

## 5 Desenvolvimento do Experimento

### 5.1. Introdução

Conforme visto no capítulo 4, eq. (4.94), o efeito da cintilação depende principalmente da quantidade de energia da turbulência ( $C_n^2$ ), da distância do enlace ( $R$ ), do número de onda ( $k$ ), da forma da frente de onda (plana, esférica, ou feixe Gaussiano), e do ganho do receptor ( $G$ ). Em aplicações críticas, envolvendo enlace laser com transmissão digital, onde se opera próximo do limiar de detecção do receptor, a cintilação pode ceifar um grupo de bits em seqüência, corrompendo a informação transmitida, muitas vezes de forma irreversível. Portanto, a redução do efeito de cintilação em um enlace laser é algo que merece ser investigado.

Observa-se a partir da teoria e dos experimentos anteriores que a cintilação, no regime de espalhamento fraco, reduz com o aumento da área do receptor e com o aumento do comprimento de onda. Até a presente data, os experimentos realizados contemplaram os efeitos de média por abertura [41, 42] e de dependência da cintilação com o comprimento de onda [43] de forma independente.

Na presente tese um experimento prático foi realizado utilizando-se enlaces ópticos para se obter a variação da cintilação em função do comprimento de onda e da abertura do receptor, em condições de turbulência atmosférica semelhantes. A avaliação experimental dos efeitos da cintilação em enlaces ópticos foi realizada visando determinar os aspectos da geometria da construção que contribuíssem para um aumento ou redução dos níveis de cintilação. Discrepâncias em relação à previsão teórica foram investigadas, e o resultado obtido atesta um aumento da cintilação experimentada pelo enlace FSO, causada pelo “speckle pattern” gerado pela fibra multimodo de alimentação dos transmissores.

A metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho é semelhante às descritas nos experimentos anteriores [41-43], adaptadas ao material disponível.

## 5.2. Montagem Experimental no Sumaré

Dados preliminares de cintilação foram obtidos durante as campanhas de medição da atenuação causada por nevoeiro [6], e apresentadas no trabalho [44]. Nessa montagem os três comprimentos de onda foram adquiridos simultaneamente, durante 5s, a uma taxa de 500 amostras por segundo, formando um conjunto de 2500 amostras por canal, com digitalização do sinal em 8 bits de profundidade. O processo de aquisição foi repetido dez vezes totalizando 50 s e 12.500 amostras por canal. Os enlaces foram instalados no Sumaré, que se situa no alto de um morro de 800 m, no Rio de Janeiro. O comprimento dos enlaces era de 75 m, e os dados foram colhidos com velocidade média do vento sempre menor do que 1 m/s e em condição de visibilidade máxima ( $> 10$  km). Os transmissores e receptores foram empregados com suas máximas aberturas, e os feixes de lasers foram colimados de modo a cobrir exatamente a lente dos receptores. Os receptores foram ajustados para obter máxima potência de sinal óptico. A figura 35 ilustra os sinais recebidos pelos três enlaces.

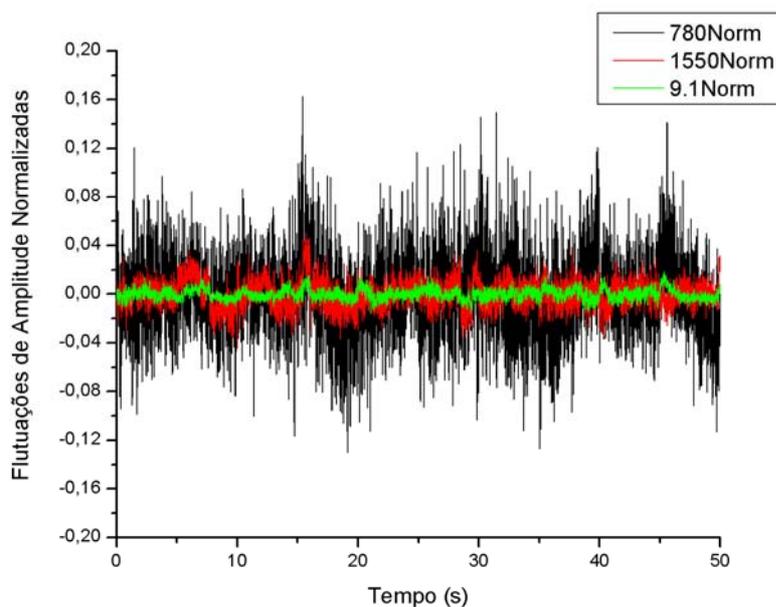


Figura 35 – Flutuação da intensidade do sinal normalizada e filtrada nos enlaces de 780 nm, 1550 nm, e 9,1  $\mu\text{m}$  (Montagem experimental do Sumaré).

O Sumaré é uma região que concentra um grande campo de antenas transmissoras de TV, e a interferência eletromagnética é muito forte, mesmo utilizando-se a blindagem de circuitos, cabos e conectores. Os sinais apresentados na figura 35 foram filtrados por um filtro passa-baixa com frequência de corte em 55 Hz. Essa escolha foi feita baseada na análise do espectro do sinal do enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ , que apresentava menor nível de ruído, e indicava que a energia da turbulência estava abaixo de 25 Hz. Logo o corte em 55 Hz ainda preservava a maior parte da energia do espectro das cintilações, mesmo para os outros comprimentos de onda.

Pela teoria de espalhamento fraco, e conforme mostrado na figura 28 do capítulo 4, a variância normalizada do logaritmo das flutuações de amplitude do feixe Gaussiano é semelhante à apresentada pela onda plana, quando o feixe está colimado, e sua abertura é muito maior do que o comprimento de Fresnel. Adotando o comprimento de onda 9,1  $\mu\text{m}$  como referência, usando as eq. (4.57) e (4.94), e o valor de abertura desse receptor constante da tabela 8, foi obtido uma estimativa para a função estrutura da constante do índice de refração da turbulência igual a  $C_n^2 = 1,304 \cdot 10^{-14} (\text{m}^{-2/3})$  (verão 14:00h). A partir desse ponto, os valores teóricos do índice de cintilação para os outros comprimentos de onda puderam ser estimados. Os índices de cintilação estimados e medidos foram calculados conforme a eq. (4.57) e são apresentados na tabela 6.

	<b>780 nm</b>	<b>1550 nm</b>	<b>9,1 <math>\mu\text{m}</math></b>
$I_{C\_Teórico}$	$1,35901 \cdot 10^{-5}$	$1,35469 \cdot 10^{-5}$	$1,43837 \cdot 10^{-5}$
$I_{C\_Medido}$	$7,79924 \cdot 10^{-5}$	$9,04684 \cdot 10^{-5}$	<b><math>1,43837 \cdot 10^{-5}</math></b>

Tabela 6 – Índice de cintilação teórico e medido tomando o enlace de 9,1  $\mu\text{m}$  como referência para obtenção da constante de estrutura do índice de refração (Sumaré).

Os valores de cintilação medidos para 780 nm e 1550 nm são respectivamente 57,4 vezes e 6,7 vezes piores dos que os estimados teoricamente. Um gráfico com os histogramas das flutuações dos sinais dos lasers é apresentado na figura 36 e reflete os números da tabela 6.

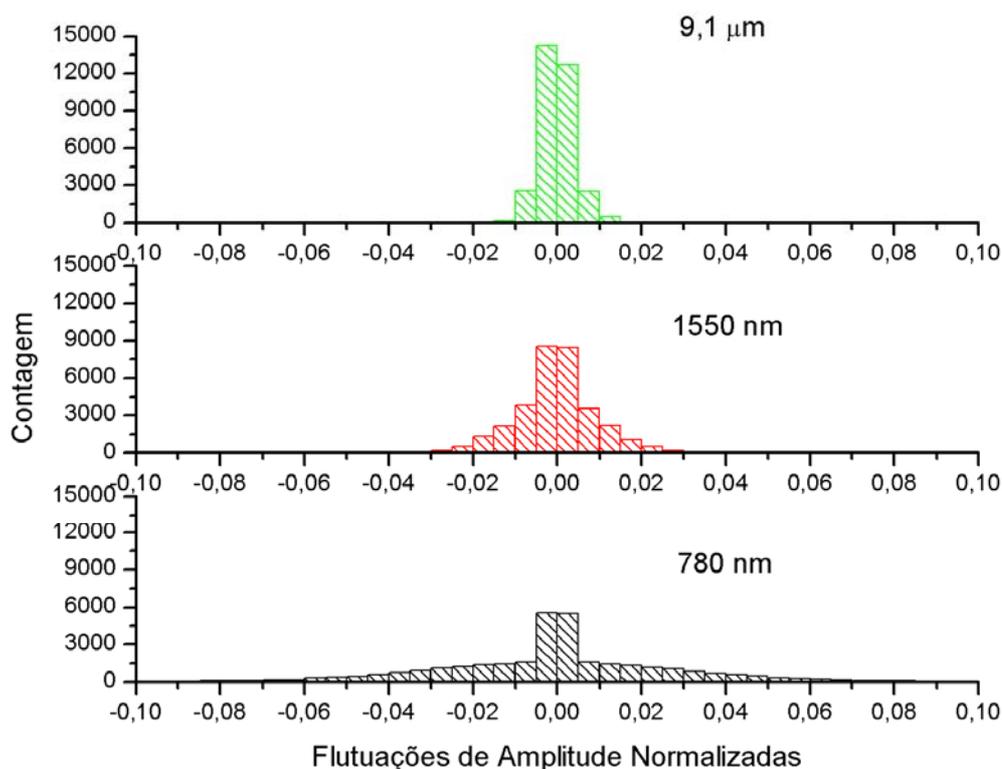


Figura 36 – Histograma das flutuações de amplitude normalizadas dos enlaces de 780 nm, 1550 nm, e 9,1 μm (Montagem experimental do Sumaré).

Partindo-se dos índices de cintilação medidos, apresentados na tabela 6, e utilizando-se as eq. (4.57) e (4.94) foram obtidos os diâmetros efetivos dos receptores de 780 nm e 1550 nm, que são apresentados na tabela 7.

	<b>780 nm</b>	<b>1550 nm</b>
Diâmetro real	75,9 mm	75,9 mm
Diâmetro efetivo	12,2 mm	32,5 mm

Tabela 7 – Diâmetro real e efetivo dos receptores de 780 nm e 1550 nm na montagem do Sumaré.

As hipóteses que foram cogitadas à época para justificar a discrepância das medidas em relação à teoria foram: ruído elétrico induzido nos cabos e circuitos; e desalinhamento dos feixes. A primeira se justificava em função do experimento

encontrar-se num ambiente hostil em termos de interferência eletromagnética. A região do Sumaré, no Rio de Janeiro, concentra um grande número de antenas de difusão de “Broad Casting” em AM, FM, e TV. As potências envolvidas são da ordem de centenas de kW, o espectro eletromagnético é ocupado de médias frequências até UHF, e são empregados diversos tipos de modulação. A eletrônica usada na recuperação do sinal era rudimentar, e contava apenas com um detector de envoltória, favorecendo a integração de diversos sinais que por ventura fossem induzidos nos cabos. A análise do espectro dos sinais do enlace mostrava que havia ruído induzido. Entretanto, os cabos possuíam blindagem, e os níveis de cintilação supostamente apontados como ruído, eram inversamente proporcionais aos comprimentos dos cabos. Se considerarmos que o espectro é regularmente ocupado, e que as potências são equivalentes por frequência, o maior cabo deveria coletar mais energia, pois serviria como antena para os diversos múltiplos de comprimentos de onda. As soluções propostas para os problemas de possível interferência foram: aprimorar a eletrônica de demodulação nos comprimentos de onda de 780 nm e 1550 nm, e realizar o experimento em um outro local.

