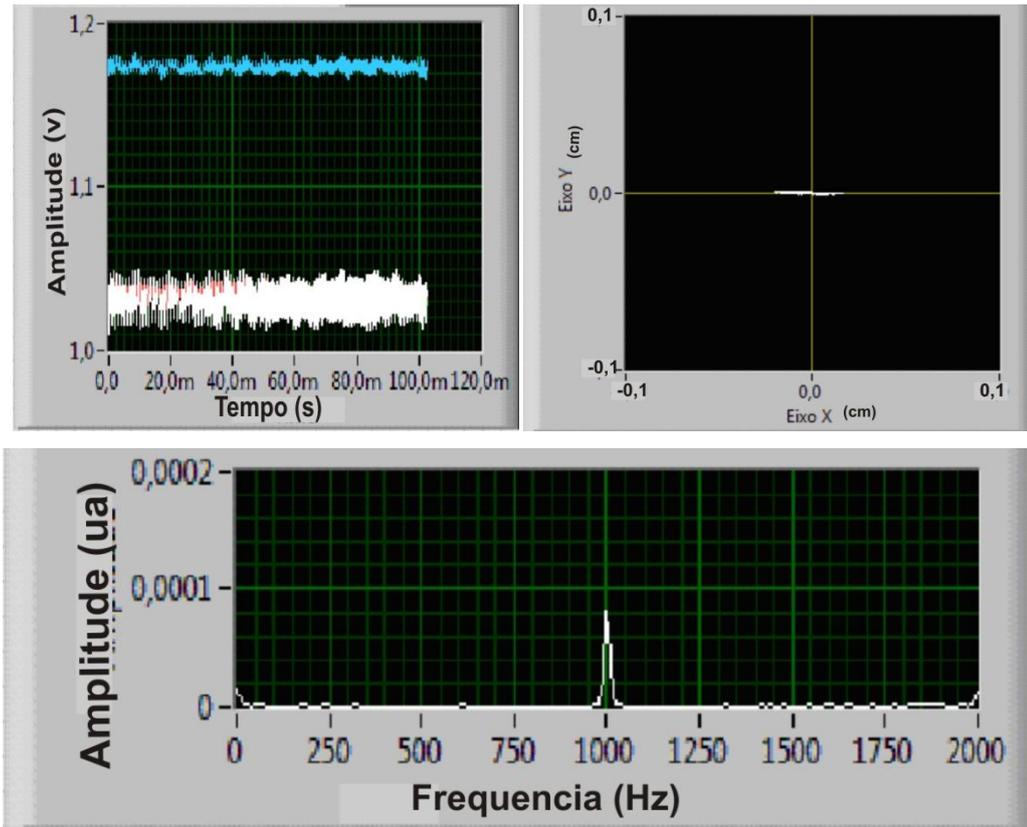


Figura 5-6– Resposta a 1,0 kHz.

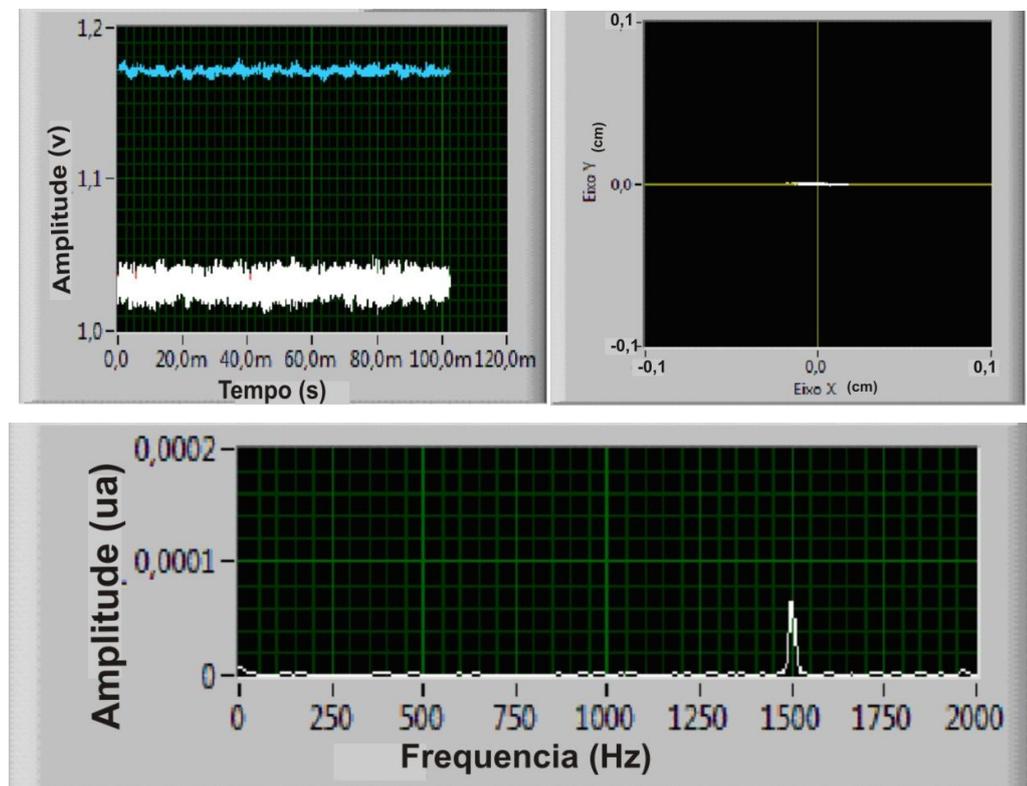


Figura 5.7 –Resposta a 1,5 kHz

5.3. Análise de Resultados do Arranjo I

O principal objetivo deste arranjo foi a verificação da resposta do experimento a frequências de oscilação do feixe provocadas pela turbulência atmosférica próximas às encontradas em enlaces reais. Sendo assim, o teste em 200 Hz se mostraria suficiente para a prova da técnica, porém os testes em 1,0 kHz e 1,5 kHz corroboram com os resultados encontrados no primeiro teste.

Na figura 5-5, no canto esquerdo observa-se a variação das tensões nos quatro fotodetectores. As linhas azul e verdes representam os fotodetectores central (D4) e superior (D2), respectivamente. Estes sofreram menor influência do movimento horizontal do feixe provocado pela vibração do espelho. Nota-se também que as linhas vermelha e branca que representam os fotodetectores inferior esquerdo (D1) e inferior direito (D3), respectivamente, sofrem maior alteração de amplitude, pois são as que representam os fotodetectores alinhados ao movimento horizontal do feixe. Percebe-se ainda, que o movimento destas linhas são senóides com o mesmo período da gerada pelo Gerador de Funções, apresentando defasagem de 180° entre elas, como era o esperado, pois quando o fotodetector da esquerda recebe maior potência, aquele posicionado diametralmente recebe a menor potência. Ainda observando as tensões nos fotodetectores verifica-se que a linha vermelha que representa o fotodetector D1 apresenta amplitude ligeiramente menor que a linha branca que representa o fotodetector D3, isso se reflete na largura da linha branca no canto superior direito da figura. Esta linha representa a posição dos centros instantâneos do feixe. Nota-se que o lado esquerdo é ligeiramente maior que o direito, denotando que o espelho, apesar do esforço para que realizasse um movimento uniforme, privilegiou o lado esquerdo e o centro do feixe se moveu mais para a esquerda do que para a direita.

Observando a figura 5-5 no canto superior direito, verifica-se que o feixe desenvolveu movimento linear como era esperado e que seu desvio vertical foi mínimo, levando-se em consideração que a escala observada de 10 mm.

Na figura 5-5, a imagem inferior mostra a FFT do sinal detectado no eixo x, que foi o eixo do movimento e corresponde aos 200 Hz ajustados no Gerador de Funções. Nas figuras 5-6 e 5-7 foram realizados testes nas frequências 1,0 kHz e 1,5 kHz, respectivamente, as respostas foram similares às encontradas no teste anterior, mas pode-se notar que a medida que a frequência aumenta a densidade espectral do sinal diminui e também diminui a largura da linha branca que representa os centros do feixe. Isso deve-se ao fato de que para uma mesma tensão no amplificador de áudio, a bobina do alto-falante faz movimentos menores a

medida que aumenta a frequência. Sendo assim, o espelho vibra em uma amplitude menor e consequentemente o feixe se movimenta menos.

5.4. Arranjo Experimental II

O Arranjo Experimental II foi montado dentro do laboratório de comunicações ópticas da UFF, fora de bancada, tendo a separação entre o receptor e o transmissor aumentada de 0,89 m para 3 m. Os objetivos desse arranjo foram: verificar as dificuldades crescentes de alinhamento com o aumento da distância, mensurar ruído da recepção devido ao conjunto colimador-expansor (Colimador F280 FC-B da Thorlabs e Expansor de feixe *–Beam Expander 2X5* da Thorlabs) [Anexo 8.3, Anexo 8.4], analisar a forma da gaussiana com o novo equipamento de transmissão, calibrar o apontador LASER (Apontador LASER na cor vermelha -100m de alcance) para alinhamento grosso do sistema e verificar ruído na ausência de turbulência. Todas as verificações realizadas neste experimento visam a preparação para a medida a ser realizada no corredor e no meio externo.

O sistema de recepção utilizado foi o mesmo do Arranjo Experimental I com pequenas alterações apenas para facilitar sua fixação fora de bancada. A alteração mais significativa deste arranjo encontra-se no transmissor. O espelho e o alto-falante foram substituídos por um conjunto colimador-expansor de feixe com o propósito de adequar a projeção da gaussiana que chega ao plano do receptor à distância desejada dos fotodetectores. A luz é injetada no colimador com diâmetro aproximado de 10 nm e a transmite com 3,4 mm. O feixe colimado ao passar pelo *Beam Expander* [Anexo 8.4] tem seu diâmetro multiplicado por um fator que varia de 2 a 5. Assim, o feixe que entre com 3,4 mm sairá com diâmetro variando entre 6,8 e 17 mm. O ângulo de divergência do colimador é $0,028^\circ$ [Anexo 8.3]. A figura 5-8 apresenta o desenho do arranjo com fotografia do conjunto colimador-expansor em destaque.

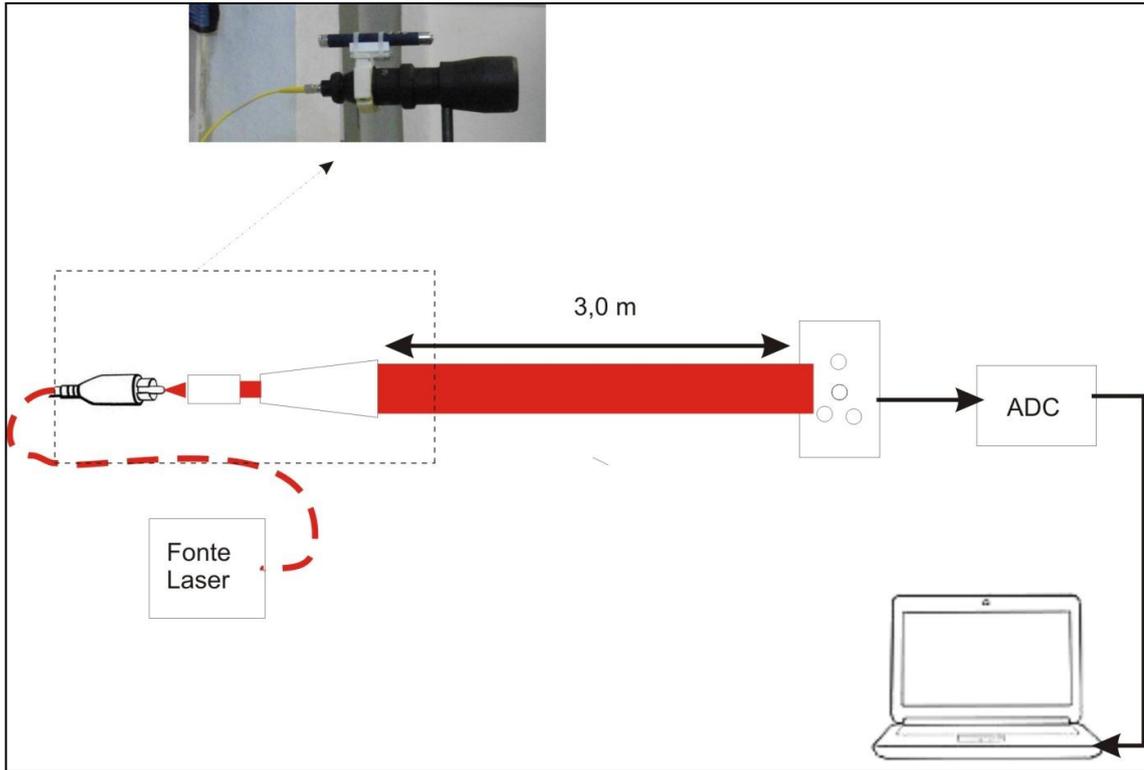


Figura 5-8: Conjunto colimador-expansor.

Na base do transmissor foram utilizados estágios de translação para garantir o posicionamento correto do *Beam Expander*. Utilizando-se a câmera e o anteparo com papel vegetal foi realizado o alinhamento do sinal óptico e do apontador LASER. A distância vertical entre o apontador LASER e o centro da lente do *Beam Expander* é de 52 mm e foi utilizada no alinhamento dos componentes e do apontador LASER. A figura 5-9(a) apresenta o feixe de luz e a figura 5-9 (b) apresenta também o sinal do apontador LASER.



