

UFF- UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

SEBASTIÃO SERGIO DE OLIVEIRA JÚNIOR

CARACTERIZAÇÃO DA NÃO-LINEARIDADE DE LEDs VISÍVEIS E DE ENLACES
COM FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA

NITERÓI

2015

SEBASTIÃO SERGIO DE OLIVEIRA JÚNIOR

CARACTERIZAÇÃO DA NÃO-LINEARIDADE DE LEDs VISÍVEIS E DE ENLACES
COM FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

Niterói

2015

SEBASTIÃO SERGIO DE OLIVEIRA JÚNIOR

Caracterização de não-linearidade de LEDs visíveis e enlaces com fibra óptica
plástica

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

Aprovada em 30 de novembro de 2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro – Orientador
Universidade Federal Fluminense – UFF

Dr. Jorge Ângelo Mitrione Souza
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Dra. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri
Universidade Federal Fluminense – UFF

Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva
Universidade Federal Fluminense – UFF

Niterói

2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que tiveram direta ou indiretamente envolvidos nesse projeto. Gostaria de agradecer ao meu professor orientador, Ricardo Marques Ribeiro, pela paciência, educação, ensinamentos, curiosidades e lições diárias.

Ao professor Andrés Pablo e meus companheiros de LACOP, que me auxiliaram em todos os momentos de necessidade, e me fizeram desenvolver capacidades profissionais, além de lições de trabalho em equipe e companheirismo jamais presenciados por mim.

Agradeço aos meus familiares pela inestimável atenção, carinho, amor e paciência, dedicados à mim. Principalmente a meus pais e madrinha, por serem os maiores incentivadores desse projeto acadêmico.

Agradeço à equipe de coordenação de mestrado, pelo zelo com seus alunos, em especial a Professora Leni Joaquim.

Também agradeço a MCT/CNPq e a FAPERJ pelo financiamento proporcionado a esse trabalho.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	14
Equação 2.....	15
Equação 3.....	15
Equação 4.....	16
Equação 5.....	16
Equação 6.....	16
Equação 7.....	17
Equação 8.....	18
Equação 9.....	18
Equação 10.....	20
Equação 11.....	20
Equação 12.....	21
Equação 13.....	21
Equação 14.....	22
Equação 15.....	22
Equação 16.....	22
Equação 17.....	22
Equação 18.....	23
Equação 19.....	32
Equação 20.....	33
Equação 21.....	34
Equação 22.....	41
Equação 23.....	41
Equação 24.....	41
Equação 25.....	42
Equação 26.....	42
Equação 27.....	42
Equação 28.....	42
Equação 29.....	43
Equação 30.1, 29.2 e 29.3.....	48
Equação 31.....	48
Equação 32.....	49
Equação 33.....	51
Equação 34.....	51
Equação 35.....	52
Equação 36.....	53
Equação 37.....	55
Equação 38.....	56
Equação 39.....	56
Equação 40.....	56
Equação 41.....	75
Equação 42.....	77
Equação 43.....	77
Equação 44.....	77
Equação 45.....	80
Equação 46.....	81
Equação 47.....	81