A segunda hipótese foi testada repetindo-se o experimento, com uma rigorosa conferência do alinhamento no início, e ao final da aquisição. Não foi observada alteração de alinhamento ao longo das aquisições, e os mesmos resultados foram obtidos.

### **5.3. Montagem Experimental na PUC-Rio**

Neste trabalho três enlaces FSO foram comparados de forma direta quanto aos seus desempenhos em relação à cintilação. Os três enlaces ópticos, com projeto e geometria muito semelhantes, e que operam em 780 nm, 1550 nm, e 9,1  $\mu\text{m}$ , foram dispostos paralelos e lado a lado. Eles estão separados por uma distância aproximada de 30 cm. A figura 37 apresenta um diagrama esquemático da montagem.

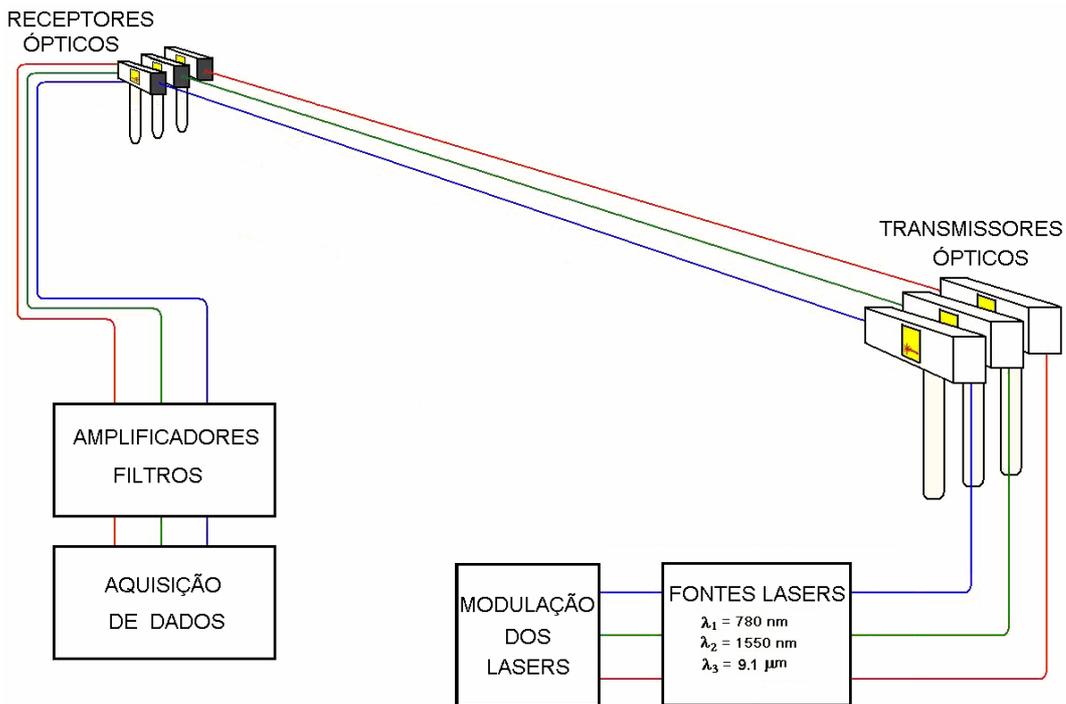


Figura 37 – Diagrama Esquemático da Montagem Experimental.

Os enlaces foram instalados no topo dos edifícios Kennedy e Leme na PUC-Rio, como mostrado nas figuras 38, 39 e 40, a uma altura média de 20 m.

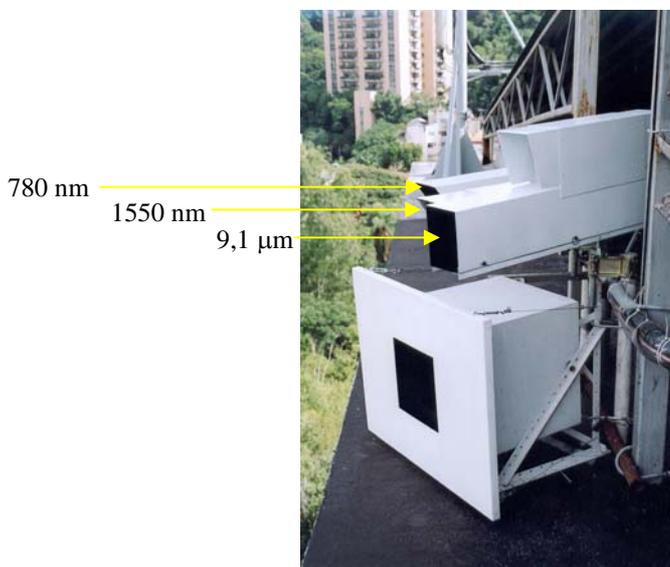


Figura 38 – Vista lateral dos transmissores instalados no topo do prédio Kennedy.



Figura 39 – Vista da parte traseira dos transmissores instalados no topo do prédio Kennedy.

A foto da figura 40 mostra os receptores instalados no topo do prédio Leme.

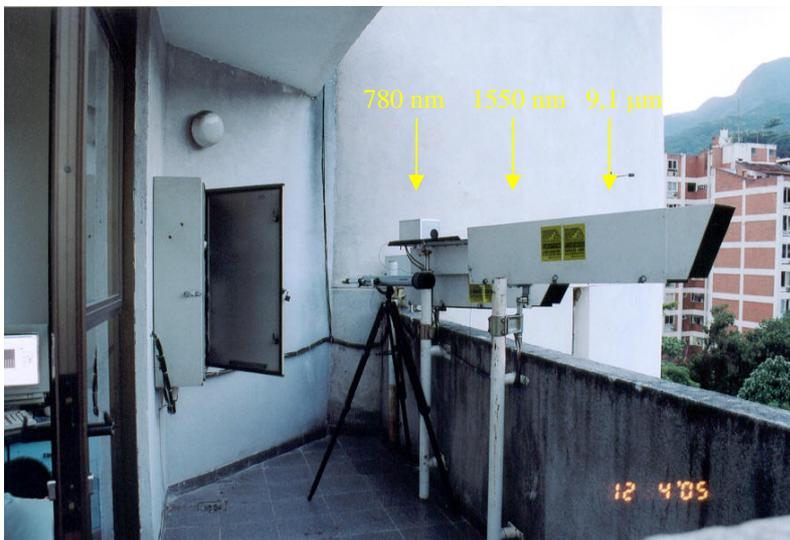


Figura 40 – Vista lateral dos receptores instalados no prédio Leme.

Uma distância curta de 153 m foi escolhida para assegurar a condição de espalhamento fraco  $\langle \chi^2 \rangle < 1$ .

### 5.3.1. Ajuste dos Transmissores

Os feixes foram ajustados de forma levemente divergente, com aproximadamente 260 mm de diâmetro, para evitar que um transmissor iluminasse os outros receptores, e para manter uma margem de potência elevada. Como não é possível observar os feixes lasers infravermelhos a olho nu, um dispositivo de medidas, mostrado na figura 41, foi construído para permitir a avaliação do feixe.



Figura 41 – Dispositivo de avaliação do perfil de intensidade do feixe.

Um RF “Slotted Line Type 874 – LBB”, da General Radio Company, graduado em mm, foi adaptado para receber um fotodetector da New Focus acoplado a um pequeno canhão com abertura de 25 mm. Com esse aparato foi possível avaliar a intensidade do feixe em campo distante para os enlaces de 780 nm e 1550 nm, e ainda realizar o ajuste de abertura dos transmissores. Uma medida do perfil a 153 m de distância, na posição dos receptores, é apresentada na figura 42.

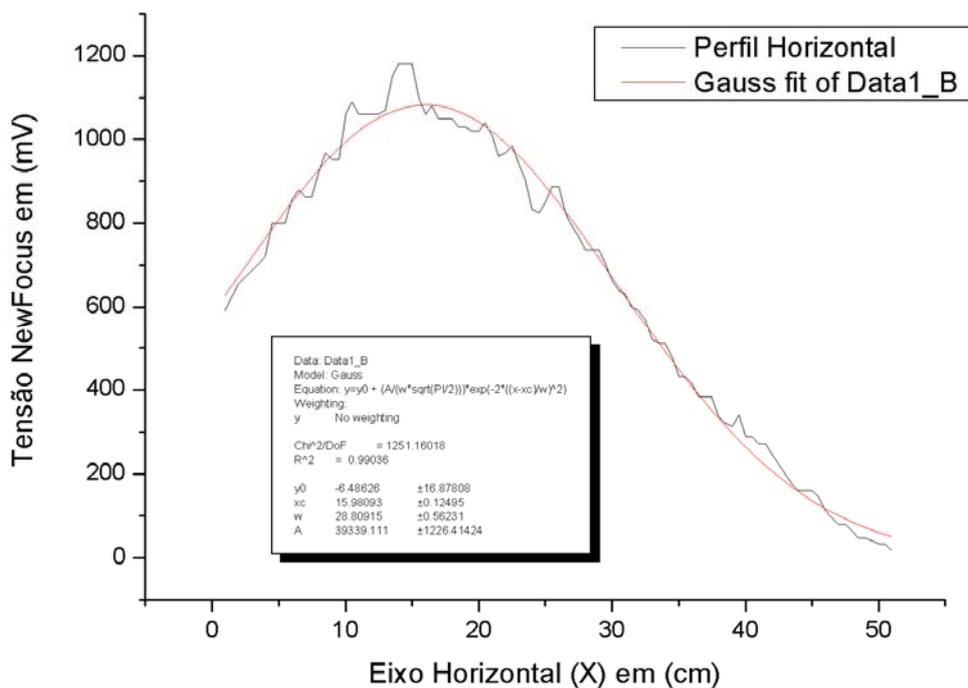


Figura 42 – Avaliação do perfil do feixe de 1550 nm na posição do receptor antes do ajuste de abertura.

Pode-se observar pelo ajuste em vermelho “fit” da figura 42, que o perfil do feixe é aproximadamente Gaussiano, entretanto a curva original não é suave e apresenta variações de intensidade. Essas variações de intensidade, em relação a sua distribuição espacial no eixo  $x$ , são da ordem de grandeza do diâmetro dos receptores.

O ajuste da abertura dos transmissores foi realizado no terraço do edifício Kennedy da PUC-Rio, em um lance de 50 m de comprimento, conforme o desenho esquemático da figura 43.

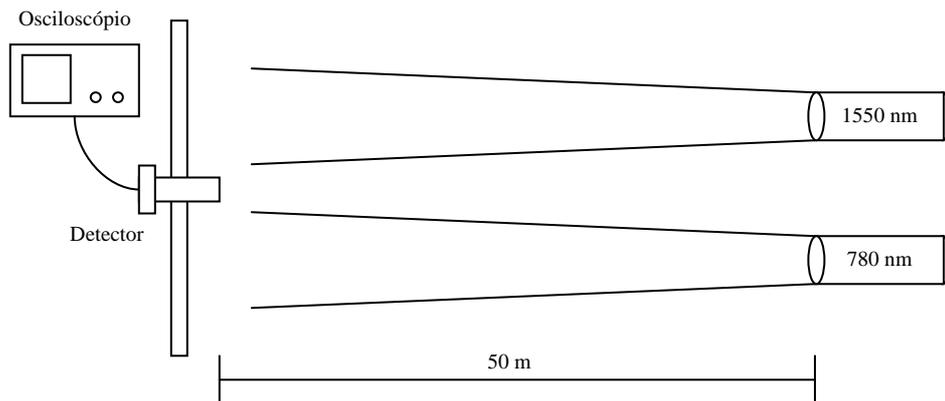


Figura 43 – Ajuste dos transmissores.

A 50 m de distância os diâmetros dos feixes foram ajustados para 85 mm, resultando em 260 mm a 153 m. Durante o ajuste dos feixes foi observado o efeito de desfocalização térmica “Thermal Blooming”, descrito na seção 2.4 do capítulo 2, e apresentado na figura 44.