(a)

(b)

Figura 5-9: Projeção do sinal LASER (a); Projeção do sinal LASER e do sinal do Apontador LASER.

Após a realização do alinhamento, foi tirada fotografia da projeção do feixe no anteparo de papel vegetal e verificada a sua forma gaussiana. O cálculo da largura W teve como resultado 10,68 mm. A figura 5-10 apresenta a imagem da projeção do feixe óptico no papel vegetal.

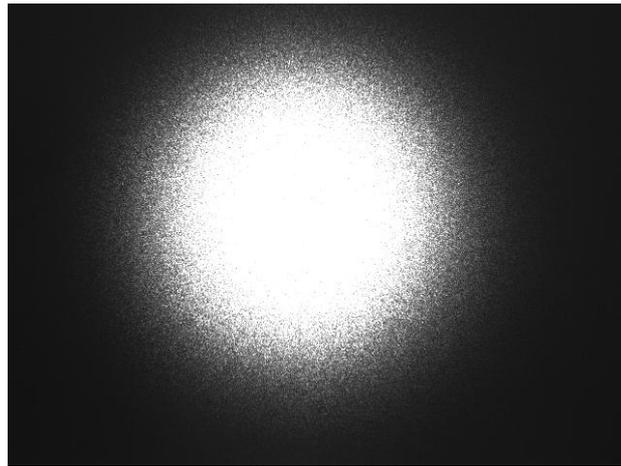


Figura 5-10: Projeção do sinal óptico no papel vegetal

O ruído foi medido para cálculo do SNR. O gráfico da figura 5-11 apresenta a tensão do fotodetector central. A amplitude calculada do ruído foi de 12 mV para queda de tensão 808 mV.

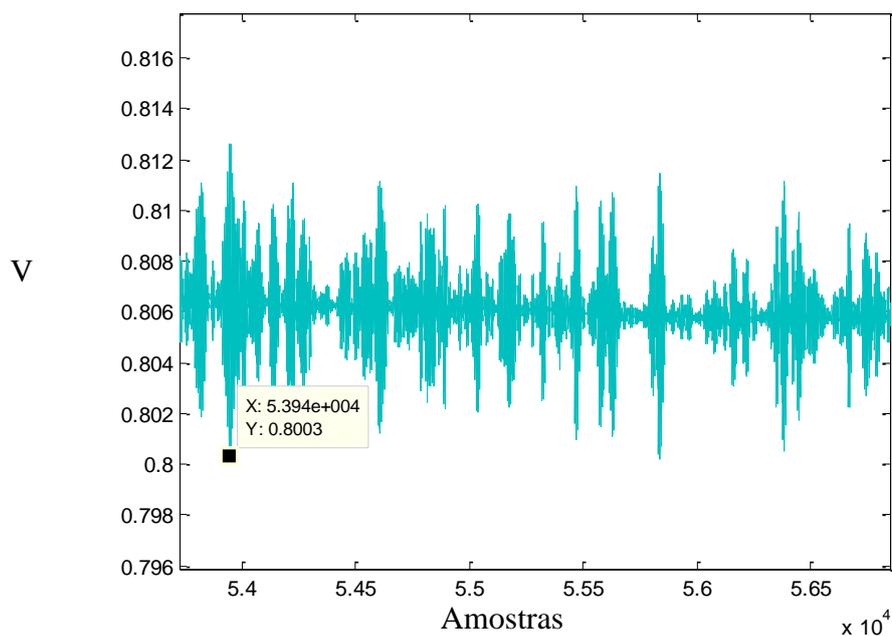


Figura 5-11: Gráfico V x Amostras do ruído do Arranjo Experimental II.

No trabalho realizado em 2009 [10], avaliou-se que a relação sinal ruído (SNR) de 18,5 dB seria suficiente para um erro limite de 0,1% e que se a distância d entre fotodetectores fosse muito menor que a largura W da gaussiana a solução da equação 4-9 (x_c, y_c) tenderia a zero.

A relação sinal ruído foi calculada em:

$$SNR = 10 \log\left(\frac{808}{12}\right) = 18,28 \text{ dB} \quad (5-1)$$

A distância entre os fotodetectores utilizados foi de 21,6 mm e a gaussiana calculada de 10,68 mm. O raio crítico, ou seja, a distância radial entre cada fotodetector e o centro que possibilita a maior sensibilidade foi calculada através da equação (4-12):

$$r_{\text{critico}} = \frac{\sqrt{2}}{2} W \quad (5-2)$$

E que para este caso teria o valor $r_{\text{critico}} = 7,55 \text{ mm}$, quando de fato o raio é de 12,5 mm.

5.5. Análise de Resultados do Arranjo Experimental II

Neste arranjo a dificuldade de alinhamento se tornou notória, na medida em que o diâmetro do feixe que chegava ao anteparo de papel vegetal que antes tinha 60 mm passou a ser de 20 mm. A utilização do Apontador LASER foi bem sucedida, apesar da pouca precisão para o alinhamento. O conjunto colimador-expansor funcionou satisfatoriamente e a projeção era gaussiana e possuía base circular como esperado.

A análise da relação sinal ruído ficou próximo ao ideal, $SNR = 18,28$, quando o ideal seria 18,5. A distância radial ideal para a largura da Gaussiana (W) encontrada de 10,68 mm seria de $r_{\text{critico}}=7,55 \text{ mm}$, porém, devido à característica física do anteparo, o mínimo possível é de 12,55 mm. Sendo assim, apesar do SNR ser aceitável a medida não foi possível em virtude do tamanho da projeção da Gaussiana do feixe (W) ser consideravelmente menor que a distância entre os fotodetectores, não convergindo o sistema de equações (4-9).

5.6. Arranjo Experimental III

O Arranjo Experimental III foi montado no corredor do bloco E da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense (UFF). Este arranjo contou com 42 metros de separação entre o transmissor e o receptor. Os objetivos deste arranjo foram aumentar a distância da medida da ordem de metros para dezenas de metros, preparando o SETUP para a medida externa realizada no Arranjo Experimental IV, simular turbulência utilizando uma pistola de ar quente, verificar a existência de turbulência em um ambiente fechado e medi-la com a nova técnica proposta. Os componentes deste arranjo são similares aos do Arranjo Experimental II, tendo como principal diferença a distância entre o transmissor e o receptor. A figura 5-12 apresenta o desenho do arranjo no corredor. E a figura 5-13 apresenta a fotografia do corredor visto pelo transmissor.

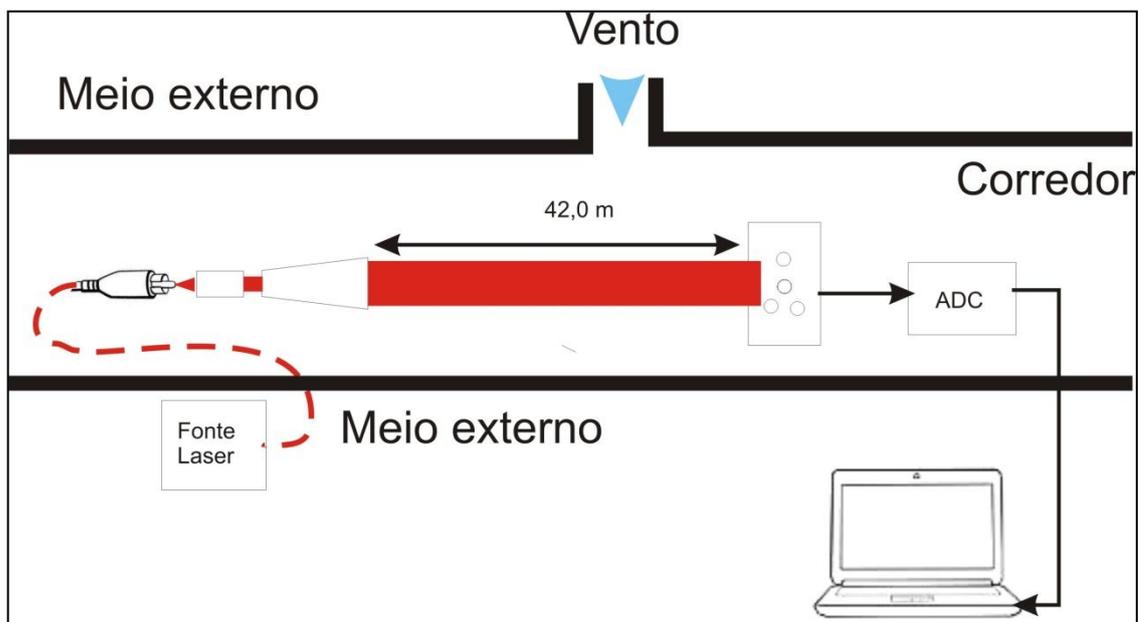


Figura 5-12: Desenho esquemático do Arranjo III



Figura 5-13: Receptor posicionado no corredor

As medidas foram realizadas durante onze horas onde as tensões dos fotodetectores foram registradas com auxílio do conversor analógico-digital e do programa MATLAB. Posteriormente foram calculadas as posições instantâneas dos centros do feixe utilizando-se a equação (4-9). O dia 30 de novembro de 2013 foi escolhido por ter sido um sábado e haver menos movimento na UFF evitando, assim, trepidações no piso que pudessem ser transferidas para o receptor ou transmissor, causando ruído indesejado na medida da turbulência.

O alinhamento foi realizado de forma similar ao experimento II, porém a distância não permitia visualizar as imagens da câmera utilizada. A esta distância o alinhamento já se torna crítico, pois o diâmetro do feixe é de aproximadamente 40 mm e pequenos ângulos de desvio são suficientes para a perda de alinhamento. O Apontador LASER que foi ajustado durante o Arranjo Experimental II foi utilizado no alinhamento grosso do sinal, porém a câmera para o alinhamento fino ainda se fazia necessária. Para auxiliar no alinhamento foi utilizado um roteador D-Link DSL 2640-T e criou-se uma rede de dois *laptops*, onde o primeiro exibia as imagens da câmera e o segundo repetia a informação mostrada no primeiro. Assim conseguiu-se realizar o alinhamento fino.

O próximo procedimento realizado foi a caracterização da Gaussiana projetada. Para tanto foram utilizados o anteparo com papel vegetal e a câmera IMPERX. Da mesma forma que nos experimentos anteriores, uma fotografia foi tirada da projeção do sinal óptico e utilizada no cálculo da largura da gaussiana. A figura 5-14 mostra a projeção do feixe no anteparo de papel vegetal e a figura 5-15 representa o cálculo da gaussiana realizado no programa MATLAB.

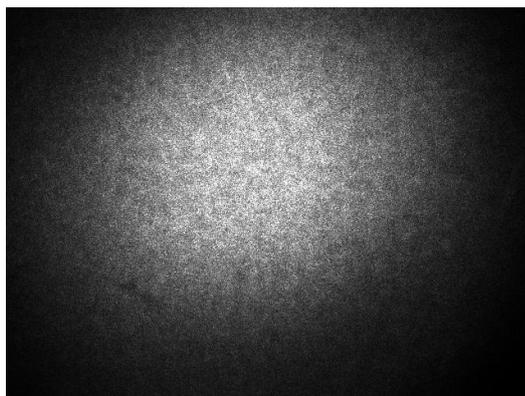


Figura 5-14: Projeção do feixe LASER no papel vegetal.

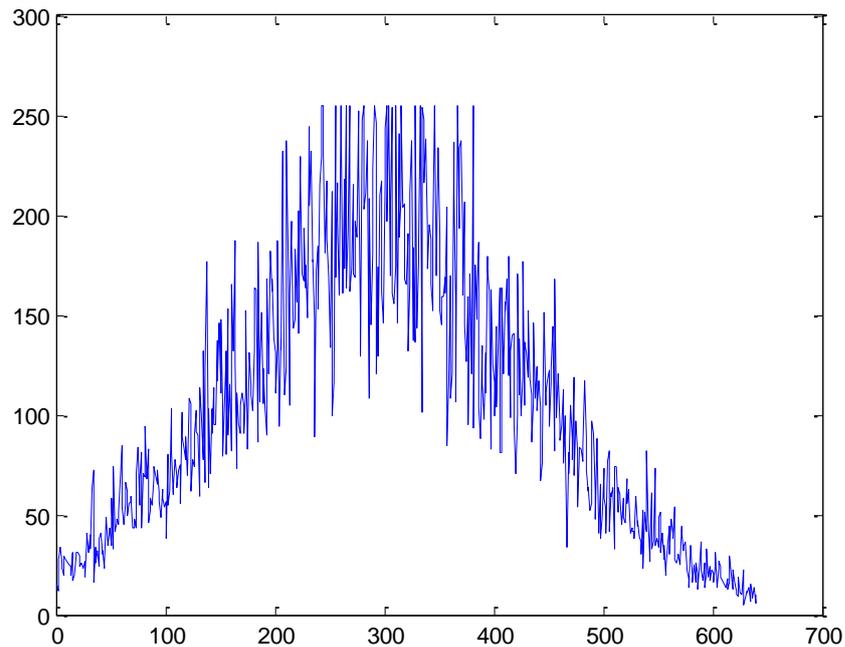


Figura 5-15: Gaussiana calculada (pixels).