Equação 48	82
------------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema básico de Comunicação Óptica analógica	11
Figura 2: Junção p-n (a) sem tensão de bias e (b) com tensão de bias (polarização elétrica).....	13
Figura 3: Dispersão parabólica de elétron e buraco	17
Figura 4: Energia de gap de um dado LED	18
Figura 5: Reflexão, refração e reflexão total.....	20
Figura 6: Variação da intensidade luminosa em função da Temperatura ambiente.....	25
Figura 7: Espectro visível	27
Figura 8: Corrente em função da tensão aplicada.....	28
Figura 9: Relação da Tensão aplicada com a temperatura	29
Figura 10: Ganho de modulação do transmissor óptico	30
Figura 11: Tempo de resposta do fotodetector.....	33
Figura 12: Esquema simplificado de fotodiodo tipo PIN.....	34
Figura 13: Responsividade do Receptor Óptico.....	35
Figura 14 Comparação do coeficiente de atenuação entre diversos meios de transmissão óptica	37
Figura 15 Janelas de transmissão da POF	38
Figura 16: Contribuição do transmissor na perda de um sistema óptico.....	43
Figura 17: Largura de Banda.....	45
Figura 18: Linearidade do Emissor.....	55
Figura 19: LED Diemount	58
Figura 20: Intensidade luminosa em função da variação angular do LED Diemount.....	60
Figura 21: LED convencional.....	61
Figura 22: Desenho esquemático da montagem experimental utilizada na caracterização estática e dinâmica da resposta PxV dos LEDs, e de sua largura de banda por varredura de frequências.....	63
Figura 23: Bancada de experimentos para realização da caracterização do LED	64
Figura 24: Curva de Potência Óptica em função da Tensão elétrica aplicada	64
Figura 25: Espectro óptico do LED Âmbar.....	66
Figura 26: Espectro óptico do LED Azul	66
Figura 27: Espectro óptico do LED Verde	67
Figura 28: Espectro Óptico do LED Vermelho.....	67
Figura 29: Largura de Banda do LED Diemount Âmbar (595nm).....	69
Figura 30: Largura de Banda do LED Diemount Verde (520nm).....	70
Figura 31: Largura de Banda do LED Diemount Vermelho (650nm).....	71
Figura 32: Largura de Banda do LED Diemount Azul (460nm).....	72
Figura 33: Comparação entre as bandas de operação dos LEDs.....	74
Figura 34: Representação da onda dente de serra como uma série de Fourier.....	76
Figura 35: Bancada de experimentos (curva de saída, no osciloscópio).....	78
Figura 36: Ajuste da curva de reposta do LED VERDE.....	79
Figura 37: Ajuste da curva de reposta do LED VERMELHO	80
Figura 38: Ajuste da curva de reposta do LED ÂMBAR.....	81
Figura 39: Ajuste da curva de reposta do LED AZUL	82
Figura 40: Resposta do LED ÂMBAR à modulação de onda dente de serra.....	84
Figura 41: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar	85
Figura 42: Resposta do LED AZUL à modulação de onda dente de serra	86
Figura 43: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul.....	87

Figura 44: Resposta do LED VERDE à modulação de onda dente de serra.....	88
Figura 45: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde.....	89
Figura 46: Resposta do LED VERMELHO à modulação de onda dente de serra	90
Figura 47: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho.....	91
Figura 48: Ajuste da curva de reposta do LED VERDE com fibra e sem <i>Mode Scrambler</i>	93
Figura 49: Ajuste da curva de reposta do LED VERMELHO com fibra e sem <i>Mode Scrambler</i>	94
Figura 50: Ajuste da curva de reposta do LED AZUL com fibra e sem <i>Mode Scrambler</i>	95
Figura 51: Ajuste da curva de reposta do LED ÂMBAR com fibra e sem <i>Mode Scrambler</i>	96
Figura 52: Resposta do LED VERMELHO com fibra à modulação de onda dente de serra	97
Figura 53: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com fibra	98
Figura 54: Resposta do LED VERDE com fibra à modulação de onda dente de serra.....	99
Figura 55: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com fibra ...	100
Figura 56: Resposta do LED ÂMBAR com fibra à modulação de onda dente de serra ...	101
Figura 57: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com fibra..	102
Figura 58: Resposta do LED AZUL com fibra à modulação de onda dente de serra.....	103
Figura 59: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com fibra.....	104
Figura 60: Atenuação espectral da POF SI PMMA padrão	106
Figura 61: Banda-passante em POF standard com abertura numérica de 0,5 utilizando <i>mode-scramblers</i>	108
Figura 62: Enlace óptico simplificado.....	109
Figura 63: Misturador de modos (<i>mode scrambler</i>): (a) corrugado; (b) padrão	109
Figura 64: LED VERDE com <i>Mode Scrambler</i> padrão	111
Figura 65: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com <i>Mode Scrambler</i> padrão	112
Figura 66: LED AZUL com <i>Mode Scrambler</i> padrão.....	113
Figura 67: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com <i>Mode Scrambler</i> padrão	114
Figura 68: LED VERMELHO com <i>Mode Scrambler</i> padrão.....	115
Figura 69: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com <i>Mode Scrambler</i> padrão	116
Figura 70: LED ÂMBAR com <i>Mode Scrambler</i> padrão	117
Figura 71: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com <i>Mode Scrambler</i> padrão	118
Figura 72: LED AZUL com <i>Mode Scrambler</i> Corrugado no receptor.....	119
Figura 73: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com <i>Mode Scrambler</i> corrugado no receptor	120
Figura 74: LED VERMELHO com <i>Mode Scrambler</i> Corrugado no receptor	121
Figura 75: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com <i>Mode Scrambler</i> corrugado no receptor	122
Figura 76: LED VERDE com <i>Mode Scrambler</i> Corrugado no receptor.....	123
Figura 77: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com <i>Mode Scrambler</i> corrugado no receptor	124
Figura 78: LED ÂMBAR com <i>Mode Scrambler</i> Corrugado no receptor	125
Figura 79: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com <i>Mode Scrambler</i> corrugado no receptor	126