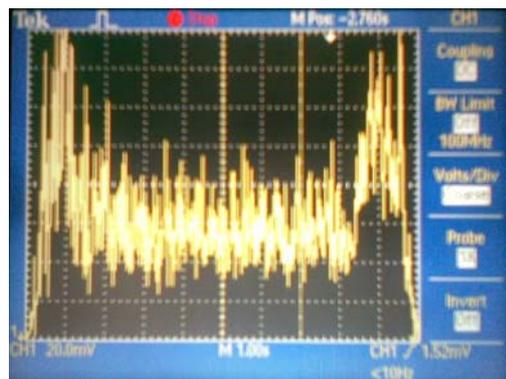


Figura 44 – Efeito de desfocalização térmica.

Esse efeito provavelmente foi ocasionado pelo fato do terraço do prédio Kennedy possuir um corredor com 2 m de largura sem ventilação na sua parte inferior, onde estava o enlace de ajuste dos transmissores.

Considerando que havia pouca margem de potência no enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ , e que não dispúnhamos de um detector nesse comprimento de onda com alto ganho como o New Focus, o transmissor de 9,1  $\mu\text{m}$  foi ajustado pela queda na potência óptica. Inicialmente o feixe foi colimado até estar totalmente contido na lente do receptor, resultando na máxima potência disponível. Supondo plana a intensidade do feixe, o que foi confirmado mais tarde, atuou-se no micrômetro de ajuste da distância da lente, até que a potência caísse 20%, correspondendo a um feixe com

diâmetro de 80 mm no plano do receptor. Portanto pode-se considerar que o enlace de  $9,1 \mu\text{m}$  permaneceu aproximadamente colimado.

### 5.3.2. Ajuste dos Receptores

Durante o desenvolvimento do trabalho foi observado que o receptor de 1550 nm não atingia sua abertura máxima, isto é, sua janela de recepção possuía fisicamente 75,9 mm de diâmetro, entretanto os níveis de cintilação medidos eram superiores ao esperado para este diâmetro. Discos redutores de diâmetros construídos com a finalidade de alterar a abertura dos receptores corroboraram essa observação. Ao se colocar o 1º anel redutor, com diâmetro de 68 mm, não era notada queda na potência recebida.

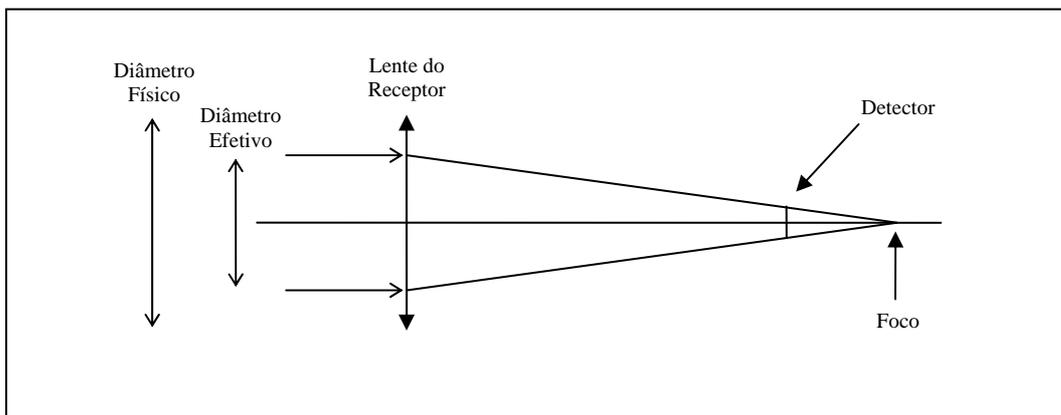


Figura 45 – Diagrama do receptor com diâmetro efetivo menor do que o real.

A figura 45 apresenta um diagrama esquemático ilustrando o problema encontrado no receptor de 1550 nm. Como a regulagem de posição do detector não possuía curso para atingir o foco, parte da energia luminosa que chegava à lente era perdida, resultando em um diâmetro efetivo menor que o diâmetro da lente. Os raios luminosos mais extremos em relação ao eixo óptico não atingem o detector, pelo fato do mesmo estar adiantado em relação ao foco.

Uma rotina em MatLab foi desenvolvida para simular a geometria do enlace laser para as várias posições de afastamento das lentes do transmissor e do receptor, em relação à fonte e ao detector respectivamente, com base no equacionamento da página 2.6-2.7 da referência [18]:

$$\frac{1}{s + z_R^2/(s-f)} + \frac{1}{s''} = \frac{1}{f} \quad (5.1)$$

$$w_o'' = \frac{w_o}{\sqrt{(1-s/f)^2 + (z_R/f)^2}} \quad (5.2)$$

onde  $s$  é a distância do objeto,  $s''$  é a distância da imagem,  $f$  é o comprimento focal da lente,  $z_R$  é o comprimento de *Rayleigh* do feixe de entrada,  $w_o$  é a cintura do feixe de entrada e  $w_o''$  é a cintura do feixe de saída. Este equacionamento leva em consideração o fato do feixe de laser ter um perfil Gaussiano.

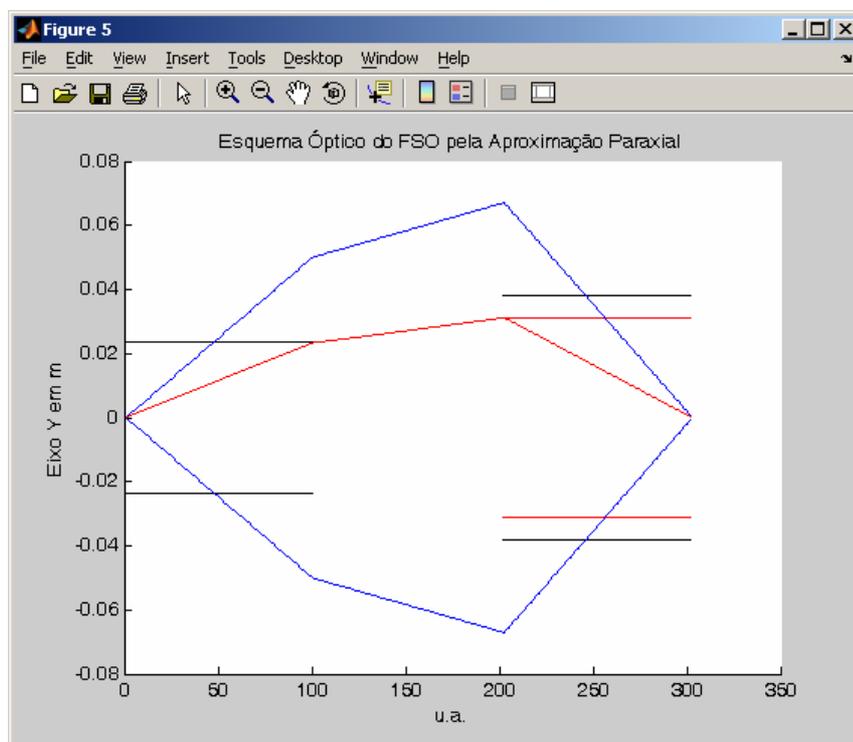


Figura 46 – Esquema óptico do enlace FSO aplicando-se a aproximação paraxial.

A figura 46 apresenta um diagrama esquemático da simulação da geometria do enlace FSO, com uma vista em corte. Os traços horizontais na cor preta representam o transmissor (direita) e o receptor (esquerda). O comprimento focal e o raio da lente do transmissor são respectivamente 250 mm e 40 mm, o que corresponde a uma abertura numérica de 0,16. Entretanto, a fibra óptica que alimenta o transmissor possui abertura numérica igual a 0,2, logo ocorre truncamento do feixe na saída com perda de potência de 4,5 dB. Os traços horizontais em vermelho, na direita, representam o diâmetro efetivo do receptor

considerando que o detector esteja adiantado 3mm em relação à posição do foco, o que gera uma perda de 4,6 dB.

Posições objeto e imagem em m				
s11	s12	s21	s22	s22d
0.250	-458.983	611.983	0.150	0.147

Cinturas do feixe em m			Razão de potência p/ 50mm
w01	w02	w03	razão Pd50/Pd
2.450e-006	4.519e-003	1.105e-006	0.724

Comprimentos de Rayleigh em m			Razão de potência p/ 50mm
zr1	zr2	zr3	razão 300mV/400mV
1.217e-005	4.139e+001	2.476e-006	0.750

Cinturas nos planos das lentes em m			
w1t	RFt	w1r	RFr
0.050318	0.0234	0.066972	0.031145

Potências em dBm				
fibra (Po)	transmitida (Pt)	recebida (Pr)	detector (Pd)	reductor (Pd50)
3.0001	-1.5452	-1.5452	-6.1913	-7.5918

Figura 47 – Resumo dos resultados obtidos com a simulação da geometria do feixe.

A figura 47 apresenta o resumo dos principais parâmetros da geometria do feixe obtidos com o programa de simulação.

Durante as medidas de cintilação foi observado que a redução física do diâmetro do receptor de 75,9 mm para 50 mm acarretava uma redução do nível de tensão do sinal recebido de 400 mV para 300 mV, isto é, uma redução menor do que a esperada (232 mV). Na figura 47 é possível observar que quando o detector está na posição 147 mm ( $s22d = 0,147$  m), ou seja, adiantado 3 mm em relação ao foco, a redução de potência com a colocação de um anel redutor de 50 mm de diâmetro provoca uma perda aproximada de 27,6 % ("Razão de potência p/ 50 mm").

Com as simulações realizadas concluiu-se que havia erro de execução no projeto mecânico do receptor de 1550 nm. O detector não atingia a distância focal da lente para o comprimento de onda de 1550 nm no final da excursão do ajuste. O mesmo foi desmontado e corrigido.

A partir desse ponto os dois receptores (780 nm e 1550 nm) foram levados ao laboratório, colocados em frente a um feixe colimado, alinhados, e ajustados

para terem a mesma queda de 50% de potência óptica quando se reduzia o diâmetro do máximo 75,9 mm para 50 mm. Com isso garantiu-se que os receptores atingiam a abertura máxima e possuíam o mesmo campo de visão.

O receptor de 9,1  $\mu\text{m}$  foi ajustado diretamente no enlace de 153 m para a obtenção da potência máxima. Discos redutores foram utilizados para certificar que o mesmo também atingia máximo diâmetro.

### 5.3.3.

#### **Fixação mecânica dos transmissores e receptores**

Variações no alinhamento do enlace laser causadas por vibração mecânica induzem variações na intensidade do sinal. Algumas medidas para redução da interferência de origem mecânica no enlace foram tomadas conforme descrito em [3].

Entretanto, as primeiras medições de cintilação revelaram a existência de uma correspondência entre a intensidade do vento e a amplitude do sinal adquirido.

Segundo Tatarskii [27], a distribuição espectral da energia da turbulência é função da velocidade média do vento. Quanto maior a velocidade média do vento maior a frequência máxima do espectro da cintilação. Durante o desenvolvimento do trabalho foi observado que quando ocorria à incidência de vento, aumentava a amplitude das baixas frequências do espectro. Oscilação em baixa frequência é uma característica típica de vibração das estruturas mecânicas. Foi observado, ainda, que as coberturas de proteção dos canhões transmissores e receptores apresentavam uma grande resistência aerodinâmica, e que havia um acoplamento mecânico das estruturas de fixação e proteção. Ficou estabelecido que as medidas de cintilação fossem realizadas sem as coberturas de proteção, uma vez que os canhões possuíam um perfil aerodinâmico (geometria cilíndrica) e menor área de seção reta. A figura 48 apresenta o transmissor de 1550 nm sem a cobertura de proteção.