Neste experimento, a Gaussiana foi medida também através do anteparo com os fotodetectores. Os parafusos micrométricos utilizados para o movimento de translação do anteparo tem passo igual a 0,5mm por volta e contam com o total de 50 voltas cada um. Foram utilizados dois arranjos de parafusos somando 50 mm de translação. O método para o levantamento da Gaussiana consiste em realizar a translação completa dos dois parafusos da direita para a esquerda cobrindo a linha imaginária que representa o diâmetro da projeção. Para a varredura da gaussiana primeiramente alinhou-se o feixe óptico com os fotodetectores garantindo, assim, que o fotodetector central recebesse a maior potência óptica e se localizasse na linha que representa o diâmetro. Feito isso a translação foi realizada e os valores de tensão do fotodetector central foram anotadas e lançadas no programa ORIGIN. A gaussiana calculada pelo ORIGIN resultou um W de 13,55 mm enquanto a calculada pelo MATLAB através da análise da fotografia do anteparo de vegetal mediu 15,56 mm. A figura 5-16 apresenta o gráfico da gaussiana calculada.

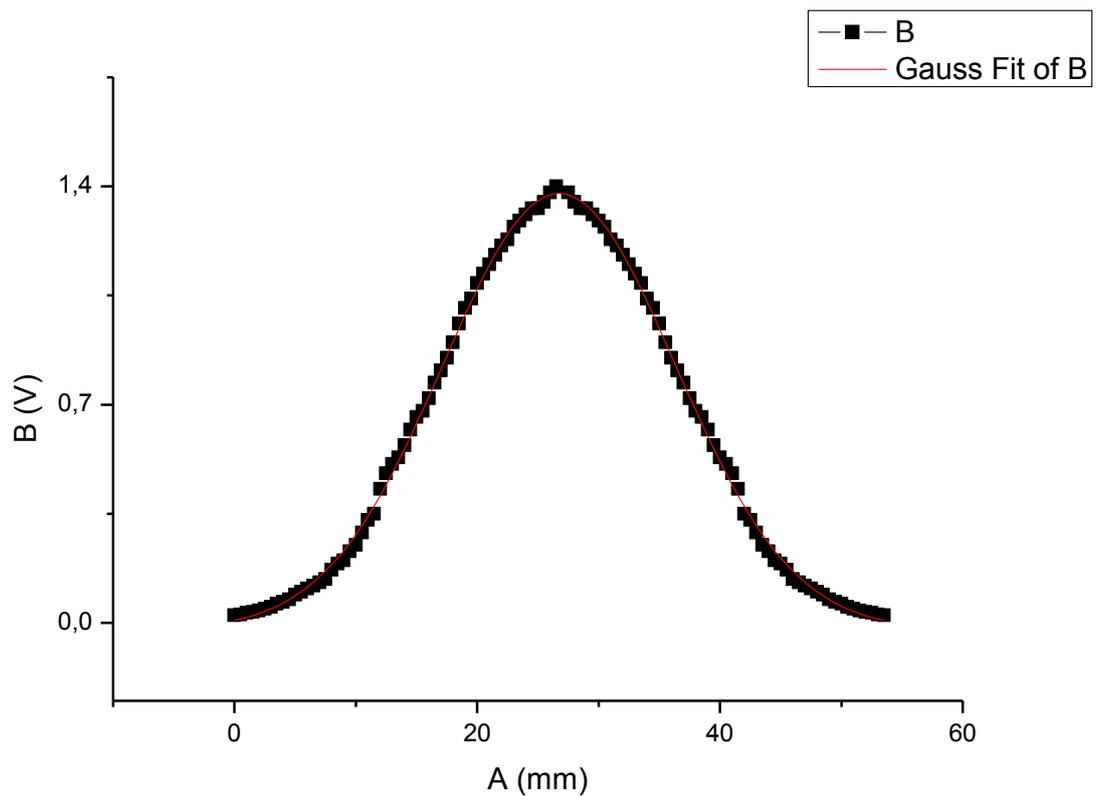


Figura 5-16: Gaussiana calculada no programa Origin.

Com o anteparo contendo os fotodetectores posicionado e alinhado com o feixe óptico, iniciou-se então a medida de turbulência. Para verificar se o arranjo seria sensível à turbulência, utilizou-se uma pistola de ar quente de 1500 W insuflando ar aquecido na região por onde passava o feixe LASER, a 5 m do receptor. O experimento durou 2 minutos e a pistola foi acionada de forma intermitente visando à verificação da resposta a turbulência e ausência desta. Escolheu-se apresentar a variação da posição apenas no eixo horizontal e foram calculados os C_n^2 dos trechos mais turbulentos e menos turbulentos. O resultado encontra-se na figura 5-17 e na tabela 5-1 onde o eixo x representa o número de amostras em 120 segundos e o eixo y representa o deslocamento do centro do feixe, na coordenada x, em mm:

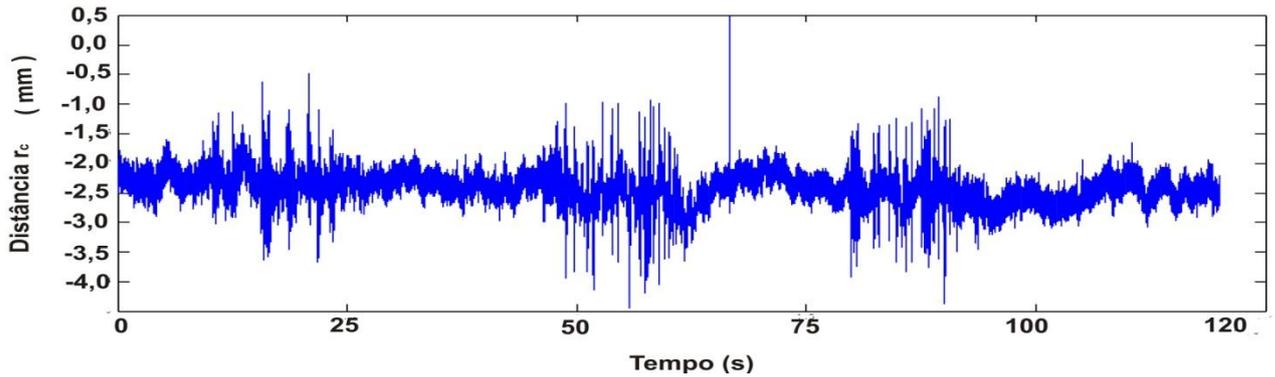


Figura 5-17: Variação dos valores de r_c sob o efeito da turbulência gerada pela pistola de ar quente.

Dados de turbulência gerada pela pistola de ar quente (EXP I)

Intervalo de tempo (s)	C_n^2 calculado	Pistola
0-25	$1,675 \times 10^{-13}$	Acionada
25-40	$0,809 \times 10^{-13}$	Parada
40-65	$1,329 \times 10^{-13}$	Acionada
65-80	$0,806 \times 10^{-13}$	Parada
80-95	$2,132 \times 10^{-13}$	Acionada
95-120	$0,845 \times 10^{-13}$	Parada

Tabela 5-1: Dados de turbulência gerada pela pistola de ar quente

Após o teste com a pistola de ar quente realizou-se a medida da turbulência atmosférica no corredor. O início da coleta de dados se deu às 10 h 30 min e findou às 21 h 30 min, totalizando 11 horas de medidas. Depois de calculada, a constante de estrutura do índice de refração tem sua variação mostrado na figura 5-18:

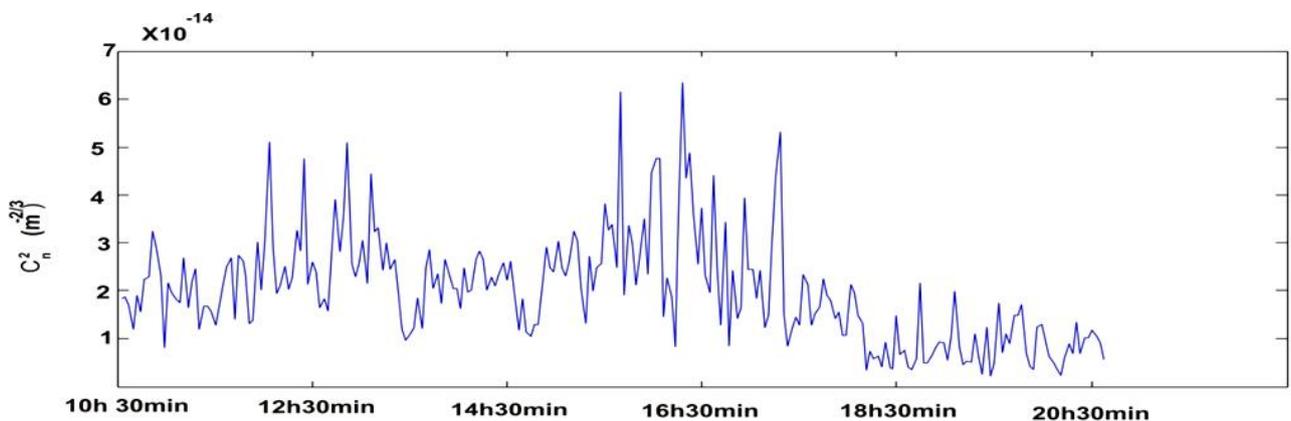


Figura 5-18: C_n^2 calculado no dia 30 de novembro de 2013.

Observou-se também a medida mais turbulenta e menos turbulenta, durante dois minutos a taxa de aquisição de 2 kHz. O espalhamento dos pontos que representam o centro

mostrado na figura 5-19 para a medida mais turbulenta e figura 5-20 para a medida menos turbulenta. A medida mais turbulenta ocorreu as 17 h e o C_n^2 calculado foi de $6,346 \times 10^{-14}$, enquanto a medida menos turbulenta foi as 20 h 08 min, e o C_n^2 calculado foi de $2,1403 \times 10^{-15}$.

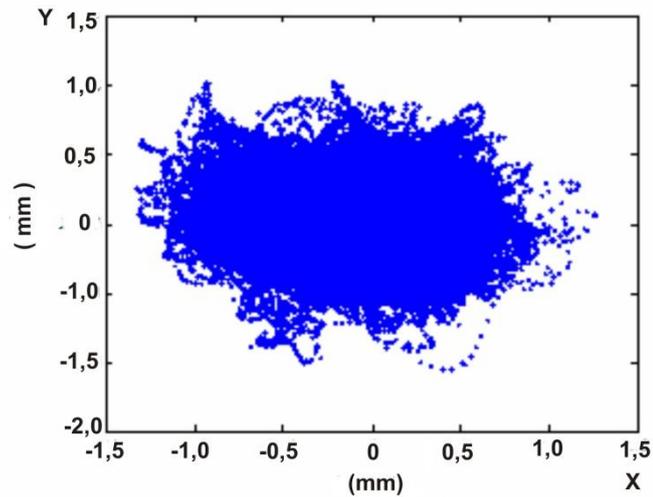


Figura 5-19: Medida mais turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.

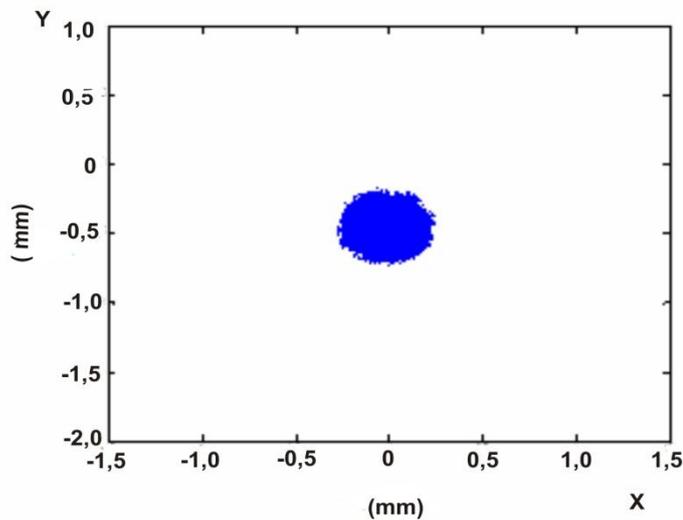


Figura 5-20: Medida menos turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.

No trabalho [paper do espectro], o autor levanta e discute dados relativos à análise espectral do *BEAM WANDER* a fim de aperfeiçoar o projeto de *RANGE FINDERS*. Aqui se decidiu verificar se a resposta da análise espectral do arranjo proposto seria similar à análise encontrada pelo autor. Foram escolhidos os dados que apresentaram a maior e a menor turbulência para serem analisados. A figura 5-21 apresenta a análise espectral da medida mais turbulenta e a figura 5-22 a menos turbulenta.