Figura 80: LED AZUL com Mode Scrambler Corrugado no emissor	127
Figura 81: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com Mode Scrambler corrugado no emissor	128
Figura 82: LED VERDE com Mode Scrambler Corrugado no emissor.....	129
Figura 83: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com Mode Scrambler corrugado no emissor	130
Figura 84: LED ÂMBAR com Mode Scrambler Corrugado no emissor.....	131
Figura 85: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com Mode Scrambler corrugado no emissor	132
Figura 86: LED VERMELHO com Mode Scrambler Corrugado no emissor	133
Figura 87: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com Mode Scrambler corrugado no emissor	134
Figura 88: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED VERMELHO, com <i>mode scrambler</i>	136
Figura 89: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED VERDE, com <i>mode scrambler</i>	137
Figura 90: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED AZUL, com <i>mode scrambler</i>	138
Figura 91: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED LARANJA, com <i>mode scrambler</i>	139

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MODULAÇÕES	1
1.2 APLICAÇÕES DAS POFS E LEDS	4
1.2.1 Redes Industriais & Informática	4
1.2.2 Redes automotivas	5
1.2.3 Redes LAN – <i>Local Area Network</i> e de acesso	5
1.2.4 Enlaces submarinos	6
1.3 OBJETIVO.....	7
2. REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS	10
2.1 OPTOELETRÔNICA	11
2.1.1 LED	11
2.1.2 Diodo Laser	29
2.1.3 Fotodetectores	31
2.1.4 Fibra óptica de plástico	36
2.2 PRINCÍPIOS DE COMUNICAÇÕES ANALÓGICAS.....	39
2.2.1 Ganho de RF.....	40
2.2.2 Largura de banda.....	44
2.2.3 Ruído	46
2.2.4 Distorção.....	53
3. CARACTERIZAÇÃO DOS LEDS (MONTAGEM, RESULTADOS E DISCUSSÕES)	58
3.1 LEDs DIEMOUNT	58
3.1.1 Espelhos refletores	59
3.2 CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA: CURVA PXV E ESPECTRO ÓPTICO	61
3.3 ESPECTRO ÓPTICO DOS LEDS.....	65
3.4 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA: BANDA.....	68
3.5 – CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA: NÃO-LINEARIDADE	74
4. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE NÃO-LINEARIDADE DOS ENLACES COM POFS	92
4.1 ANÁLISE DE DISTRORÇÃO DO ENLACE SEM MISTURADOR MODAL	92
4.2 MISTURADOR DE MODOS (MODE SCRAMBLER)	105
4.2.1 Banda-passante.....	107
4.3 ANÁLISE DA DISTRORÇÃO DO ENLACE COM MISTURADOR MODAL... ..	108
4.3.1 Ajuste de curva de não-linearidade dos LEDs	134
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	142
5.1 CONCLUSÃO.....	142