Figura 48 – Canhão de 1550 nm sem a cobertura de proteção.

O procedimento adotado reduziu consideravelmente a interferência do vento no alinhamento do enlace, entretanto não foi suficiente para extingui-la por completo. Inicialmente a fixação dos transmissores havia sido feita em uma estrutura metálica já existente que servia de suporte ao telhado do edifício Kennedy. Em função da suspeita ser essa estrutura a responsável pela introdução de vibração mecânica no enlace, optou-se por construir uma base de concreto com 1 m de frente, 1 m de lado e 30 cm de altura, onde foram inseridos 4 parafusos de fixação com 2,5 cm de diâmetro para permitir o encaixe de uma estrutura metálica de suporte dos transmissores, conforme a figura 49.

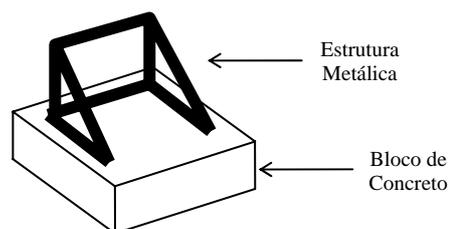


Figura 49 – Estrutura de fixação dos transmissores.

A adoção dessa nova estrutura de fixação dos transmissores resolveu o problema de acoplamento das vibrações mecânicas. Os receptores foram fixados diretamente em uma parede de proteção do edifício Leme, conforme pode ser visto na figura 40, e não apresentaram problemas de vibração. No caso dos receptores as coberturas de proteção dos canhões também foram retiradas para reduzir o arraste.

#### **5.3.4. Lasers, Detectores e Eletrônica**

As medidas foram realizadas sempre em condições de baixa velocidade do vento, menor do que 5 m/s, e com as carenagens de proteção removidas, para evitar que os transmissores e receptores sofressem interferência mecânica causada pelas forças de arrasto aerodinâmico.

Lasers comerciais empregados em comunicações à fibra foram utilizados nos comprimentos de onda de 780 nm e 1550 nm, podendo atingir até 0 dBm de potência média (1 mW). Um laser quântico em cascata [45] da empresa Alpes Laser, refrigerado à “Peltier”, e com capacidade de fornecer até 2 W de potência média, foi empregado no enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ . Esse laser inicialmente era refrigerado à água gelada, e foi modificado para trabalhar com um “cooler” a ar.

O detector de Germânio GM5HS foi utilizado no receptor de 780 nm, e o detector de InGaAs GAP1000 no receptor de 1550 nm, ambos fabricados pela empresa Metrotek. No enlace de 9,1  $\mu\text{m}$  foi utilizado o detector de poço quântico (QWIP) fotovoltaico quaternário de HgCdZnTe da empresa Vigo Systems. Todos os três detectores empregados nos enlaces possuem 1 mm<sup>2</sup> de área efetiva, para permitir que os receptores tenham o mesmo campo de visão (“Field Of View” - FOV).

Considerando que o Sol possui aproximadamente 50% da sua intensidade máxima por volta de 1.000 nm, e que ao longo das medições podem ocorrer variações na iluminação de fundo decorrente da passagem de nuvens, optou-se por modular os lasers nos transmissores, e demodular os sinais nos receptores. Além disso, foram adotados filtros de interferência com largura de banda espectral

estreita, centrada nos comprimentos de onda de 780 nm e 1550 nm, para os receptores, e é conhecido que a responsividade do detector de HgCdZnTe à luz do dia é praticamente zero. A figura 50 ilustra o espectro da radiação solar.

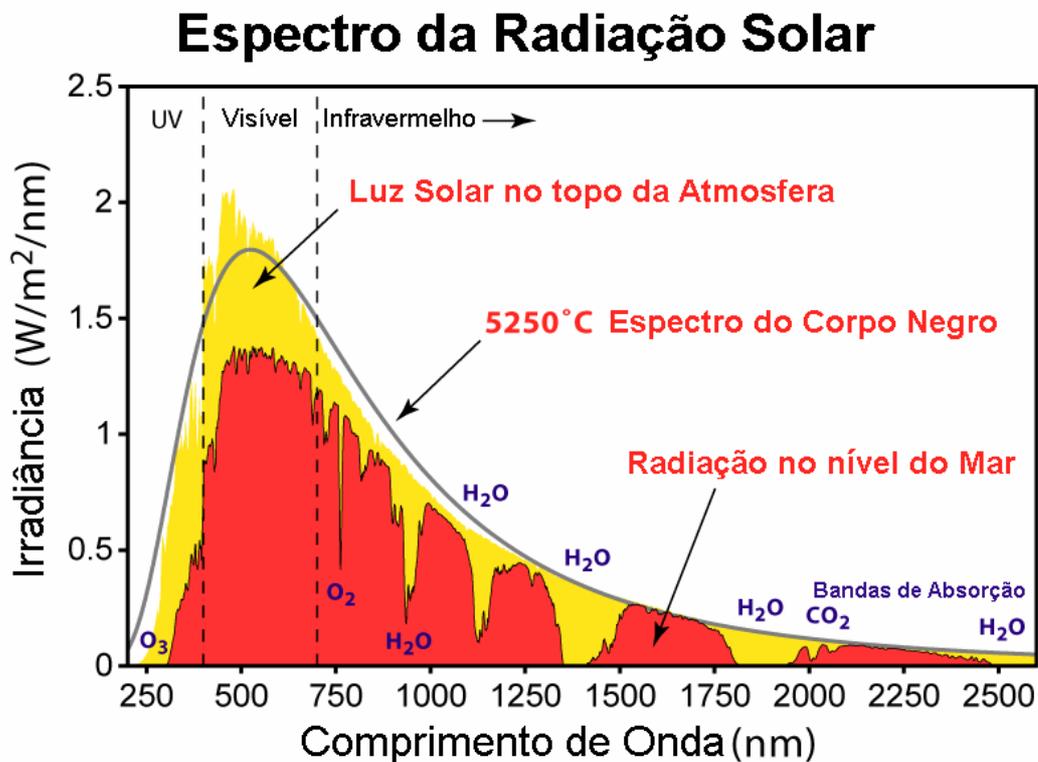


Figura 50 – Espectro da Radiação Solar [46].

Como os deslocamentos das nuvens envolvem grandes massas de ar, a energia no espectro da variação da luz de fundo concentra-se em baixas frequências, coincidindo com a maior parte do espectro das cintilações. Por esse motivo não foi adotada a transmissão CW nesse experimento. Segundo Tatarskii [27] pode-se estimar o limite superior do espectro da turbulência pela expressão:

$$f_{\max} = \sqrt{\frac{10}{2\pi\lambda R}} v_n \quad (5.3)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda em m,  $R$  é a distância do enlace em m, e  $v_n$  é a velocidade média do vento normal ao enlace. A velocidade média do vento no Rio de Janeiro, salvo nos casos mau tempo, não ultrapassa 5 m/s. Estimando-se para o

pior caso (780 nm) com a eq (5.1), a máxima freqüência da cintilação ficará em 577 Hz. A figura 51 apresenta a foto de satélite do local da montagem do enlace na PUC-Rio.



Figura 51 – Foto de satélite da localização do enlace na PUC-Rio.

A PUC-Rio situa-se entre o maciço da Tijuca e o morro Dois Irmãos. Essa região possui a característica de ser um corredor natural para os ventos. Na figura 51 foi marcada a posição de uma Plataforma de Coleta de Dados (estação meteorológica) do Instituto de Pesquisas Espaciais [47] existente nas proximidades da PUC-Rio. O histórico dos dados dessa plataforma [47] nos mostra que 5 m/s é um valor razoável para ser considerado máximo em condições normais, e que a direção do vento é aproximadamente a indicada na figura 51.

Considerando ainda, que a velocidade média deve ser normal ao enlace, o que não é o caso nessa montagem, conforme figura 51, e que as medidas foram sempre realizadas ao entardecer, horário de menor valor da velocidade média do vento, o valor máximo do espectro da cintilação não deve atingir 500 Hz para a grande maioria das medidas. Com isso é possível determinar a taxa de amostragem do sinal em 1.000 amostras por segundo conforme o teorema de Nyquist.

Pelos motivos expostos acima, os comprimentos de ondas de 780 nm e 1550 nm foram modulados em amplitude por uma onda senoidal com 10 kHz de frequência, e o de 9,1  $\mu\text{m}$  foi modulado em amplitude por onda retangular com 1MHz de frequência e “duty cycle” de 10%, devido às limitações de refrigeração térmica do laser. À medida que a luz dos feixes trafega na atmosfera com turbulência, ela sofre uma modulação em amplitude decorrente da difração causada pelas não homogeneidades da turbulência. O sinal óptico que chega ao receptor é uma portadora senoidal em 10 kHz, ou retangular em 1 MHz no caso do 9,1  $\mu\text{m}$ , com uma modulação em amplitude decorrente da turbulência atmosférica. Em função da translação no espectro elétrico gerada pela modulação dos lasers transmissores, a informação da cintilação fica preservada, pois as variações de luz de fundo (“background”) ocorrem em baixas frequências. A demodulação do sinal é feita, após a pré-amplificação, e após a passagem por um filtro passa-faixa para eliminar ruído e sinais espúrios. Um detector de envoltória é usado para extrair (demodular) o sinal de interesse (cintilação), e um filtro passa-baixa para limitar a banda e eliminar ruído.

Circuitos alimentados à bateria, constantes no apêndice A, foram especialmente projetados e construídos para serem empregados nos receptores de 780 nm e 1550 nm, para reduzir o ruído elétrico. Para cada enlace foram construídos: um pré-amplificador na configuração de transimpedância implementado com o circuito integrado operacional OPA 128, da empresa Burr Brown, com baixo nível de ruído e alto ganho de transimpedância (50 dB); um filtro ativo passa-faixa centrado em 10 kHz, com largura de banda de 2 kHz, fator de qualidade 5, e ganho de 5 vezes, implementado com o circuito integrado operacional OPA 177GP da Burr Brown; um detector de envoltória com o diodo de Germânio 1N60 e 0,726 ms de constante de tempo; e um filtro ativo passa-baixa com largura de banda de 1 kHz, planura na banda, implementado com o circuito integrado operacional OPA 177GP também da Burr Brown. Os circuitos foram acondicionados em caixas metálicas, sendo conectados por cabos e conectores blindados. A eletrônica do receptor de 9,1  $\mu\text{m}$  foi fornecida pela própria Vigo Systems, montada em um único dispositivo contendo a refrigeração do detector à “Peltier”, e o amplificador para o sinal, com saída coaxial de 50  $\Omega$  de impedância. Um detector de envoltória com constante de tempo de 0,677 ms,

usando um diodo de sinal 1N4735 e um capacitor de 4,7 nF foi acoplado entre a saída do amplificador e a entrada da placa de aquisição, para extrair a cintilação da onda modulada.

Uma placa de aquisição diferencial de 12 bits de profundidade, com taxa máxima de 10.000 amostras por segundo, da empresa National, modelo NI6008-USB, foi usada na aquisição dos sinais dos três enlaces. Uma rotina em LabView foi desenvolvida para permitir a visualização do sinal em tempo real nos três enlaces, e realizar a gravação dos mesmos em arquivos.

Após a demodulação, os três sinais recebidos foram adquiridos simultaneamente durante 20s, a uma taxa de aquisição de 1000 amostras/s, para assegurar que as baixas e altas frequências do espectro da turbulência pudessem ser capturadas. Esse processo foi repetido dez vezes, totalizando 200 s de gravações, e 200.000 amostras por canal.

O sinal registrado passa por um processo de retirada da tendência de subida ou descida da sua média, para que ele se torne um processo aleatório estacionário. A figura 52 ilustra um sinal com tendência de subida.