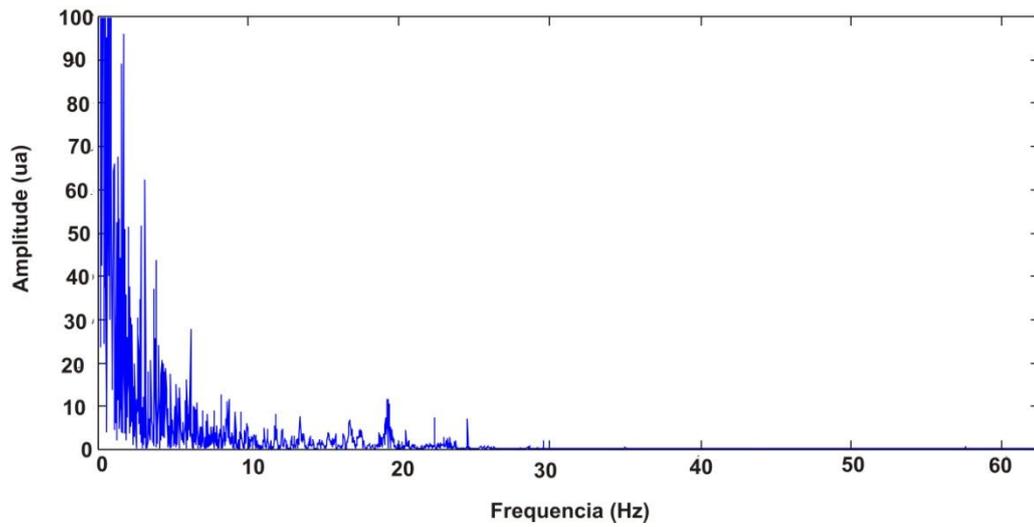


Figura 5-21: Medida mais turbulenta - Análise espectral.

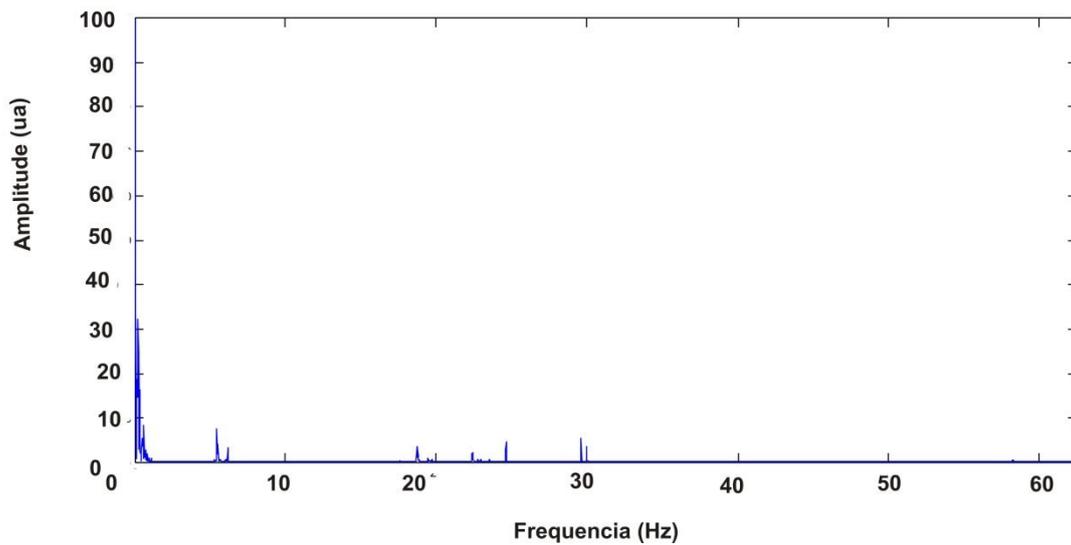


Figura 5-22: Medida menos turbulenta - Análise espectral.

Para o cálculo da resolução da medida foi levantado o ruído total no fotodetector central. Foi escolhida uma medida onde a potência recebida pelo fotodetector central fosse a maior entre todas, visando a caracterização do maior ruído. O ruído medido foi de 20 mV para a escolha em questão. A figura 5-23 mostra a tensão do fotodetector central no período de 20 s.

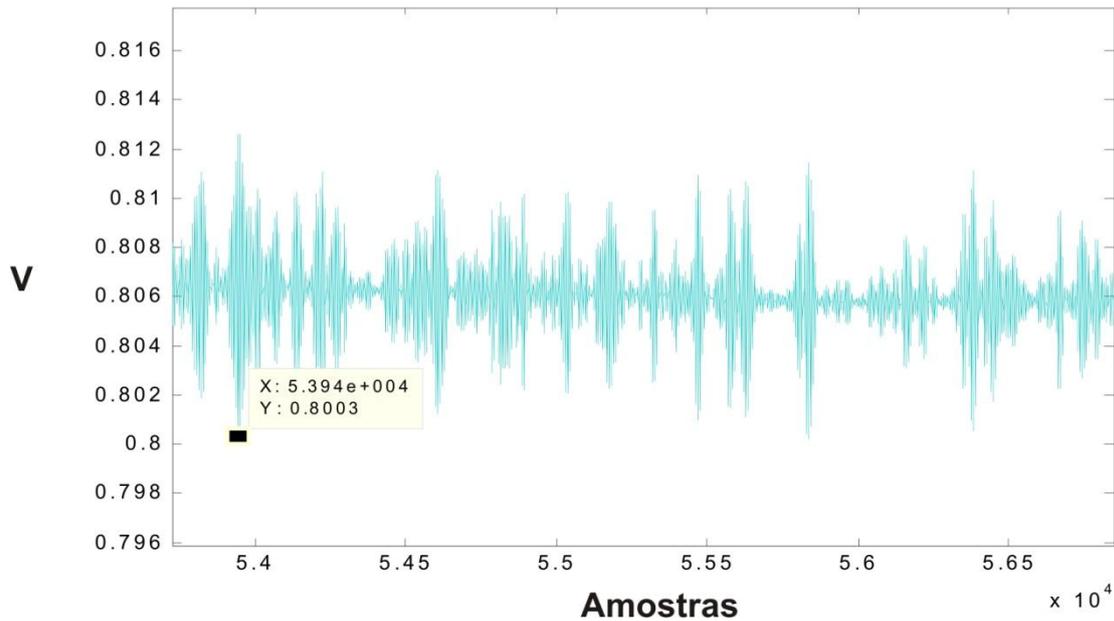


Figura 5-23: Ruído de 20 mV no fotodetector central.

A exemplo do Arranjo Experimental II, foram calculados o SNR, a, o $r_{\text{crítico}}$ e a resolução do sistema para este SETUP.

$$SNR = 10 \log \left(\frac{1350}{20} \right) = 18,29 \text{ dB} \quad (5-3)$$

A distância entre os fotodetectores utilizados foi de 21,6 mm e a gaussiana calculada de 13,55 mm. O raio crítico, ou seja, a distância radial entre cada fotodetector e o centro que possibilita a maior sensibilidade foi calculada através da equação:

$$r_{\text{crítico}} = \frac{\sqrt{2}}{2} W \quad (5-4)$$

E que para este caso teria o valor $r_{\text{crítico}} = 9,58 \text{ mm}$, quando de fato o raio é de 12,5 mm.

A resolução (Δr) da medida pode ser encontrada pela equação (4-14):

$$\Delta r = \frac{W^2 \exp\left(\frac{r}{W}\right)^2}{2rPc} \frac{P_{\text{ruído}}}{2} \quad (5-5)$$

E para o experimento o valor calculado da resolução foi $\Delta r = 0,12 \text{ mm}$

5.7. Análise de Resultados do Arranjo Experimental III

Verificou-se que o aumento em 16 vezes da distância implicou em maior dificuldade de alinhamento entre o receptor e o transmissor. A utilização do Apontador LASER foi bem sucedida durante o alinhamento grosso, mas a câmera foi ainda mais crucial para o alinhamento fino. A dificuldade de visualização das imagens da câmera devido à distância entre os dois aparatos foi sanada de forma satisfatória com a utilização da rede criada entre os LAPTOPS posicionados próximos ao transmissor e ao receptor, possibilitando o alinhamento fino.

As gaussianas das projeções do feixe calculadas pelo tratamento da fotografia do feixe e pela translação do anteparo dos fotodetectores apresentaram diferença de 2,01 mm. Esta inconformidade deve-se ao fato de que o corredor onde as medidas foram realizadas não pôde ser escurecido completamente devido a janelas voltadas para o exterior, assim, a imagem do feixe sofreu interferências da luminosidade indesejada afetando a medida da Gaussiana (W) O mesmo não ocorreu com a medida de W pela translação do anteparo, já que os fotodetectores possuem filtros [Anexo 8.2]. A medida de W utilizada então foi de 13,55 mm, por se achar mais conforme.

A resposta do sistema à turbulência real a distância de 42 m foi testada com sucesso utilizando-se a pistola de ar quente. A média das medidas de turbulência durante a utilização da pistola apresentou $C_n^2 = 1,712 \times 10^{-13}$, duas vezes maior que a apresentada sem a utilização da pistola que foi de $C_n^2 = 0,820 \times 10^{-13}$. A média das medidas mais turbulentas é 107% maior que das menos turbulentas. Observa-se ainda que o C_n^2 calculado após a utilização da pistola é maior do que o encontrado na medida mais turbulenta ($0,634 \times 10^{-13}$) realizada sem a utilização da pistola. Isso deve-se ao turbilhonamento residual deixado pelo ar quente que foi insuflado.

O A figura 5-18 apresenta as constantes de estrutura do índice de refração calculadas para todo o período. O maior valor encontrado foi de $C_n^2 = 6,34 \times 10^{-14}$, enquanto o menor foi $C_n^2 = 2,14 \times 10^{-15}$. Ambos os valores considerados turbulência média [13]. Observando ainda o a figura 5-18 pode-se verificar maior turbulência nos períodos compreendidos entre as 11h e 13 h e um segundo período entre 16 h e 20 h. No primeiro período esperava-se o aumento da turbulência por ser a hora de maior insolação, caso o experimento tivesse se passado em ambiente externo. Mas no caso desta medida *INDOOR* percebeu-se maior fluxo de ar quente vindo do corredor que se comunica com o ambiente externo, tendo visivelmente influenciado na medida, aumentando a turbulência do ar. No segundo período, porém, não era esperado um

aumento da turbulência e sua ocorrência coincidiu com uma precipitação ocorrida no final da tarde devido às altas temperaturas constatadas durante o dia. A temperatura do ar trazido pela vento da chuva era até 3°C menor que a encontrada no corredor que foi aquecido durante todo o dia. Às 19h verifica-se queda significativa da turbulência, coincidindo com o momento em que as portas externas do corredor onde a medida estava sendo realizada foram fechadas, reduzindo assim o fluxo de ar e a turbulência para valores próximos a 10^{-16} , passando a ser considerada fraca. Mesmo após o fechamento das portas externas ainda havia o fluxo fraco de ar advindo das escadas de acesso a outros andares, dando origem a turbulência fraca.

As figuras 5-19 e 5-20 apresentam as plotagens dos centros instantâneos das amostras em questão. A dispersão da amostra menos turbulenta é de 0,53 mm na direção horizontal enquanto na direção vertical é de 0,55mm. Observando-se a dispersão na amostra mais turbulenta a dispersão é 5 vezes maior, apresentando 2 mm horizontalmente e 2,5 mm verticalmente. A seção reta do fotodetector utilizado é de 1 mm^2 e o desvio de médio de 1,25 mm, para a medida mais turbulenta, ocasiona, segundo a equação 4-2, a diminuição da tensão no fotodetector central de 1,35 V para 1,34 V, ou seja a perda de potência seria da ordem de 1,48%.

Nas análises espectrais apresentadas nas figuras 5-21 e 5-22, verifica-se que a distribuição de ambos os espectros é exponencial negativa, tendo valores expressivos até 30 Hz. Verificou-se que na medida menos turbulenta, o conteúdo espectral do sinal é concentrado nas frequências mais baixas. Na medida mais turbulenta, ocorre o incremento de componentes espectrais de maiores frequências. Em ambos os espectros, a distribuição da densidade espectral de potência é exponencial negativa, decrescendo com o aumento da frequência. Observando as medidas mais e menos turbulentas, assim como suas análises espectrais, pode-se depreender que o aumento da turbulência atmosférica provoca o incremento da amplitude do espalhamento dos centros do feixe (domínio espacial) e também da frequência destes espalhamentos.

A análise do ruído do sistema envolveu a totalidade dos ruídos, tendo o valor de 20 mV, e a relação sinal ruído calculada foi $SNR = 18,29 \text{ dB}$, próximo ao desejado de $SNR = 18,5 \text{ dB}$, denotando erro próximo a 1% como desejado. O raio crítico calculado $r_{\text{critico}} = 9,58 \text{ mm}$ ficou distante do raio utilizado 2,92 mm, reduzindo, assim, a sensibilidade do sistema para a largura de gaussiana W calculada em comparação com a máxima sensibilidade possível. Apesar disso a resolução encontrada para a medida foi de 0,12 mm.

5.8. Arranjo Experimental IV

Nos tópicos anteriores foram desenvolvidos três arranjos experimentais com o fim de averiguar a possibilidade da execução de uma medida atmosférica real. No primeiro arranjo verificou-se a resposta em frequência do experimento, no segundo arranjo levantou-se a característica da Gaussiana do novo arranjo e o seu ruído sem a turbulência atmosférica, no terceiro experimento realizou-se a medida da turbulência *INDOOR* e neste último experimento foi realizada a medida *OUTDOOR*. Este experimento teve como objetivo o levantamento do perfil de turbulência para os dias das medidas.