5.2 TRABALHOS FUTUROS.....	144
Bibliografia.....	145

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo descrever a análise prática e teórica da não-linearidade de LEDs (diodos emissores de luz) emissores no espectro visível: verde, vermelho, azul e âmbar, com comprimento de onda centrado em 520nm, 650nm, 460nm e 590nm, respectivamente que combinados com fibras ópticas plásticas multimodo de índice degrau (SI Multimode POFs - Step Index Multimode Polymer Optical Fibres) são observadas a não-linearidade dos enlaces e a contribuição que essas fibras têm no comportamento linear do enlace. Utiliza-se aqui uma técnica de varredura eletrônica (onda dente-de-serra) capaz de fornecer diretamente a curva PxV do LED em estudo.

Usualmente LEDs visíveis tem seus desenvolvimentos voltados para iluminação e não são projetados para comunicação de dados em aplicações submarinas, espaço livre ou fibras ópticas poliméricas. O objetivo é desenvolver a caracterização acerca da não-linearidade optoeletrônica desses dispositivos estática e dinamicamente – até 2,4MHz, pois se tratava de uma limitação do gerador de função que só modulava até essa frequência.

O trabalho futuro de linearização dessas fontes ópticas permitirá ao enlace uma modulação mais robusta, que acarreta numa eficiência maior no desempenho do circuito. São identificadas aplicações de telemetria e enlaces de dados com formatos digitais complexos como o N-PAM e o OFDM, para circuitos que representam fidelidade optoeletrônica e não sofrerão as distorções típicas de um diodo emissor de luz [1].

Palavras- chave: LED, Linearização, LEDs Ultra brilhantes.

ABSTRACT

This work has the essential purpose to analyze and characterize nonlinearities of ultra-bright LEDs (Light Emitting diode) centered at 470, 520, 590 and 650 nm wavelengths. When combined with SI Multimode POFs - Step Index Multimode Polymer Optical Fibers is observed this distortion.

Usually visible LEDs don't have their development to data communication. Most of it looks forward to illumination usage. The aim here is to investigate the memory-less and with-memory nonlinearities using saw-tooth excitation waveforms up to 2.4 MHz repetition frequencies to statically and mainly dynamically carry out the optoelectronic.

In the future this linearization will allow a rugged modulation to use for. Telemetry and data link with complex digital formats like N-PAM and OFDM.

Keyword: LED, ultra-bright LEDs, Linearization.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as fibras de plástico (*POF – Plastic/Polymer Optical Fiber*) vêm conquistando uma fatia cada vez maior no mercado optoeletrônico e apropriando-se de um nicho tecnológico que completa um gap deixado entre as fibras ópticas de sílica [2] e os fios de cobre, por conta de suas características: Fácil conectividade; Peso reduzido; Alta confiabilidade; Isolamento à interferência magnética; Robustez e flexibilidade mecânica; Além do custo reduzido da tecnologia. Características que quando aplicadas às redes de curta distância, onde a atenuação não é um parâmetro limitante, são mais bem aproveitadas.

1.1 MODULAÇÕES

No presente trabalho a modulação nos LEDs é feita de forma direta, ou seja, aplicada na variação da luz emitida pelo dispositivo, em consonância com o estímulo elétrico aplicado nos mesmos. Um exemplo que facilita o entendimento é a modulação *On-Off Keying*, baseada no código binário em que a modulação é feita partindo de 1 na emissão de luz, e em 0 quando não emite.

Modulações de amplitude do pulso (*PAM pulse amplitude modulation*) tratam-se de modulações analógica que tornam o sinal original em pulsos discretos no domínio do tempo. Com a amplitude deste sinal, num espaçamento constante e de intensidade suficiente para que sejam realizadas as recuperações dos sinais. Para tal, uma reprodução fidedigna do sinal, no momento da coleta da amostra do pulso se faz necessária.