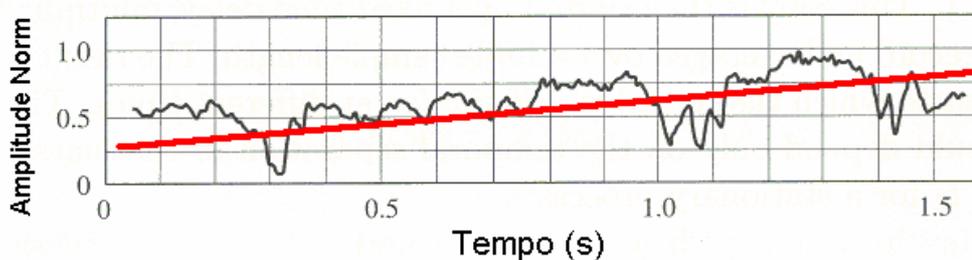


Figura 52 – Sinal óptico normalizado com tendência de subida.

A linha reta em vermelho é um ajuste (“fit”) linear da curva, e marca a tendência de subida da média do sinal. Ela é então subtraída do dado bruto para a obtenção do sinal aleatório estacionário.

O teorema da ergodicidade garante que a média conjunta de uma variável aleatória de um processo estacionário pode ser substituída por sua média temporal. Esse é o caso em medias ópticas de cintilação. Os cálculos estatísticos são feitos a partir dos registros temporais dos sinais ópticos. Uma amostra da variância do sinal é calculada a partir de uma amostra temporal finita.

Segundo Wheelon [26] a influência do comprimento temporal da amostra pode ser desprezada se for respeitada a seguinte inequação:

$$\kappa > \frac{5}{v_o T} \quad (5.4)$$

onde  $\kappa$  é o número de onda espacial da turbulência atmosférica,  $v_o$  é a velocidade média do vento, e  $T_a$  é comprimento temporal da amostra. A eq. (5.4) mostra que se for adotada uma amostra com comprimento de 20 s, e que se a velocidade média do vento for de aproximadamente 5 m/s, o comprimento da amostra não terá influência em medidas de turbulência com número de onda espacial maior do que  $10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ . Isso ocorre naturalmente, pois o comprimento de Fresnel para enlaces ópticos é da ordem de unidades de centímetros ( $\kappa > 2 \text{ cm}^{-1}$ ). O comprimento de amostra de 20 s permite ainda realizar medidas com velocidades médias do vento tão baixas quanto 0,005 m/s.

Os diâmetros máximos de abertura para cada transmissor e receptor, por comprimento de onda, são apresentados na tabela 8.

	<b>780 nm</b>	<b>1550 nm</b>	<b>9,1 <math>\mu\text{m}</math></b>
$\phi_{\text{max}}$ <b>Transmissor</b>	46,8 mm	46,8 mm	35,2 mm
$\phi_{\text{max}}$ <b>Receptor</b>	75,9 mm	75,9 mm	72,7 mm

Tabela 8 - Diâmetros máximos dos transmissores e receptores dos enlaces lasers

Com o objetivo de se alterar a característica de abertura dos receptores, discos redutores foram construídos em alumínio com os seguintes valores de diâmetros: 68 mm; 50 mm; e 25 mm.

A óptica dos transmissores e receptores foi projetada para que o sistema tivesse baixo custo. Consiste basicamente de um suporte com uma lente plano-convexa em uma extremidade, e na outra a fonte de luz ou o detector. Um diagrama esquemático do receptor pode ser encontrado na referência [3], e a figura 53 mostra o receptor de 1550 nm, que é idêntico ao receptor de 780 nm.



Figura 53 – Receptor de 1550 nm, idêntico ao de 780 nm.

O receptor de 9,1  $\mu\text{m}$  possui uma estrutura diferente em função da eletrônica fornecida pela Vigo Systems. Ele é apresentado na figura 54.



Figura 54 - Receptor de 9,1  $\mu\text{m}$ .

Os receptores possuem ajustes de azimute, elevação, e distância da lente ao detector. Os transmissores de 780 nm e 1550 nm são idênticos e foram alimentados com fibra óptica multimodo. No transmissor de 9,1  $\mu\text{m}$  a luz do laser é lançada diretamente sobre a lente, pelo fato de não existir fibra óptica para esse comprimento de onda, e apresentar uma estrutura de suporte diferente dos outros transmissores. Os três transmissores são mostrados na figura 55.

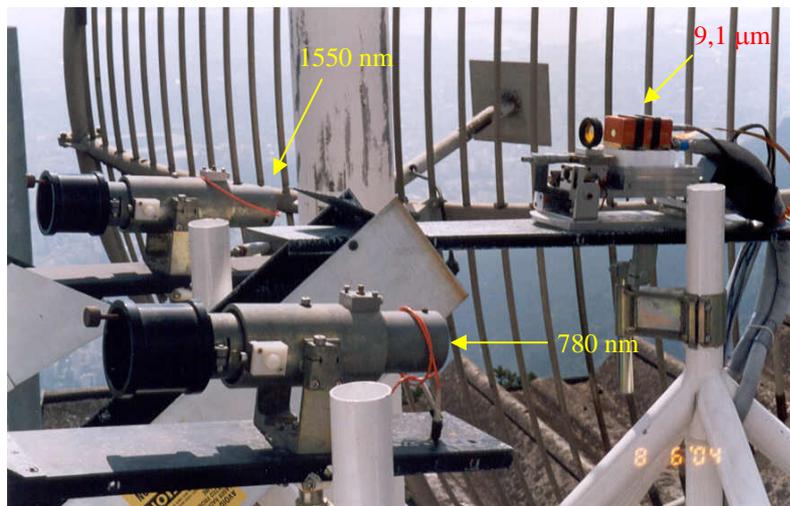


Figura 55 – Transmissores de 780 nm, 1550 nm e 9,1  $\mu\text{m}$ .

Assim como os receptores, os transmissores possuem ajustes de azimute, elevação, e da distância da lente de saída à fonte de luz. Maiores detalhes sobre o projeto e construção dos canhões ópticos podem ser encontrados no trabalho de tese desenvolvido por Colvero [3].

#### 5.4. Avaliação da Cintilação para Máxima Abertura dos Receptores

Após a movimentação do experimento para a PUC-Rio, novos conjuntos de dados foram obtidos. O efeito observado no Sumaré se repetiu para a montagem experimental da PUC-Rio. Na condição de máxima abertura dos receptores os índices de cintilação apresentaram variação em função do comprimento de onda, em relação ao previsto pela teoria de espalhamento fraco com média por abertura. A figura 56 apresenta os dados brutos na parte da direita, e a correspondente flutuação da intensidade normalizada na parte da esquerda.

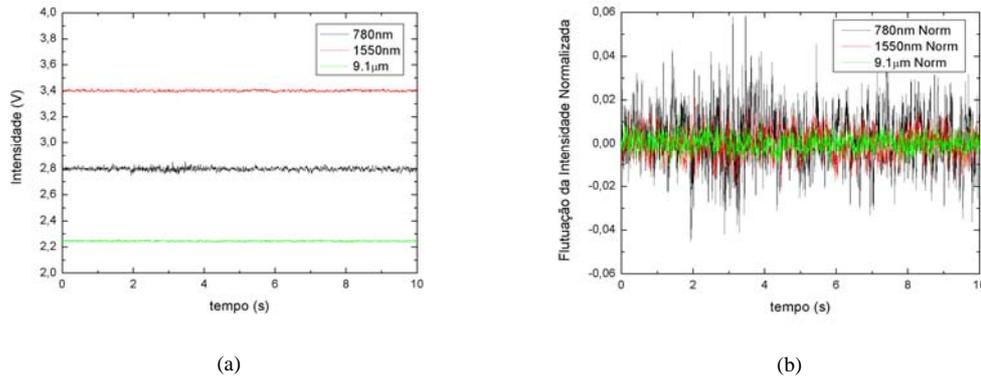


Figura 56 – Intensidade do sinal dos enlaces lasers (a), e flutuações da intensidade normalizada (b)

É possível observar que os enlaces de 780 nm e 1550 nm apresentaram maior nível de cintilação do que o do enlace de 9,1 µm. Os índices de cintilação calculados conforme a eq. (4.57) são apresentados na tabela 9.

	<b>780 nm</b>	<b>1550 nm</b>	<b>9,1 µm</b>
$I_{C\_Teórico}$	$8,38 \cdot 10^{-6}$	$8,32 \cdot 10^{-6}$	$8,35 \cdot 10^{-6}$
$I_{C\_Medido}$	$9,01 \cdot 10^{-5}$	$2,24 \cdot 10^{-5}$	<b><math>8,35 \cdot 10^{-6}</math></b>

Tabela 9 – Índice de cintilação teórico e medido tomando o enlace de 9,1 µm como referência para obtenção da constante de estrutura do índice de refração (PUC-Rio).

Usando a eq. (4.57) para converter o índice de cintilação medido em variância do logaritmo das flutuações de amplitude, obtemos  $\langle \chi^2 \rangle = 5,6 \cdot 10^{-6}$  para o enlace de 1550 nm. Descontando o ganho da média pela abertura (eq. 4.97) chegamos a  $\langle \chi^2 \rangle = 4,25 \cdot 10^{-4}$ , e a eq. (4.53) determina o limite para espalhamento fraco  $\langle \chi^2 \rangle < 1$ , que é perfeitamente atendido. O enlace de 9,1 µm foi adotado como referência em função do menor nível de cintilação apresentado nas medidas. Usando as eq. (4.57) e (4.94), e o valor de abertura desse receptor (9,1µm) constante da tabela 8, foi obtida uma estimativa para a função estrutura da constante do índice de refração da turbulência igual a  $C_n^2 = 1,0^{-15} (\text{m}^{-2/3})$  (verão

18:00h), e conseqüentemente os índices de cintilação teóricos previstos para os enlaces considerando espalhamento fraco. Da tabela 9 observa-se que o desempenho do enlace de 780 nm em relação à cintilação foi aproximadamente 10 vezes pior do que o previsto, e que o desempenho do enlace de 1550 nm foi cerca de 3 vezes pior. Comparando-se os espectros dos sinais medidos na PUC-Rio, com os espectros dos sinais medidos no Sumaré, constata-se uma redução no nível de ruído, o que explica uma redução da discrepância dos valores de cintilação medidos em relação aos valores teóricos previstos. Entretanto, não foi encontrada na literatura uma resposta para essa diferença de desempenho entre os três enlaces que utilizam receptores com grande abertura.

A hipótese de influência do “speckle pattern” [48] da fibra foi cogitada para justificar esse efeito. Os canhões transmissores de 780 nm e 1550 nm são alimentados com fibra multimodo, enquanto que o canhão transmissor de 9,1  $\mu\text{m}$  utiliza acoplamento direto do laser. Essa é a única diferença de construção, relacionada à parte óptica, existente entre os enlaces. A fibra multimodo produz em sua saída um feixe não uniforme com regiões claras e escuras conhecidas como “speckle”, que ocorre devido às interferências dos diversos modos de propagação da fibra, ilustrado na figura 57.