Para as medidas o arranjo foi montado entre os prédios D e E por entre as janelas que ficam frontalmente posicionadas, a uma altura de 15 metros. O conjunto transmissor foi posicionado sobre a bancada do laboratório enquanto o conjunto receptor foi montado no fundo de uma sala de aula, visando diminuir a interferência da luz solar. A figura 5-24 apresenta o desenho do arranjo e a figura 5-25 exibe a fotografia do prédio D da Escola de Engenharia da UFF vista do transmissor.

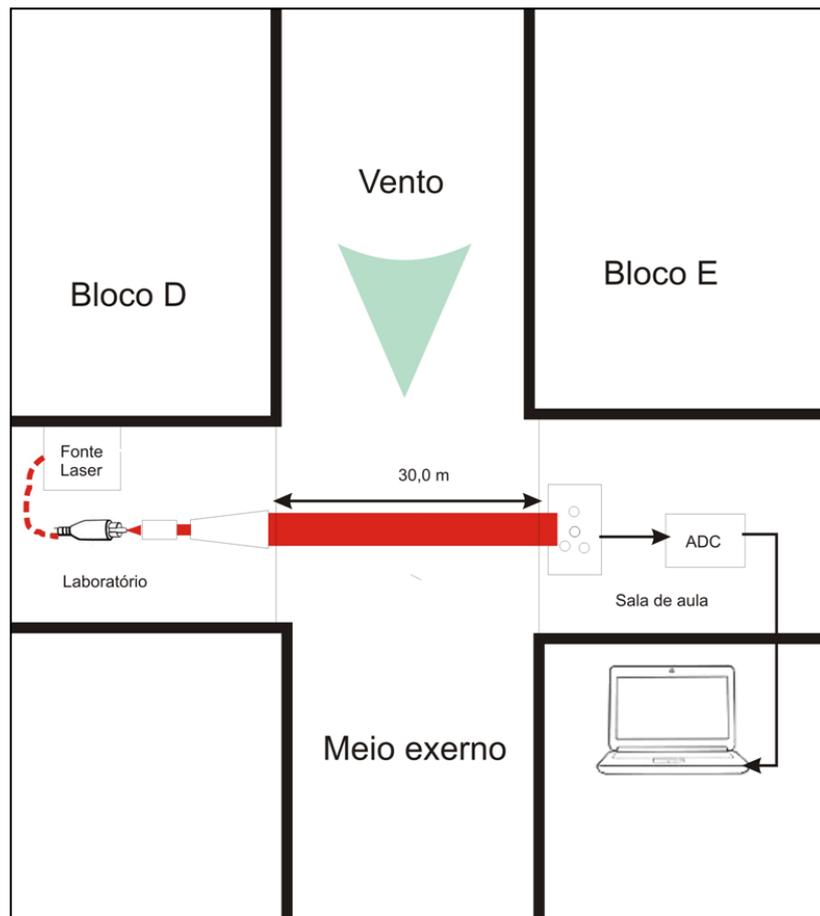


Figura 5-23: Desenho representando o Arranjo IV.



Figura 5-25: Transmissor próximo à janela externa e vista do prédio D da Escola de Engenharia.

Para o alinhamento foi utilizado método similar ao Arranjo Experimental III, com dois LAPTOPS e um roteador para fazer a rede entre eles. Após o alinhamento grosso com o apontador LASER foi realizado o alinhamento fino com a câmera IMPERX e os computadores. Seguindo o mesmo método utilizado anteriormente foi medida a gaussiana da projeção do LASER.

Na medida foi levantado o perfil de turbulência entre os dois prédios por um período de oito horas. Nesta medida não foram levantados o perfil de temperatura e vento. A figura 5-26 apresenta a plotagem dos C_n^2 .

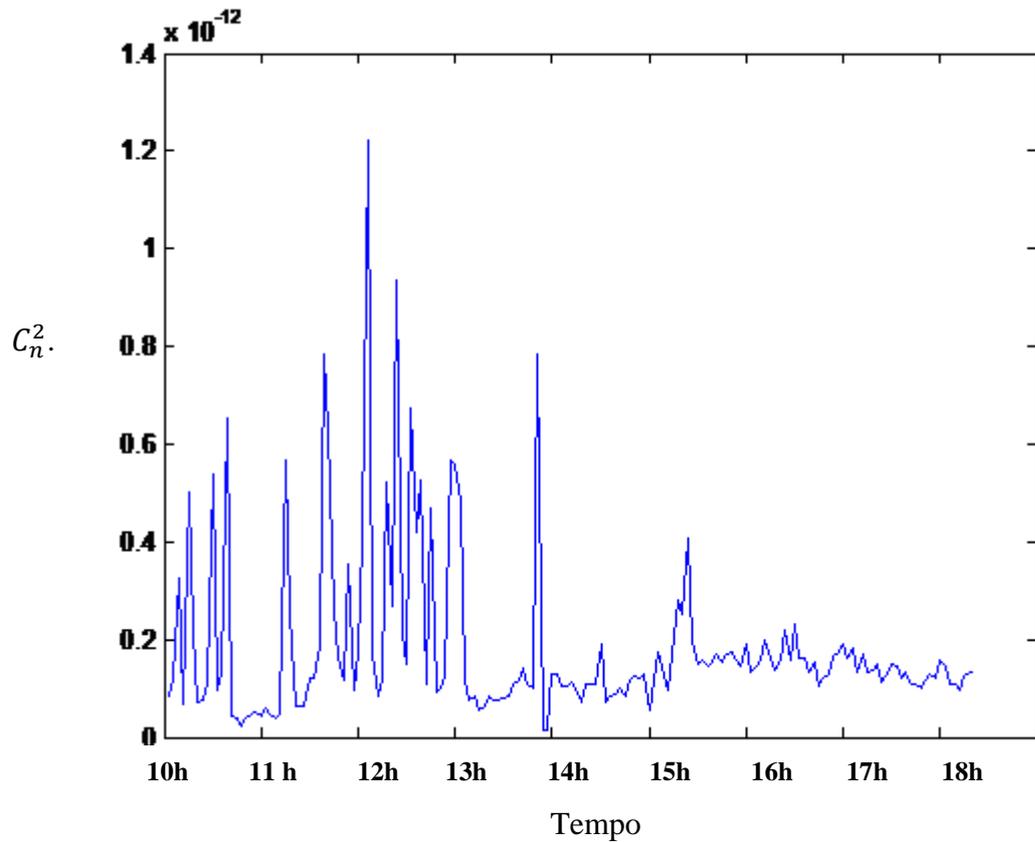


Figura 5-26: C_n^2 calculado no dia 20 de dezembro 2013.

Foram observados os períodos mais turbulentos e menos turbulentos. As medidas foram realizadas durante dois minutos com a taxa de aquisição de 200 Hz. O período mais turbulento ocorreu às 12 h com C_n^2 de $9,342 \times 10^{-13}$ e o período menos turbulento às 10 h 50 min com C_n^2 de $2,348 \times 10^{-14}$. A figura 5-27 apresenta a distribuição dos centros instantâneos do feixe para a medida mais turbulenta e a figura 5-28 apresenta a mesma distribuição para a medida menos turbulenta.

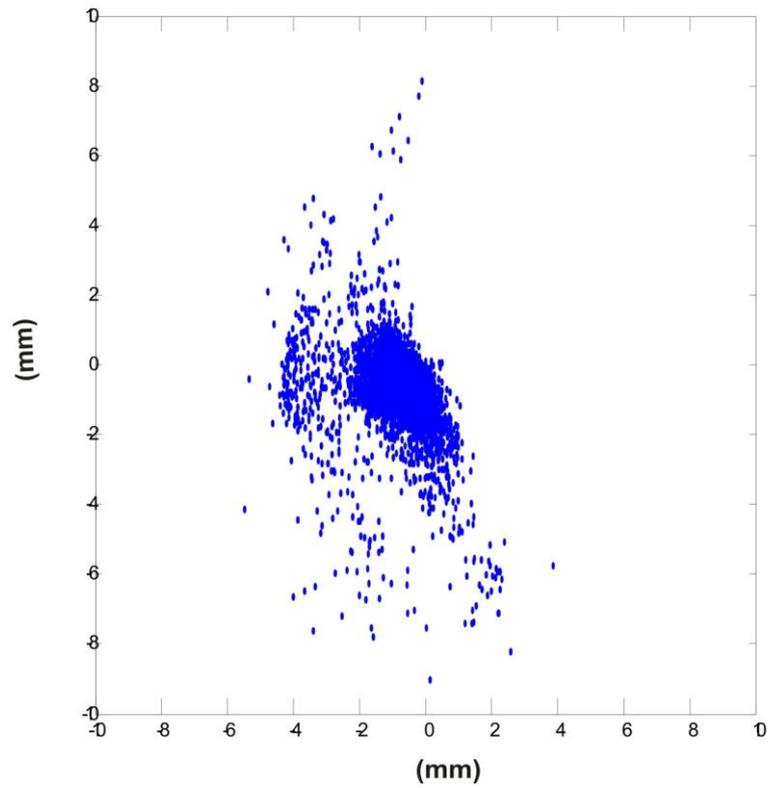


Figura 5-27: Medida mais turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.

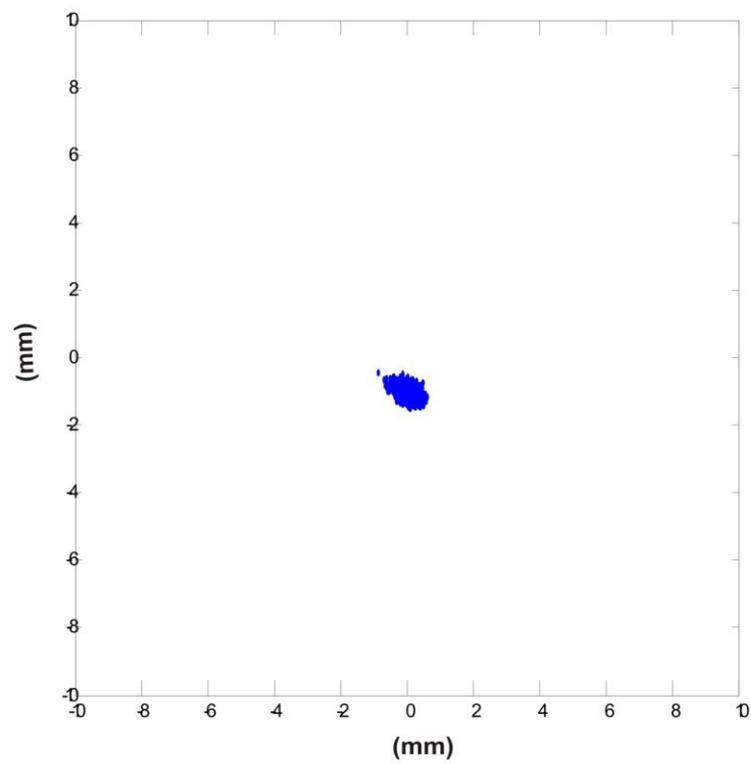


Figura 5-28: Medida menos turbulenta- Espalhamento dos centros instantâneos.

E a análise espectral destes períodos foi feita a exemplo do Arranjo III e encontram-se nas figuras 5-29 e 5-30.

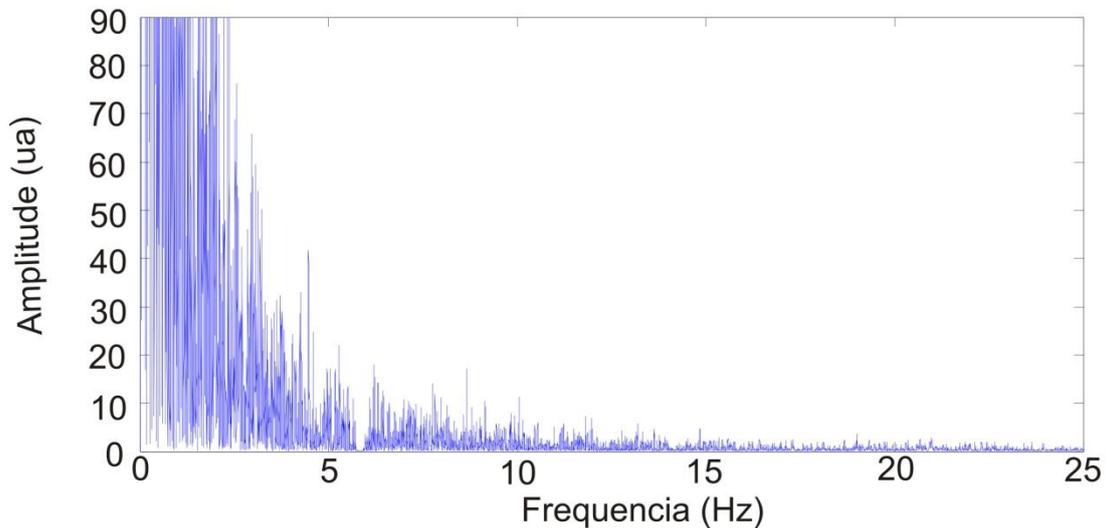


Figura 5-29: Média mais turbulenta- Análise espectral.

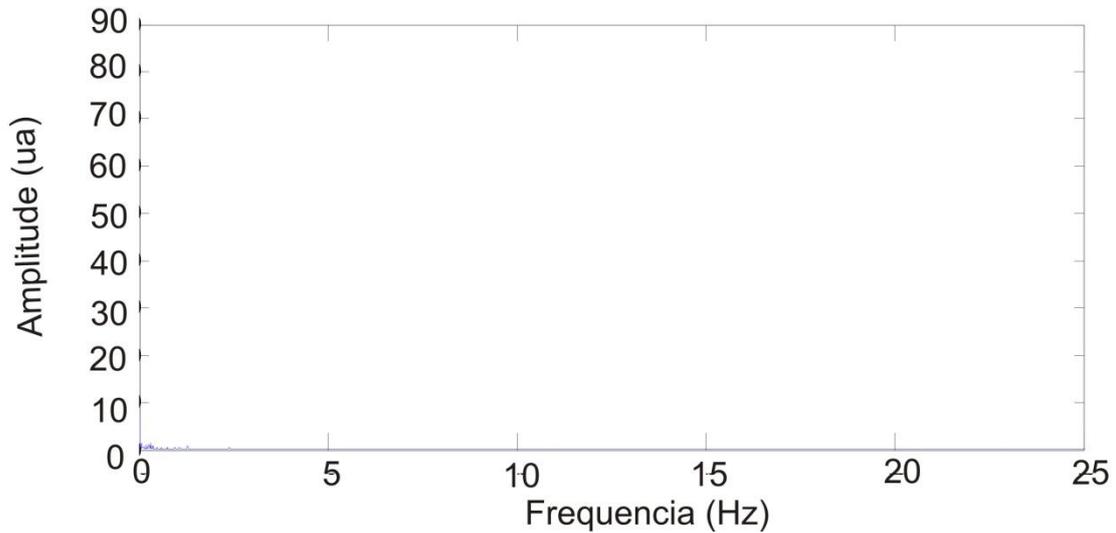


Figura 5-30: Média menos turbulenta- Análise espectral.

Também foram calculados o ruído do sistema e resolução para esta medida. As amostras foram levantadas às 10h 32min, às 12h e às 18h 38 min. E o ruído calculado foi de 37 mV, 53 mV e 48 mV, respectivamente. As figuras 5-31, 5-32 e 5-33 apresentam os ruídos acima.

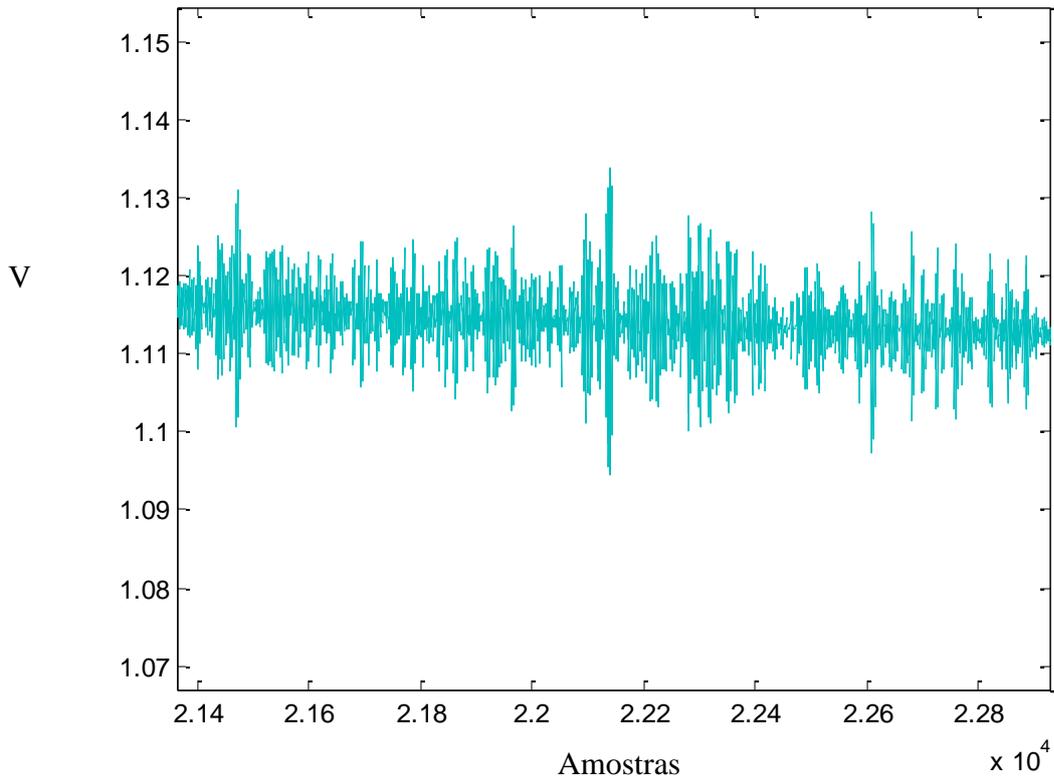


Figura 5-31: Ruído de 37 mV no fotodetector central.

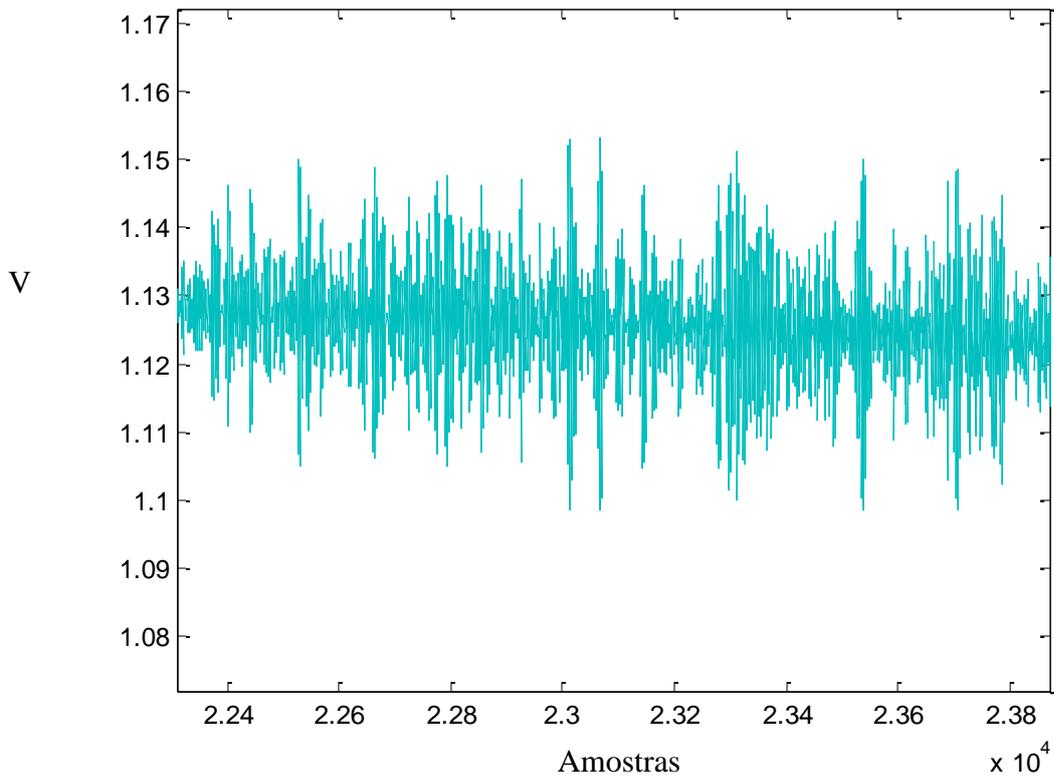


Figura 5-32: Ruído de 53 mV no fotodetector central.

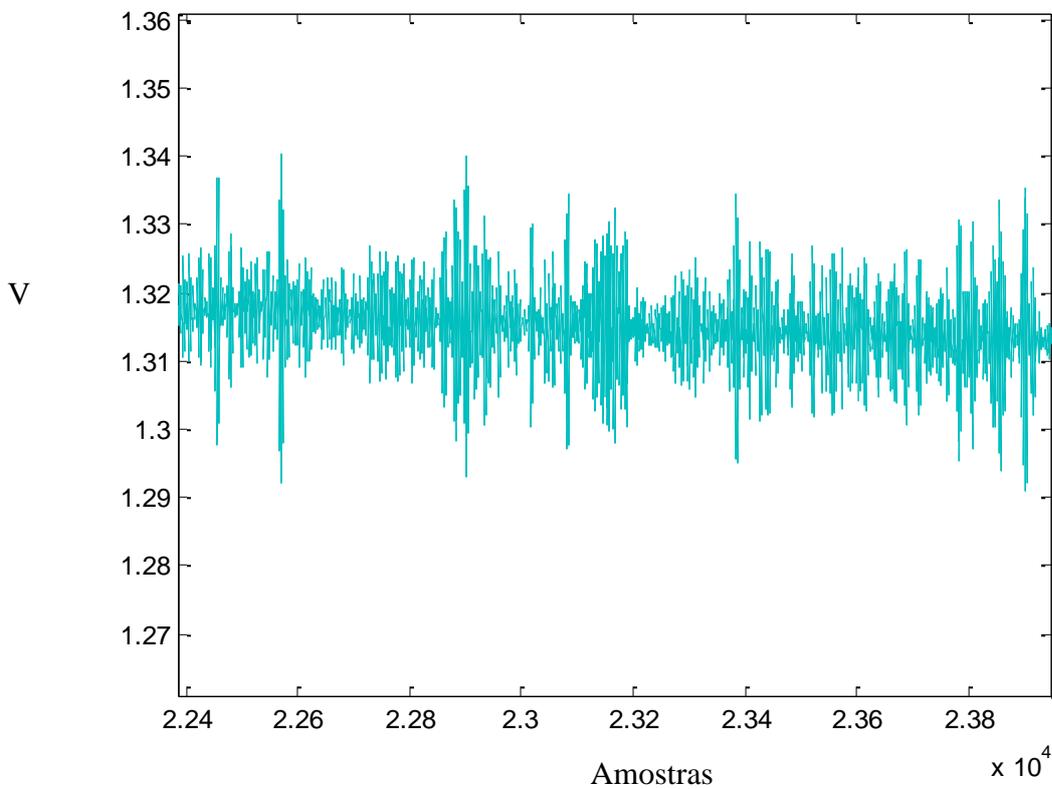


Figura 5-33: Ruído de 48 mV no fotodetector central.

Foram calculadas as relações sinal ruído para as três amostras escolhidas.

$$SNR_1 = 10 \log \left(\frac{1117}{37} \right) = 14,79 \text{ dB} \quad (5-6)$$

$$SNR_2 = 10 \log \left(\frac{1129}{53} \right) = 13,28 \text{ dB} \quad (5-7)$$

$$SNR_3 = 10 \log \left(\frac{1319}{48} \right) = 14,39 \text{ dB} \quad (5-8)$$

A resolução (Δr) da medida pode ser encontrada utilizando-se a equação 5-15, $P_c = 1,32 \text{ V}$, $W = 11,5 \text{ mm}$ e $r = 12,5 \text{ mm}$. E para o experimento o valor calculado da resolução foi $\Delta r = 0,34 \text{ mm}$.

5.9. Análise de Resultados do Arranjo Experimental IV

Verifica-se na figura 5-26 da Medida I que a distribuição da constante de estrutura do índice de refração calculado C_n^2 teve comportamento esperado apresentando maiores valores no período de maior insolação, com pico de $C_n^2=9,342 \times 10^{-13}$ às 12h. Percebe-se uma elevação gradativa do C_n^2 desde o início da medida às 10 h 30 min até às 12 h, momento em que atinge o valor máximo medido e decresce também gradativamente até o valor médio de $1,44 \times 10^{-13}$, após as 16 h. Este comportamento é condizente com o encontrado na literatura e demonstra que o experimento foi bem sucedido na medida da constante de estrutura do índice de refração.

Analisando os períodos mais turbulentos e menos turbulentos nas figuras 5-27 e 5-28, verifica-se o aumento da dispersão dos centros instantâneos que às 10 h 50 min foi calculado em 1,41mm no eixo horizontal e 1,06 mm no eixo vertical, aumenta para 8,45 mm no eixo horizontal e 17,17 mm no eixo vertical. O desvio de médio de 8, 58 mm, percebido na medida mais turbulenta, ocasiona, segundo a equação 4-2, a diminuição da tensão no fotodetector central de 1,12 V para 0,64 V, ou seja, a perda de potência seria de 70%. Para o mesmo ruído de 53 mV medidos a relação sinal ruído cairia para $SNR = 10,08$ dB. A diminuição da SNR implica na redução da largura da banda de transmissão do sistema em virtude do aumento da taxa de erro de bit (BER).

Percebe-se, então, que houve relação entre os dados de turbulência e os da dispersão dos centros instantâneos do feixe. A tabela 5-2 apresenta na primeira coluna as medidas de turbulência que foram tratadas nos Arranjos Experimental III e IV e na segunda coluna as respectivas dispersões em mm^2 .

C_n^2	Dispersão (mm^2)
$2,14 \times 10^{-15}$	0,29
$2,34 \times 10^{-14}$	1,49
$6,34 \times 10^{-14}$	5,00
$9,34 \times 10^{-13}$	17,07

Tabela 5-2: Relação turbulência e dispersão dos centros instantâneos.