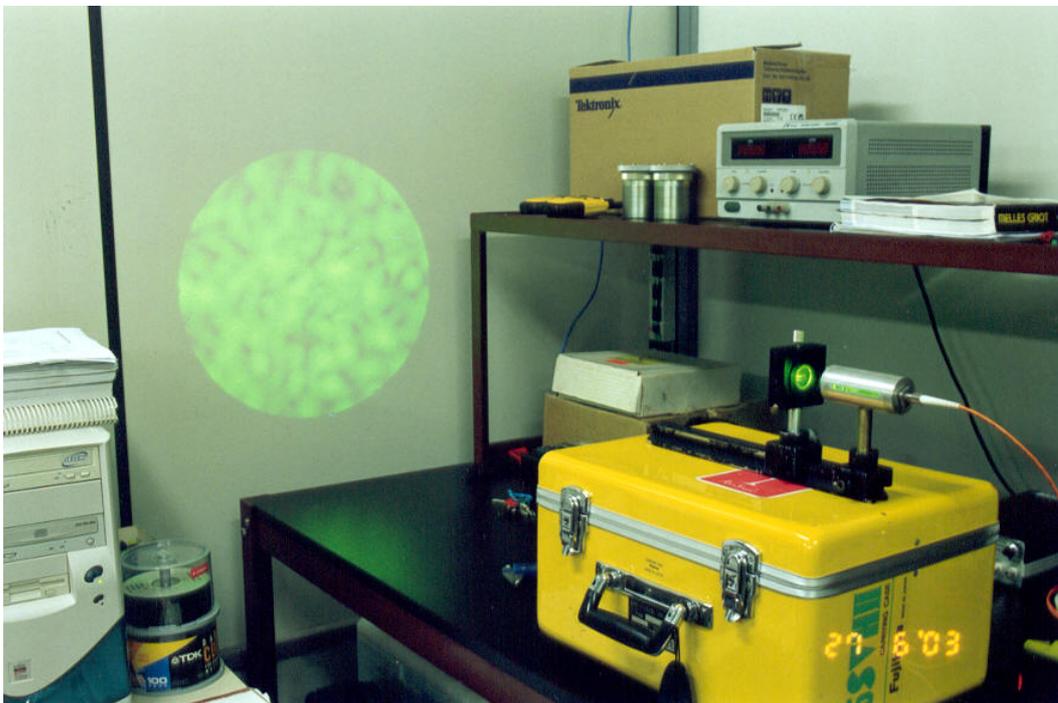


Figura 57 – “Speckle” decorrente dos vários modos de propagação na fibra.

A média por abertura estimada pela eq. (4.97) prevê que a cintilação diminua à medida que a área do receptor aumente. Portanto, uma iluminação não uniforme do receptor, causado pela projeção e ampliação do “speckle” no plano do receptor, poderia ser responsável pela redução da efetividade da média por abertura. Esse efeito seria similar a usar um receptor com menor área.

Um teste preliminar foi feito introduzindo-se uma leve perturbação mecânica na fibra, durante o registro do sinal, após 5 s do início. A figura 58 apresenta o sinal registrado com perturbação na fibra.

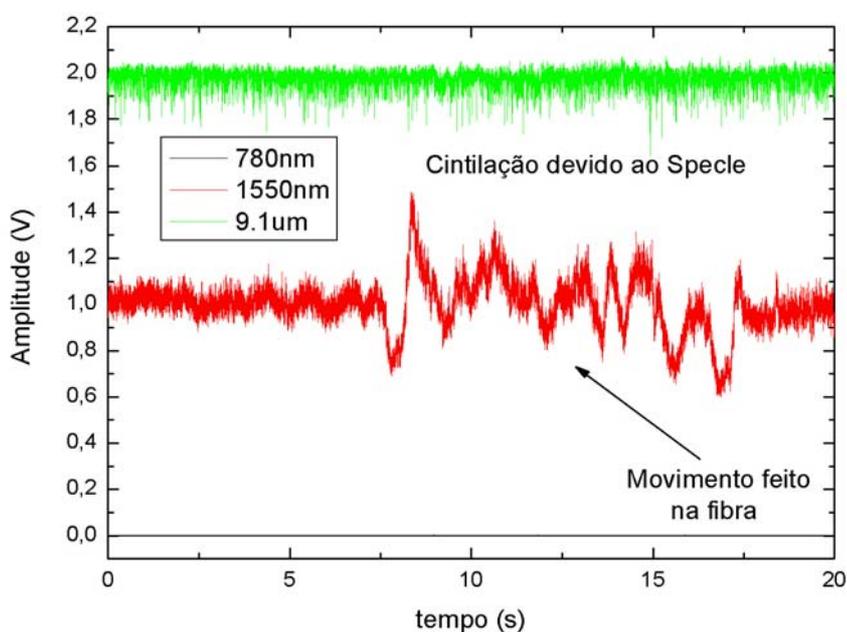


Figura 58 – Aquisição com perturbação mecânica introduzida na fibra.

Para avaliar a degradação do desempenho dos enlaces devido à alimentação por fibra, uma fibra monomodo foi instalada no transmissor de 1550 nm. Como não existe fibra monomodo para 780 nm, esse comprimento de onda foi abandonado. Como o enlace de 9,1 µm foi mantido inalterado, ele foi adotado como referência para o nível de cintilação. Com isso os resultados obtidos com fibra monomodo no transmissor de 1550 nm puderam ser comparados aos obtidos com fibra multimodo, em condições atmosféricas similares, referenciadas pelo enlace de 9,1 µm. Como pode ser visto nos dois quadros superiores da figura 59, o enlace de 1550 nm alimentado com fibra multimodo, experimentou duas vezes

mais cintilação que o de 9,1  $\mu\text{m}$ . Entretanto, após a mudança na fibra para monomodo, o enlace de 1550 nm apresentou uma melhora significativa, aproximando-se do enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ , e os resultados são apresentados nos dois quadros inferiores da figura 59.

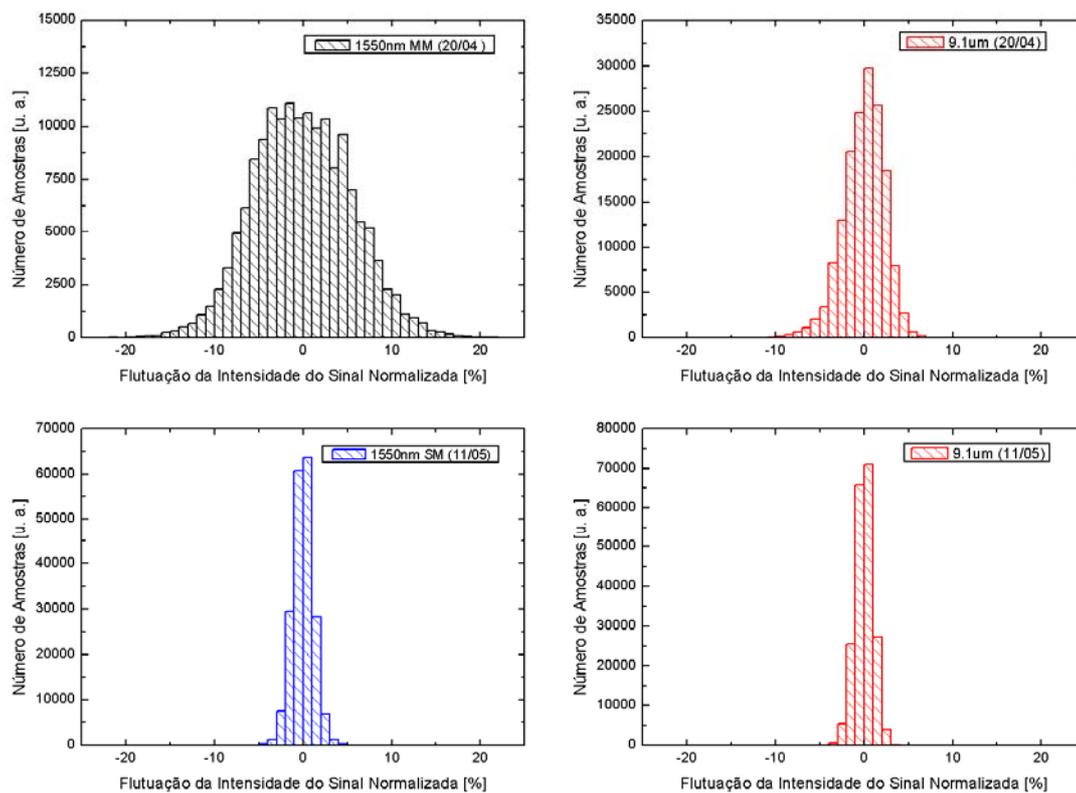


Figura 59 – Medidas de cintilação com fibra multimodo e monomodo em 1550 nm tendo como referência o enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ .

As medidas utilizando fibra multimodo e fibra monomodo no transmissor de 1550 nm foram feitas em dias diferentes, e puderam ser comparadas em função do enlace de 9,1  $\mu\text{m}$  ter sido adotado como referência.

## 5.5. Comparação Direta da Influência do “Speckle” da Fibra Multimodo

Novas medidas utilizando três enlaces simultaneamente, dois em 1550 nm (um com fibra multimodo, e outro com fibra monomodo), e um em 9,1  $\mu\text{m}$  foram

realizadas. O transmissor e o receptor que antes operavam em 780 nm foram modificados e ajustados para trabalhar em 1550 nm, com alimentação por fibra multimodo. Agora os dois enlaces de 1550 nm passaram a ser idênticos em construção, exceto pela fibra de alimentação. Com essa nova configuração foram realizadas 20 aquisições de 20 s, com os receptores na condição de máxima abertura. O céu estava encoberto, a temperatura ambiente era de 20 °C, e a velocidade do vento estava em torno de 0 m/s. Esses dados meteorológicos foram obtidos de uma estação remota do INPE localizada a 1.325 m do enlace. Os dados meteorológicos do aeroporto Santos Dumond, fornecidos pelo sistema METAR são: temperatura ambiente 20 °C; velocidade do vento 3 m/s; e direção do vento 70°. A orientação dos enlaces montados na PUC-Rio possui inclinação de 23° em relação ao Norte. Com isso a velocidade normal ao enlace prevista pela média dos dados INPE e METAR é de 1,1 m/s. Utilizando-se a eq. (5.1) é possível estimar a máxima frequência do espectro da cintilação para o pior caso (1550 nm) em 178,6 Hz. Na figura 60 é apresentado um 1 s de gravação do sinal (1000 amostras) no lado direito, e os 400 s (400.000 amostras) da flutuação da intensidade do sinal normalizada no lado esquerdo.

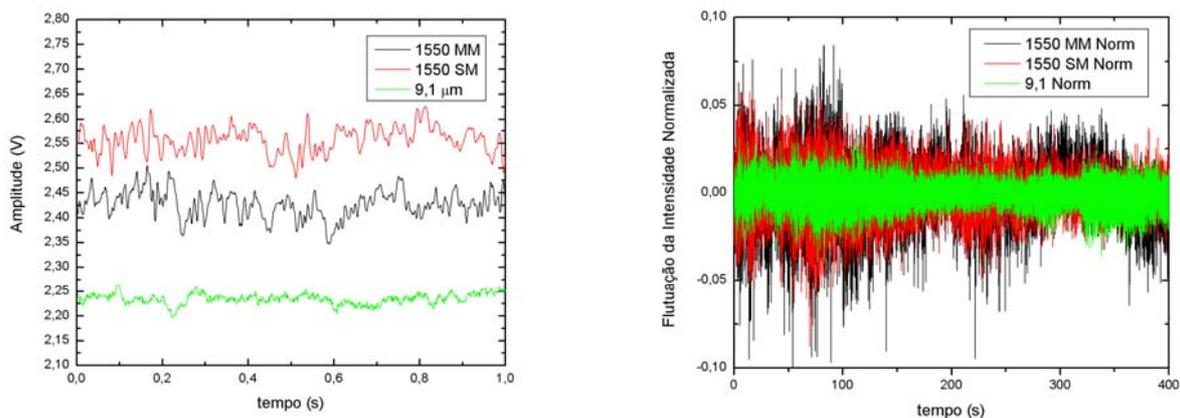


Figura 60 – Intensidade do sinal dos enlaces lasers (direita), e flutuações da intensidade normalizada (esquerda).