Nas análises espectrais apresentadas nas figuras 5-29 e 5-30, verifica-se que a distribuição de ambos os espectros é exponencial negativa, tendo valores expressivos até 30 Hz, a exemplo do ocorrido na medida *INDOOR*. Na medida mais turbulenta observa-se maior

densidade espectral enquanto na menos turbulenta o espectro apresenta-se pouco denso. Esta análise também é conforme com a apresentada no trabalho [12].

Na análise de ruído percebe-se que o valor de $SNR_2 = 13,28$ dB ficou bem aquém do desejado de $SNR = 18,5$ dB. O aumento de ruído era esperado em virtude da luminosidade advinda do meio externo. Os fotodetectores utilizados nessa medida possuem filtros infravermelhos, reduzindo o ruído proveniente das luzes fluorescentes do corredor onde foram realizadas as medidas *INDOOR*, o mesmo não ocorreu para as medidas externas. Apesar das janelas da sala onde se encontrava o sistema de recepção possuírem filme para redução da incidência de luz solar, os fotodetectores foram impressionados pela luz infravermelha natural e apresentaram ruídos aumentados e diferenciados ao longo do dia. O maior ruído foi registrado próximo às 12h quando a posição do sol possibilita maior incidência sobre a área da medida.

A resolução (Δr) da medida foi menor que a do Arranjo Experimental III, quanto maior o valor de Δr pior a resolução tendo em vista que o menor valor medido no primeiro arranjo era de 0,12 mm e passou a 0,34 mm neste. A análise dos parâmetros W e $P_{ruído}$ retrata a causa da redução. O parâmetro W reduziu em virtude da diminuição da distância do experimento de 42 m para 30 m, como consequência o espalhamento geométrico diminuiu e com ele a largura da gaussiana que era $W = 13,55$ no Arranjo Experimental III e passou a ser $W = 11,5$ neste experimento. Também o ruído foi alterado de 20 mV para 53 mV em virtude da luz do sol advinda do exterior.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a medida real de turbulência por triangulação de potências em ambiente externo. Para tanto foram apresentados os tópicos relacionados ao meio ambiente e sua influência sobre a propagação do sinal óptico. O *Beam Wander*, a cintilação e o alargamento do feixe foram explorados como efeitos da turbulência e suas consequências para o enlace FSO foram trabalhadas. Em sequência, a turbulência atmosférica foi estudada, definiu-se a constante de estrutura do índice de refração, C_n^2 e foram abordados os aspectos teóricos envolvendo a propagação da frente de onda óptica pela atmosférica, destacado o formato gaussiano do feixe LASER e suas propriedades. Na sequência foi apresentada a técnica de medida de turbulência, sua análise qualitativa e quantitativa. Por fim foram expostos os quatro arranjos para o experimento que visou à prova prática da técnica em uma medida real.

O Arranjo Experimental I mostrou a automação da simulação da turbulência em relação aos arranjos anteriormente testados a frequências próximas às encontradas na atmosfera. Este novo arranjo possibilitou a aplicação da técnica a frequências até 1,5 kHz. O Arranjo Experimental II possibilitou a preparação para medidas a distâncias maiores que 0,89m, verificando-se a necessidade da utilização de um Apontador LASER auxiliar para o alinhamento grosso do sistema. O Arranjo Experimental III apresentou o experimento sob a influência da pistola de ar quente simulando a turbulência atmosférica e realizou-se a medida da turbulência atmosférica *INDOOR* por um período de onze horas, onde o resultado da turbulência calculada e de sua análise espectral corresponderam às encontradas em

experimentos similares. O Arranjo Experimental IV finalizou a série de experimentos para a prova da técnica sob turbulência real em meio externo. Apresentou resultados condizentes com os encontrados na literatura e teve o comportamento esperado no cálculo da constante de estrutura do índice de refração. As medidas utilizando a técnica foram bem sucedidas e as dificuldades crescentes para a medida da turbulência foram expostas e suas soluções apresentadas.

Para os trabalhos futuros vislumbram-se como desafios: As soluções dos problemas encontrados como o ruído proveniente da luz solar através de filtros na frequência do feixe óptico. A utilização de um ambiente controlado em temperatura, umidade, vento e pressão para o estudos destes parâmetros junto ao uso da técnica. O desenvolvimento de protótipo de equipamento para a medida de turbulência atmosférica, contemplando a correção do enlace em caso de turbulência excessiva. E por fim a realização de medida de turbulência utilizando sinal modulado para correlacionar o efeito atmosférico com a taxa de erro de bit.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFIA

- [1]. LINSPECTOR, Clarice. *Como Nascem as Estrelas: Doze Lendas Brasileiras*. 3.ed. Rio de Janeiro.
- [2]. GINO, Colleen. *Starry Night: The Study of Stellar Scintillation*. Astrophys-Assist Educational Resources. Disponível em: < <http://www.get-to-know.org/education> >. Acesso em: 15 jan. 2014.
- [3]. VITTORIO, Canuto; DUBOVIKOV, Mikhail. *Turbulence*. NASA - National Aeronautics and Space Administration. Goddard Institute for Space Studies. Disponível em: < http://www.giss.nasa.gov/research/briefs/canuto_01 >. Acesso em: 15 jan. 2014.
- [4]. NEWTON, Isaac. *Opticks*, based on the 4th ed. London. Estados Unidos da América: Dover Publications, 1952.
- [5]. RICHARDSON, Lewis Fry. *Weather Prediction by Numerical Process*. Reino Unido: Cambridge, 1922.
- [6]. KOLMOGOROV, Andrei Nikolaevich. *The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers*. Reino Unido: Royal Society Publishing Transl. Proc. Math Phys. Sci., vol. 434, p. 9-13, Julho 1991 [Compilado de Dokl. Akad. Nauk SSSR Rússia, p. 301-305, 1941].
- [7]. TATARSKII, Valerian Il'ich. *The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation*. (Traduzido para NOAA por Israel Program for Scientific Translations, Jerusalém, 1941)

- [8]. MAIMAN, Theodore Harold. *Stimulated optical radiation in ruby*. Estados Unidos da América: *Nature* 187 (4736): 493–494, 1960.
- [9]. ANDREWS, Larry C.; PHILLIPS, Ronald L.. *Laser Beam Propagation Through Random Media*. 2. ed. Estados Unidos da América: Spie Press, 2005.
- [10] SILVA, Vinicius. Nunes Henrique; BARBERO, Andrés Pablo Lopez; RIBEIRO, Ricardo Marques. *A new triangularion-like technique for the evaluation of the refractive index structure constant (C_n^2) in free-space optical links*. Estados Unidos da América: *IEEE Jour. Light Tech.*, vol. 29, p. 3603-3610, Dezembro 2011.
- [11]. KAUSHAL, Hemani; KUMAR, Vivek; DUTTA, Agnibesh; JOSEPH, Joby. *Experimetal Study on Beam Wander Varying Atmospheric Turbulence Conditions*. Estados Unidos da América: *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, p. 1691-1693, Novembro 2011.
- [12]. DIBLIK, Jan. *Spectrum of the beam wandering noise*. 9th Inter. Conf. Envir. Elet. Eng. Estados Unidos da América, pp. 435-437, 2010.
- [13]. SILVA, Vinicius Nunes Henrique. *Desenvolvimento Experimental de uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre*. Niterói, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2009.
- [14]. WILLEBRAND, Heinz; GHUMAN, Baksheesh. *Free-Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Estados Unidos da América: Sams, 2002.
- [15] CPTEC INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Dados observacionais. Apresenta dados históricos de climatologia e precipitações. Disponível em < <http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em : 15 jan. 2014.
- [16]. BOUCHET, Olivier; SIZUN, Hervé; FAVENNEC, Pierre-Noel. *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. França: ISTE, 2006.
- [17]. BALANIS, Contantine. *Advanced Engineering Eletromagnetics*. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, 1989.
- [18] WEICHEL, Hugo. *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. Estados Unidos da América: SPIE, 1990.
- [19]. UCHIDA; Junzo; ARIMOTO, Yoshinori. *Feasibility Study of Laser Communications on International Space Station*. Japão: *The Review of Laser Engineering*, vol 28, nº12; p..814-818, 2000.

[20]. VERESHCHAGIN, Nikolai; VITÁNYI, Paul. *Kolmogorov's Structure Functions and Model Selection*. Estados Unidos da América: *IEEE Transactions on Information Theory*, vol 50, n°12, p. 3265-3290, Dezembro 2004.

[21]. ASSIS, Nelson Cevidanes Nascimento. *Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude*. Niterói, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) – Centro Tecnológico, Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2012.

CAPÍTULO 8

ANEXOS

8.1. Especificações do FSO SONA BEAM Z



Free-Space Optical	1250-Z ¹	2500-Z ²
<i>Datarate/protocol:</i>	Fast Ethernet: 125 Mbps, full duplex; OC-3/STM-1: 155 Mbps, full duplex Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex; OC-12/STM-4: 622 Mbps, full duplex	OC48/STM16, 2.5 Gbps, full duplex Gigabit Ethernet: 1.25 Gbps, full duplex
<i>Range: 3 dB/km (clear air):</i>	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)	50 m to 500 m (160 ft to 0.3 mi)
<i>10 dB/km (extreme rain):</i>	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)	50 m to 350 m (160 ft to 0.2 mi)
<i>Laser output power:</i>	160 mW peak	160 mW peak
<i>Receive aperture:</i>	50 mm (2 in) diameter	50 mm (2 in) diameter
Interface Options	1000-Base-SX (850 nm)	1000-Base-LX (1310 nm)
<i>Data physical interface:</i>	Multimode fiber, LC	Singlemode fiber, LC
<i>Fiber xmtr/rcvr wavelength:</i>	850 nm nominal	1310 nm nominal
<i>Fiber xmtr output power:</i>	-9 dBm (min), -3 dBm (max)	-11 dBm (min), -3 dBm (max)
<i>Fiber rcvr input power:</i>	0 dBm (min), -17 dBm (max)	-20 dBm (min), -3 dBm (max)
Mechanical / Electrical / Environmental		
<i>Operating temperature:</i>	-40°C to 60°C (-40°F to 140°F)	<i>Dimensions (W*H*D):</i> 25 x 33 x 46 cm; 10 x 13 x 18 in
<i>Pointing stability:</i>	120 kmh/75 mph operating, >160 kmh/100 mph survival	<i>Weight:</i> 10 kg (22 lbs)
<i>Environmental seal:</i>	Water-tight, IP66/NEMA-4 Cert.	<i>Input voltage:</i> -48 VDC (-40 V to -57 V) or 100-240 VAC
		<i>Power consumption:</i> 25 watts (no heater)
Carrier-Class Reliability and Durability		
<i>Laser cooling:</i>	Active solid state cooling to 35°C (95°F)	<i>Power supply:</i> Telco grade, >550,000 hour
<i>Structure:</i>	Aluminum housing	
Element Management and Control		
<i>Management interface:</i>	USB, Serial & 10/100-baseT	<i>GUI control program:</i> SONAbeam Terminal Controller
<i>SNMP:</i>	Embedded v.1 agent	<i>Command line interface:</i> Via USB, RS232 or IP address
<i>Key parameters monitored:</i>	Receive signal strength; Power supply currents & voltages; Laser currents, power levels & temperatures; Internal temperature; Clock recovery / sync status; Network interface signal status	
<i>Historical logging:</i>	Internal data and event logging	
Certifications & Classifications	International	US/Canada
<i>Laser safety</i>	IEC 60825-1, Class 1M EN 55022 - emissions	CDRH 21 CFR including Laser Notice 50, Class 1M; ANSI Z136.1 & Z136.6, Class 1
<i>EMC</i>	EN 55024 - immunity	FCC - Pat 15 / ICES - 003
<i>Electrical</i>	EN 60950 (CB scheme)	UL 60950 / CSA 60950

Printed specifications subject to change. Please refer to www.fsona.com for current information

¹100 - 1500 Mbps
²622 - 2500 Mbps
95-0296-F

8.2. Especificações dos fotodetectores SFH213 FA

Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit Silicon PIN Photodiode with Very Short Switching Time Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant

SFH 213
SFH 213 FA



SFH 213



SFH 213 FA

Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 400 nm bis 1100 nm (SFH 213) und bei 880 nm (SFH 213 FA)
- Kurze Schaltzeit (typ. 5 ns)
- 5 mm-Plastikbauform im LED-Gehäuse
- Auch gegurtet lieferbar

Anwendungen

- Industrieelektronik
- „Messen/Steuern/Regeln“
- Schnelle Lichtschranken für Gleich- und Wechsellichtbetrieb
- LWL

Features

- Especially suitable for applications from 400 nm to 1100 nm (SFH 213) and of 880 nm (SFH 213 FA)
- Short switching time (typ. 5 ns)
- 5 mm LED plastic package
- Also available on tape and reel

Applications

- Industrial electronics
- For control and drive circuits
- Photointerrupters
- Fiber optic transmission systems

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code
SFH 213	Q62702P0930
SFH 213 FA	Q62702P1671

SFH 213, SFH 213 FA

Grenzwerte
Maximum Ratings

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 100	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	50	V
Verlustleistung Total power dissipation	P_{tot}	150	mW

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$)
Characteristics

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 213	SFH 213 FA	
Fotostrom Photocurrent $V_R = 5\text{ V}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856\text{ K}$, $E_V = 1000\text{ lx}$ $V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 870\text{ nm}$, $E_e = 1\text{ mW/cm}^2$	I_P	135 (≥ 100)	–	μA
	I_P	–	90 (≥ 65)	μA
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\text{ max}}$	850	900	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{max}	λ	400 ... 1100	750 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	1	1	mm^2
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	1×1	1×1	$\text{mm} \times \text{mm}$
Halbwinkel Half angle	φ	± 10	± 10	Grad deg.
Dunkelstrom, $V_R = 20\text{ V}$ Dark current	I_R	$1 (\leq 5)$	$1 (\leq 5)$	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 870\text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.62	0.59	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 870\text{ nm}$ Quantum yield	η	0.89	0.86	Electrons Photon

2007-04-02

2

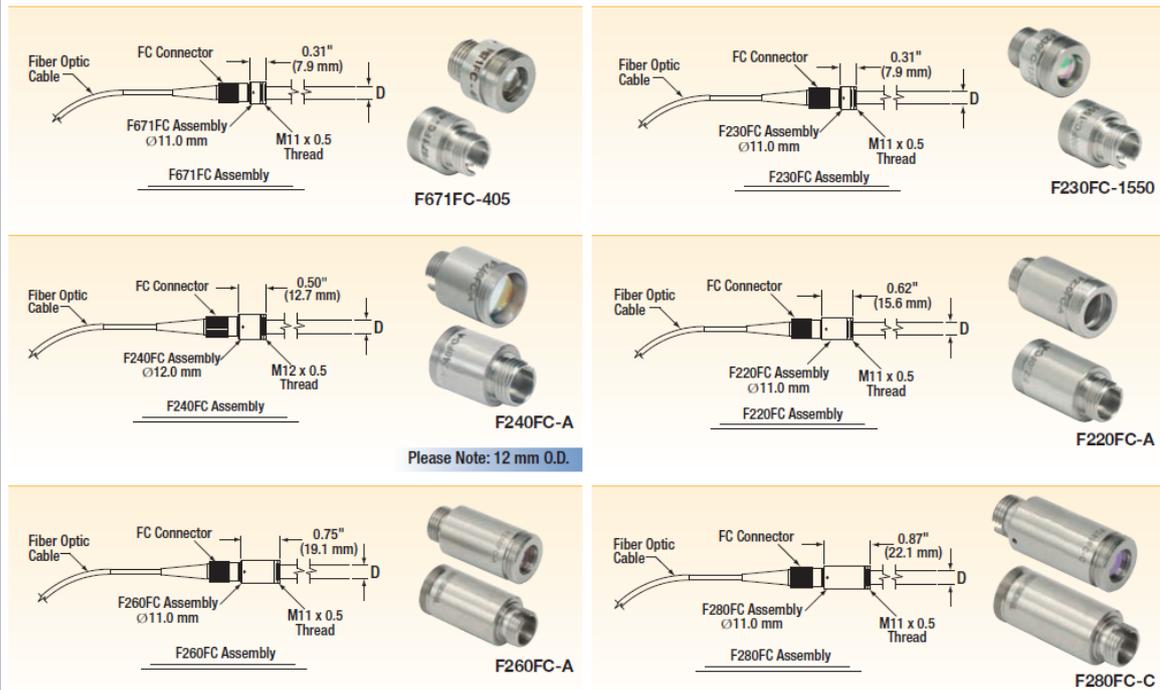
8.3. Especificações do Colimador F 280 FC-B

FC/PC Fixed Aspheric Lens Fiber Collimation Packages

Thorlabs' Fixed Fiber Collimation Packages are designed to collimate a laser beam propagating out of an optical fiber. Each collimation package is factory aligned so that the lens and the output end of the fiber are separated by the wavelength-corrected focal length of the lens. These packages can also be used to couple a free-space laser beam into optical fiber provided that the collimation package is correctly aligned with respect to the input beam.

- Fiber Collimation
- Popular FC/PC Connectors, 2.1 mm Wide Key
- Free-Space Laser to Fiber Coupling
- Collect Light for Fiber Coupled Detection Systems

NEW
versions



Please refer to our website for complete models and drawings.

FC/PC Connectorized Collimation Packages

ITEM #	\$	£	€	RMB	ALIGN λ	D ^a	Θ ^b	NA _{LENS}	f ^c
F671FC-405	\$ 163.43	£ 117.67	€ 142.18	¥ 1,302.54	405 nm	0.7 mm	0.041°	0.60	4.02 mm
F230FC-A	\$ 137.00	£ 98.64	€ 119.19	¥ 1,091.89	543 nm	0.8 mm	0.049°	0.57	4.34 mm
F230FC-B	\$ 137.00	£ 98.64	€ 119.19	¥ 1,091.89	633 nm	0.8 mm	0.056°	0.56	4.43 mm
F230FC-C	\$ 137.00	£ 98.64	€ 119.19	¥ 1,091.89	1310 nm	0.8 mm	0.114°	0.53	4.64 mm
F230FC-1550	\$ 137.00	£ 98.64	€ 119.19	¥ 1,091.89	1550 nm	0.9 mm	0.128°	0.53	4.67 mm
F240FC-A	\$ 146.30	£ 105.34	€ 127.28	¥ 1,166.01	543 nm	1.5 mm	0.027°	0.51	7.86 mm
F240FC-B	\$ 146.30	£ 105.34	€ 127.28	¥ 1,166.01	633 nm	1.5 mm	0.031°	0.50	7.93 mm
F240FC-780	\$ 146.30	£ 105.34	€ 127.28	¥ 1,166.01	780 nm	1.5 mm	0.032°	0.50	8.00 mm
F240FC-C	\$ 146.30	£ 105.34	€ 127.28	¥ 1,166.01	1310 nm	1.5 mm	0.065°	0.49	8.13 mm
F240FC-1550	\$ 146.30	£ 105.34	€ 127.28	¥ 1,166.01	1550 nm	1.6 mm	0.073°	0.49	8.18 mm
F220FC-A	\$ 127.70	£ 91.94	€ 111.10	¥ 1,017.77	543 nm	2.0 mm	0.020°	0.25	10.90 mm
F220FC-B	\$ 127.70	£ 91.94	€ 111.10	¥ 1,017.77	633 nm	2.1 mm	0.022°	0.25	10.99 mm
F220FC-780	\$ 127.70	£ 91.94	€ 111.10	¥ 1,017.77	780 nm	2.3 mm	0.030°	0.25	11.07 mm
F220FC-1064	\$ 127.70	£ 91.94	€ 111.10	¥ 1,017.77	1064 nm	2.4 mm	0.032°	0.25	11.17 mm
F220FC-C	\$ 127.70	£ 91.94	€ 111.10	¥ 1,017.77	1310 nm	2.0 mm	0.047°	0.24	11.23 mm
F220FC-1550	\$ 127.70	£ 91.94	€ 111.10	¥ 1,017.77	1550 nm	2.1 mm	0.053°	0.24	11.29 mm
F260FC-A	\$ 136.00	£ 97.92	€ 118.32	¥ 1,083.92	543 nm	2.8 mm	0.014°	0.17	15.01 mm
F260FC-B	\$ 136.00	£ 97.92	€ 118.32	¥ 1,083.92	633 nm	2.8 mm	0.016°	0.16	15.15 mm
F260FC-C	\$ 136.00	£ 97.92	€ 118.32	¥ 1,083.92	1310 nm	2.8 mm	0.034°	0.16	15.52 mm
F260FC-1550	\$ 136.00	£ 97.92	€ 118.32	¥ 1,083.92	1550 nm	3.0 mm	0.038°	0.16	15.58 mm
F280FC-A	\$ 135.00	£ 97.20	€ 117.45	¥ 1,075.95	543 nm	3.3 mm	0.012°	0.15	18.07 mm
F280FC-B	\$ 135.00	£ 97.20	€ 117.45	¥ 1,075.95	633 nm	3.4 mm	0.014°	0.15	18.24 mm
F280FC-C	\$ 135.00	£ 97.20	€ 117.45	¥ 1,075.95	1310 nm	3.4 mm	0.028°	0.15	18.67 mm
F280FC-1550	\$ 135.00	£ 97.20	€ 117.45	¥ 1,075.95	1550 nm	3.6 mm	0.032°	0.15	18.75 mm

*Fiber not included with collimation package

Mechanical
Drawings Available on the
WEB



^aMeasured 1/e² diameter at 1 focal length from lens at the alignment wavelength using the alignment fiber type

^bCalculated full angle of divergence

^cEffective focal length of the aspheric lens at the alignment wavelength

8.4. Especificações do Expansor de Feixe (*Beam Expander*)

Variable Beam Expander

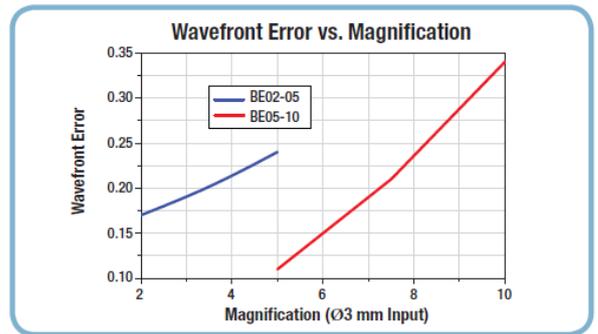
Specifications

- 20-10 Scratch-Dig
- $< \lambda/4$ Wavefront Error
- $R_{avg} < 0.5\%$ over Wavelength Range
- 100 W/cm² CW Damage Threshold

Thorlabs' BE series of variable Galilean beam expanders offer either 2X to 5X or 5X to 10X beam expansion. These lens-based expanders have antireflection-coated optics for maximum beam transmission and minimal back reflection over their respective wavelength range. Three coating ranges are available that cover 400 – 650 nm, 650 – 1050 nm, or 1050 – 1620 nm.

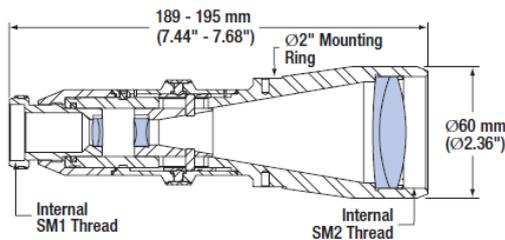
Each beam expander has a rotating zoom mechanism, which can be locked with a setscrew once the desired beam expansion is achieved. Lens-based beam expanders are well-suited for expanding or reducing the diameter of a collimated monochromatic beam. These expanders are suitable for a broad wavelength range and thus offer adjustable focus to compensate for the wavelength of light you are expanding or reducing.

For ease of integration into your setup, these beam expanders utilize our SM threading, which allows many components such as lens tubes (see page XXX) and mounted optics to be



attached without additional hardware. The BE02-05 series has an internally SM1-threaded input aperture and external SM2 threading on the output aperture. Our new BE05-10 series has SM2 threads on both the input and output as well as SM05 threading at the input aperture.

Mounting is possible on the BE02-05 via 8-32 and M4 x 0.7 taps. Its body has a 2" outside diameter for mounting in a kinematic mount such as the KS2 (see page XXX). The BE05-10 has a 1/4"-20 and an M6 x 1.0 tap for post mounting, while also featuring a base that can be clamped to a table using CL6 Mounting Clamps (see page XXX).



BE02-05



BE02-05

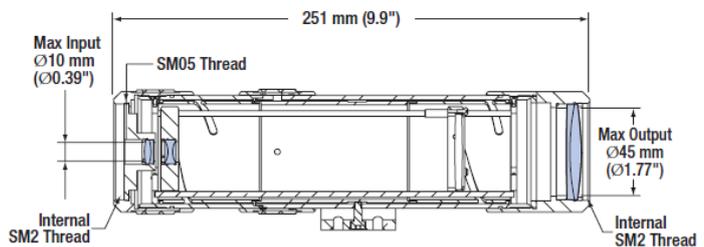
2X - 5X Beam Expanders

ITEM #	\$	£	€	RMB	WAVELENGTH RANGE	MAX 1/e ² BEAM DIAMETER*	INPUT APERTURE
BE02-05-A	\$ 1,155.00	£ 831.60	€ 1,004.85	¥ 9,205.35	400 – 650 nm	4.0 mm	Ø8.0 mm
BE02-05-B	\$ 1,155.00	£ 831.60	€ 1,004.85	¥ 9,205.35	650 – 1050 nm	4.0 mm	Ø8.0 mm
BE02-05-C	\$ 1,320.00	£ 950.40	€ 1,148.40	¥ 10,520.40	1050 – 1620 nm	4.0 mm	Ø8.0 mm

*For Diffraction-Limited Performance



BE05-10



BE05-10

Please refer to our website for complete models and drawings.

5X - 10X Beam Expanders

ITEM #	\$	£	€	RMB	WAVELENGTH RANGE	MAX 1/e ² BEAM DIAMETER*	INPUT APERTURE
BE05-10-A	\$ 1,895.00	£ 1,364.40	€ 1,648.65	¥ 15,103.15	400 – 650 nm	2.3 mm	Ø10.0 mm
BE05-10-B	\$ 1,895.00	£ 1,364.40	€ 1,648.65	¥ 15,103.15	650 – 1050 nm	2.3 mm	Ø10.0 mm
BE05-10-C	\$ 1,895.00	£ 1,364.40	€ 1,648.65	¥ 15,103.15	1050 – 1620 nm	2.3 mm	Ø10.0 mm

*For Diffraction-Limited Performance