O quadro da esquerda da figura 60 apresenta uma ampliação dos sinais em sua parte inicial. Pode-se notar que existia certa semelhança entre eles, como era de se esperar, pois os enlaces estão dispostos próximos em paralelo. Observa-se

no quadro da direita da figura 60 que o enlace de 1550 nm alimentado com fibra multimodo apresentou maior nível de cintilação do que o alimentado com fibra monomodo. Os índices de cintilação calculados conforme a eq. (4.57) são apresentados na tabela 10. Adotando o 9,1  $\mu\text{m}$  como referência, usando as eq. (4.57) e (4.94), e o valor de abertura desse receptor constante da tabela 8, foi obtido uma estimativa para a função estrutura da constante do índice de refração da turbulência  $C_n^2 = 4,81 \cdot 10^{-15} (\text{m}^{-2/3})$  (primavera 19h), e conseqüentemente os valores teóricos previstos para os enlaces considerando espalhamento fraco.

	1550 nm MM	1550 nm SM	9,1 $\mu\text{m}$
$I_{C\_Teórico}$	$4,03167 \cdot 10^{-5}$	$4,03167 \cdot 10^{-5}$	$4,04649 \cdot 10^{-5}$
$I_{C\_Medido}$	$2,90829 \cdot 10^{-4}$	$1,29122 \cdot 10^{-4}$	$4,04649 \cdot 10^{-5}$

Tabela 10 – Índice de cintilação teórico e medido tomando o enlace de 9,1  $\mu\text{m}$  como referência para obtenção da constante de estrutura do índice de refração (PUC-Rio).

Da tabela 4 observa-se que o desempenho do enlace de 1550 nm alimentado com fibra multimodo (MM), em relação à cintilação, foi aproximadamente 7 vezes pior que o previsto, e que o desempenho do enlace de 1550 nm com fibra monomodo (SM) cerca de 3 vezes pior. Um gráfico com os histogramas das flutuações dos sinais lasers é apresentado na figura 61 e reflete os números da tabela 10.

Observando-se a figura 61 nota-se que os desempenhos em relação à cintilação dos enlaces lasers, ordenados do melhor para o pior foram: 9,1  $\mu\text{m}$ ; 1550 nm com transmissor alimentado por fibra monomodo (SM); e 1550 nm com transmissor alimentado por fibra multimodo (MM). De acordo com o índice de cintilação medido, o enlace com fibra multimodo foi 2,25 vezes pior do que o enlace com fibra monomodo, para as mesmas condições atmosféricas, utilizando-se a mesma geometria na transmissão e na recepção, e com os mesmos ajustes de abertura dos transmissores e receptores.

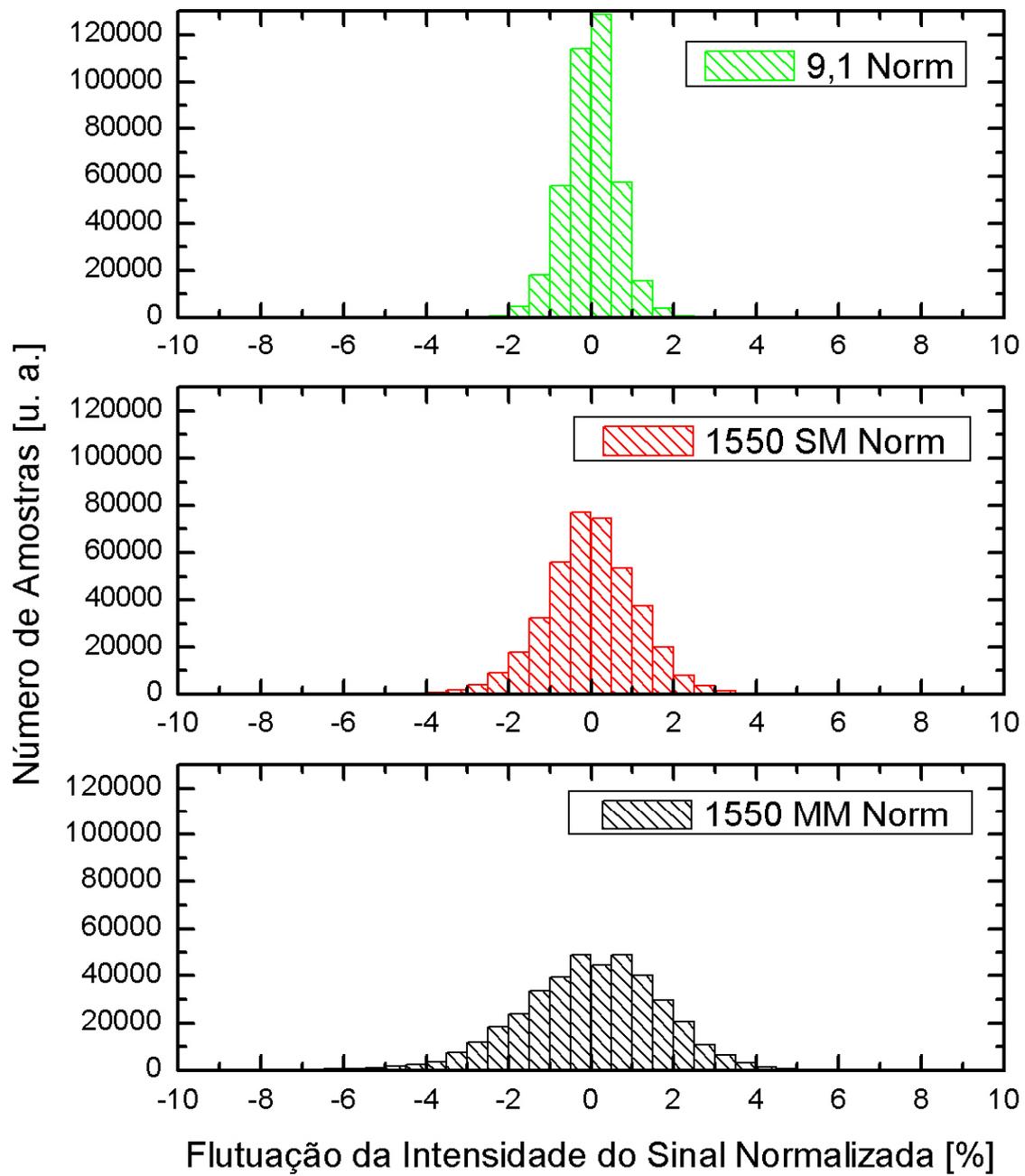


Figura 61 – Comparação direta da cintilação com fibra multimodo e monomodo em 1550 nm.

Entretanto, percebe-se ainda que o índice de cintilação medido do enlace de 1550 nm alimentado com fibra monomodo, é 3,2 vezes pior que o índice de cintilação medido do enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ .

Essa diferença pode ser justificada pelo fato do enlace de 1550 nm apresentar uma divergência, e o enlace de 9,1  $\mu\text{m}$  estar praticamente colimado, conforme explicado na seção 5.3.1. (Ajuste dos transmissores). Considerando o feixe em 9,1  $\mu\text{m}$  colimado, e utilizando-se o gráfico da figura 28, no capítulo 4, é possível encontrar o valor de 0,140 para a constante da expressão da variância normalizada para o feixe Gaussiano. Da figura 32 do capítulo 4 é possível extrair o fator de ganho do receptor 0,08 para o comprimento de onda de 9,1  $\mu\text{m}$ , considerando-o como onda plana. Como o enlace de 1550 nm foi ajustado divergente, ele pode ser aproximado por onda esférica. O fator de ganho do receptor, extraído da figura 32, é 0,04. A relação de cintilação prevista com base nas hipóteses anteriores é:

$$\frac{I_{c_{-1550nmSM}}}{I_{9,1\mu m}} = \frac{4\langle\chi^2\rangle_{es}}{4\langle\chi^2\rangle_g} = \frac{0,124(2\pi/1550^{-9})^{\frac{7}{6}} 0,04}{0,140(2\pi/9,1^{-6})^{\frac{7}{6}} 0,08} = 3,5$$

O valor estimado para a razão dos índices de cintilação, considerando as diferenças de ajuste dos enlaces, é muito próximo do valor medido.

## 5.6. Espectro dos sinais medidos

A transformada rápida de Fourier com janela triangular foi aplicada sobre as flutuações das intensidades normalizadas dos sinais dos enlaces lasers, e os resultados são apresentados na figura 62.

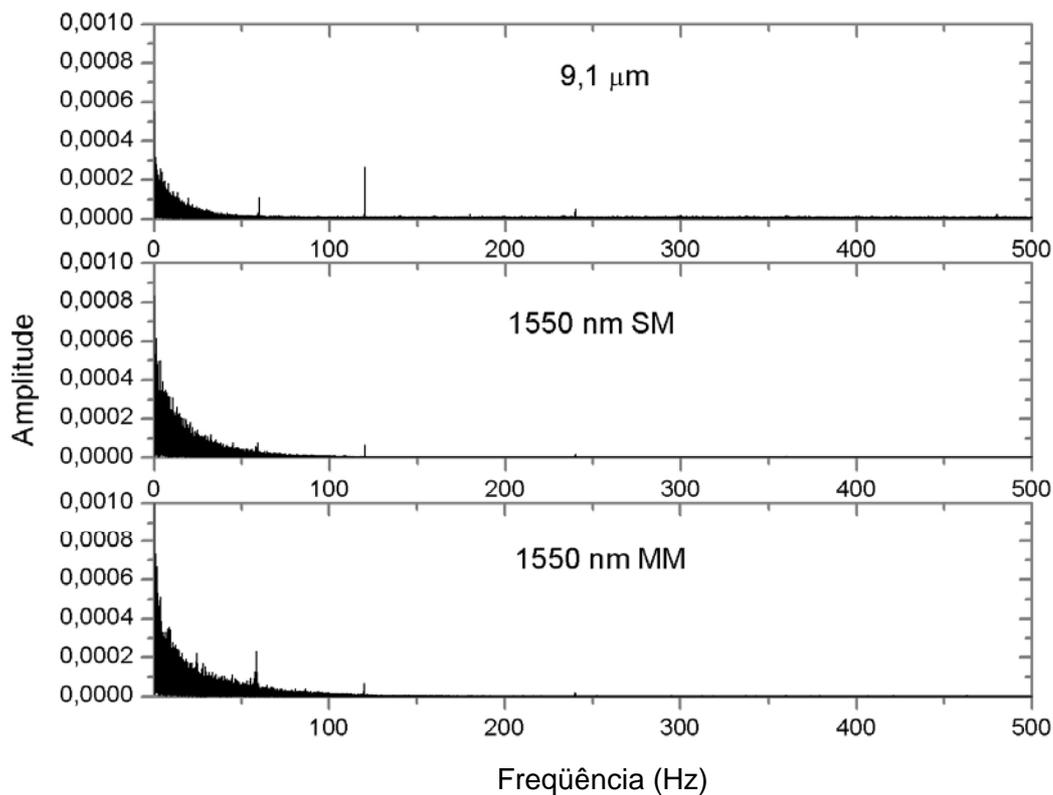


Figura 62 – Espectro das flutuações de intensidade normalizadas.

Como se pode observar na figura 62 os espectros dos sinais não ultrapassaram 150 Hz, valor que está abaixo da capacidade de aquisição do sistema de medidas (500 Hz). Outro aspecto interessante, também visível na figura 62, é que o nível de ruído elétrico do sistema de aquisição é bem reduzido, permitindo capturar os finos detalhes da alta frequência da cintilação.

## 5.7. Variação da abertura dos receptores

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho procurou-se avaliar o desempenho dos enlaces lasers, em relação à cintilação, para diferentes aberturas dos receptores. Discos de alumínio com diâmetros 68 mm, 50 mm, e 25 mm foram usados para reduzir a entrada de luz dos receptores. Foram obtidos 20 registros de 20 s cada, por anel redutor, para os três enlaces (1550 nm MM, 1550 nm SM, e 9,1 μm) simultaneamente. O desvio padrão das flutuações de

intensidade normalizadas, tendo como parâmetros a abertura dos receptores, e o comprimento de onda, é apresentado na figura 63.

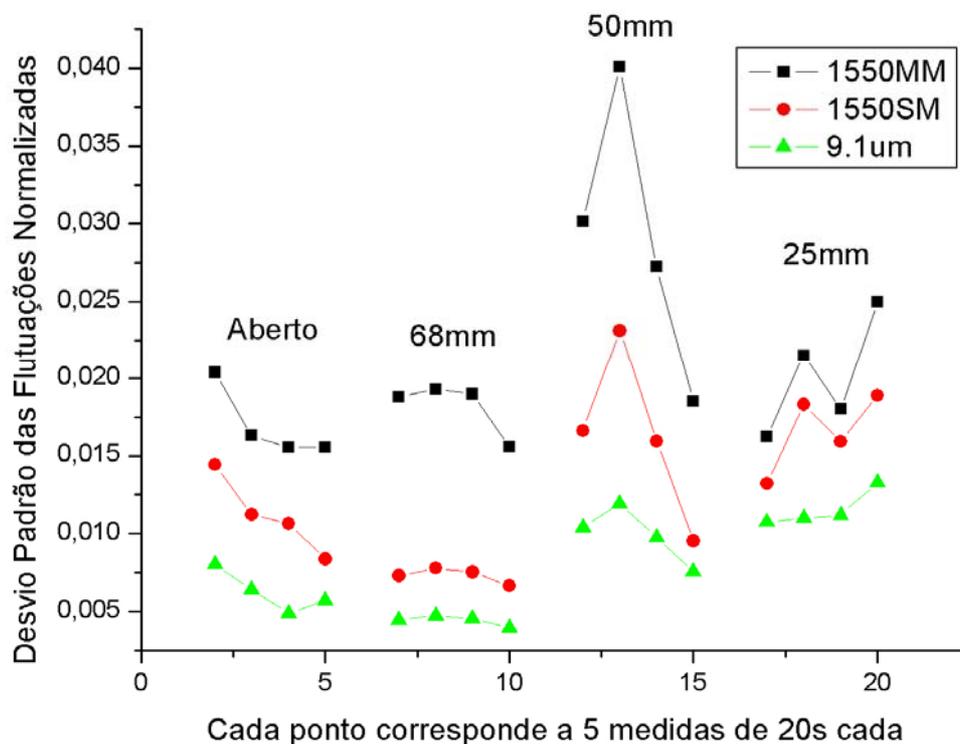


Figura 63 – Desvio padrão das flutuações de intensidade, parametrizadas pela abertura dos receptores, e pelos tipos de enlaces (1550 nm MM, 1550 nm SM, e 9,1 µm).

Cada ponto apresentado no gráfico corresponde a um conjunto com 5 registros de 20 s cada, totalizando 100 s ou 100.000 amostras. Os triângulos representam o enlace de 9,1 µm, os círculos o enlace de 1550 nm alimentado com fibra monomodo, e os quadrados o enlace de 1550 nm alimentado com fibra multimodo. O eixo  $x$  corresponde a uma evolução temporal das medidas. Cada grupo de quatro símbolos iguais ligados por uma linha corresponde a uma abertura de receptor, que está discriminada acima do conjunto de pontos interligados.

O primeiro conjunto de 4 pontos interligados, que corresponde a máxima abertura dos receptores, já foi discutido na seção anterior. Observando-se o segundo conjunto de pontos, que corresponde ao anel de 68 mm, tem-se a impressão que o enlace de 1550 nm alimentado com fibra monomodo (SM),

aproximou seu comportamento do enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ . Na verdade houve uma redução do nível de cintilação, que pode ser observada pelo segundo conjunto de triângulos. O enlace SM apenas acompanhou a redução do nível médio de cintilação. O enlace MM permaneceu no nível médio equivalente ao do conjunto de pontos anterior (aberto). Como a fibra multimodo cria um padrão de iluminação, no plano do receptor, que é não uniforme, é possível que a redução de diâmetro de 75,9 mm para 68 mm, tenha acentuado um “desalinhamento” inicial de um máximo local do feixe gerado pela fibra multimodo. No terceiro conjunto de pontos, que corresponde ao anel de 50 mm, nota-se uma elevação do nível de cintilação, já esperada em função da redução do diâmetro dos receptores. O desempenho relativo dos três enlaces é semelhante ao do primeiro conjunto de pontos. No quarto conjunto de pontos, que corresponde ao anel de 25 mm, houve uma ligeira elevação do nível médio de cintilação dos enlaces 1550 nm SM, e 9,1  $\mu\text{m}$ . O comportamento do enlace de 1550 nm alimentado com fibra multimodo (MM) se aproximou dos outros dois, reduzindo as discrepâncias notadas anteriormente. Ou seja, para um diâmetro de 25 mm a influência do “speckle” passa a perder força. Isso provavelmente se deve ao fato das regiões claras e escuras possuírem dimensões próximas a 25 mm no plano de recepção, o que proporcionaria uma iluminação aproximadamente uniforme quando uma mancha clara coincidissem com o receptor. Durante o alinhamento do enlace é natural a busca pela máxima potência recebida.

## **5.8. Diversidade Espacial**

A diversidade espacial consiste em se utilizar dois caminhos distintos para se atingir um receptor. O transmissor de 1550 nm alimentado com fibra multimodo (MM) foi apontado para o receptor de 1550 nm (SM) (receptor do meio). O transmissor de 1550 nm alimentado com fibra monomodo (SM) não precisou ser alterado quanto ao seu alinhamento. O receptor de 1550 nm (SM) foi apontado para o centro da reta que liga os dois transmissores de 1550 nm, de modo a permitir que o seu FOV incluísse ambos. Foram obtidos 40 registros de 20 s cada, por anel redutor, para os dois enlaces (1550 nm com diversidade

espacial e  $9,1 \mu\text{m}$ ) simultaneamente. A figura 64 ilustra as flutuações de intensidade normalizadas, para os receptores com o disco redutor de 68 mm, e comprimentos de onda 1550 nm com diversidade espacial, e  $9,1 \mu\text{m}$ .

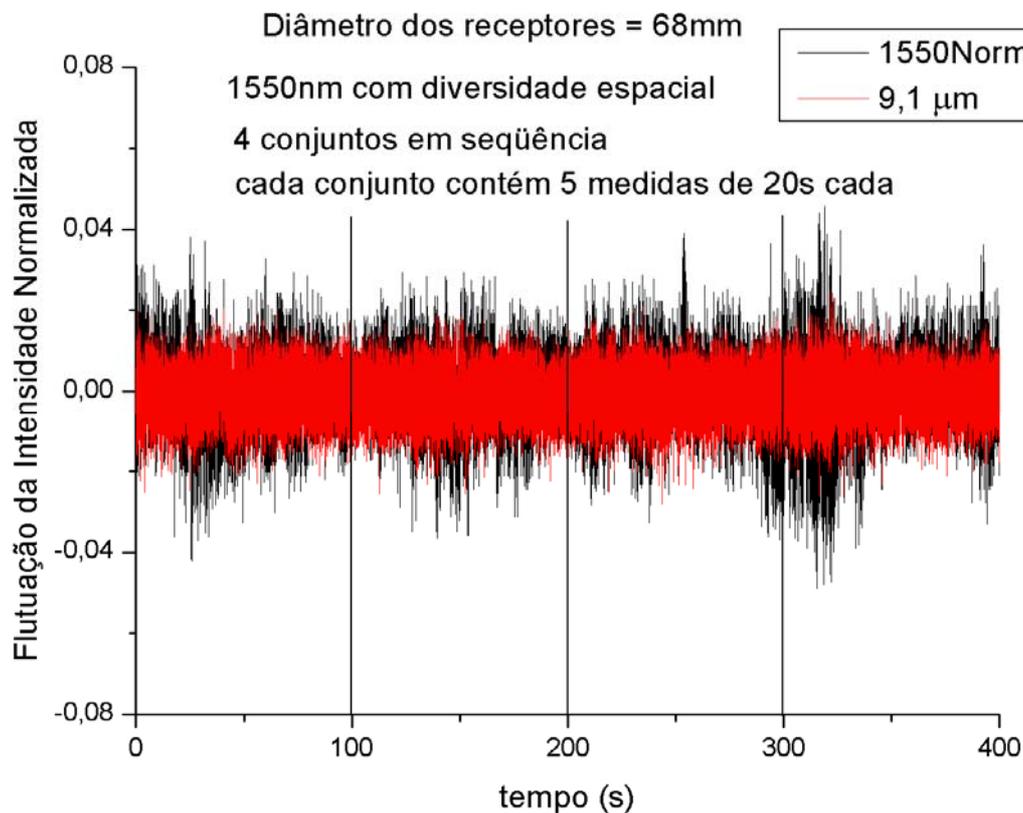


Figura 64 – Flutuação da Intensidade Normalizada para os enlaces de 1550 nm com diversidade espacial, e  $9,1 \mu\text{m}$ .

Observa-se na figura 64 que o enlace de  $9,1 \mu\text{m}$  apresentou menor nível de cintilação. O desvio padrão das flutuações de intensidade normalizadas, tendo como parâmetros a abertura dos receptores, e o tipo de enlace (1550 nm com diversidade espacial e  $9,1 \mu\text{m}$ ), é apresentado na figura 65.

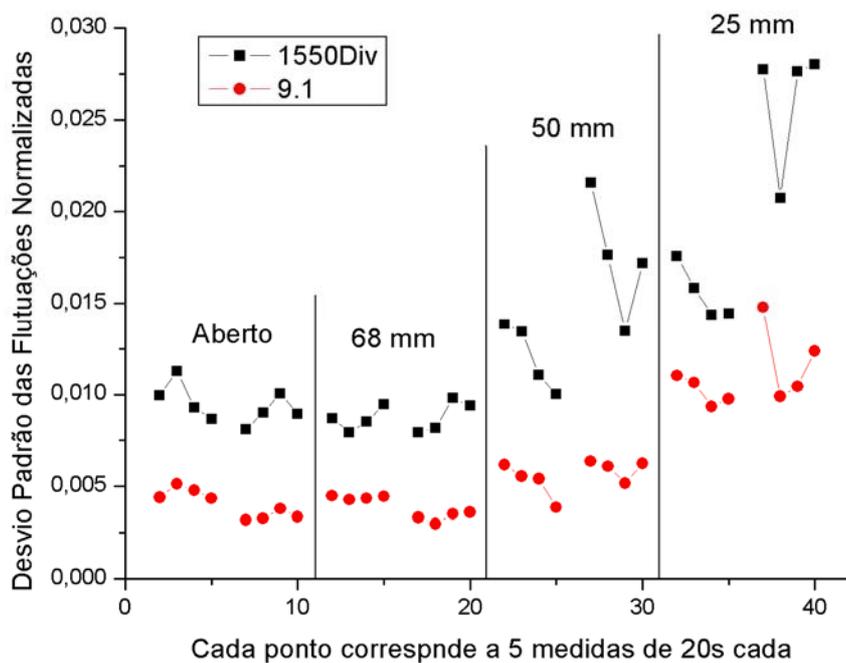


Figura 65 – Desvio padrão das flutuações de intensidade normalizadas, parametrizadas pela abertura dos receptores, e pelo tipo de enlace (1550 nm com diversidade espacial e 9,1  $\mu\text{m}$ ).

Observa-se na figura 65 que não houve vantagem em realizar a diversidade espacial. O desempenho do enlace de 9,1  $\mu\text{m}$ , em relação à cintilação, foi superior ao enlace com diversidade espacial em 1550 nm para todas as condições de abertura dos receptores. Isso provavelmente se deve ao fato de haver uma parte do caminho comum aos dois feixes de 1550 nm, pois os transmissores foram apontados para o mesmo receptor.