Outro exemplo interessante é a multiplexação de portadoras no sinal elétrico graças às técnicas avançadas de multiplexação/modulação tais como o OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [3]. O OFDM possui o mesmo princípio de base do WDM, porém operando no domínio elétrico e, com eficiência espectral melhorada graças à superposição de sub-portadoras no domínio das frequências. Um sinal OFDM típico quando visualizado no domínio do tempo é formado por diversos picos e vales “rápidos” e de amplitudes variadas caracterizando um sinal analógico.

O estudo para aplicações em fibras de plástico se desenvolve desde a década de 60 pioneiramente pelas companhias químicas norte-americanas Pilot Chemical e Du Pont (1963/1968) as quais venderam suas patentes desenvolvidas para fábrica japonesa, chegando a primeira PF GI-POF (*Perfluorinated polymer Gradual Index Plastic/Polymer Optical Fiber*) comercial anunciada pela *Chromis Fiberoptics* nos EUA [4].

Historicamente as POFs têm seu uso limitado por conta da pouca transparência óptica. Apesar disso, desde os anos 70, novas gerações dessas fibras vêm sendo continuamente aperfeiçoada pelas indústrias japonesas, com uma transparência cada vez mais satisfatória, maior capacidade de transmissão dos sinais e melhoria em suas propriedades térmicas e químicas. Tal dado corrobora com o fato de que em 1996 a tecnologia de POFs foi considerada suficientemente madura e então definitivamente aceita como de interesse para comunicações de dados para enlaces de curto alcance (inferior a 10 Km).

As POFs de Poli-Metil-Metacrilato (PMMA) – utilizadas nos estudos experimentais do presente trabalho - são as mais populares, porém, devido à sua curva de atenuação, só permitem propagação de luz infravermelha em distâncias de até 20 m. Entretanto, utilizando emissores operando no espectro de luz visível, podem-se construir enlaces de até 500 m [4] de alcance. Para construir enlaces com POFs de PMMA, o emprego de LEDs é bastante conveniente devido a algumas razões como: facilidade de conexão, robustez, custo, larguras de banda compatíveis e segurança ocular. Embora existam relatos de LEDs moduláveis em até 7 GHz [5] ainda em fase de pesquisa, os modelos comerciais possuem banda limitada a poucas centenas de MHz. Em particular, os LEDs visíveis utilizados com POFs de PMMA possuem limitação de banda em cerca de 80 MHz [4], aplicações na transmissão de FM-sobre-POF (> 100 MHz) foram relatadas [6].

A maioria das POFs disponível comercialmente é multimodal. Em enlaces de curta distância em que a atenuação não é um empecilho, a limitação da banda analógica do canal se deve fundamentalmente à dispersão modal [4]. No entanto, o uso de técnicas de multiplexação vem se mostrando extremamente útil para contornar esse problema [4] [2]. Por exemplo, a multiplexação por Divisão em Comprimento de Onda (*WDM*) é uma técnica bastante conhecida e útil para explorar a enorme capacidade de transmissão de uma fibra óptica [2] [4] graças à utilização de múltiplas fontes ópticas operando em diferentes comprimentos de onda.

Para a realização de qualquer comunicação é necessário que se tenha o emissor de um sinal, um meio por onde esse sinal se propaga e o receptor. No domínio óptico não é diferente [7]. Com o desenvolvimento intensivo das fibras

ópticas de sílica (Si) Multimodo (MM) e Monomodo (SM) - *Multimode & Single Mode* - em 1970 pela *Corning Glass Corp.* [4] a utilização de fibras ópticas plásticas foi preterida por conta da grande capacidade e baixa degradação em enlaces de longa distância de fibras ópticas de sílica, o que viabilizaria uma comunicação de altíssimo desempenho e elevadas taxas de transmissão de dados. Por isso, principalmente, o interesse no desenvolvimento tecnológico das fibras de sílica se em escalas maiores, bem como os outros componentes que, combinados a ela, completam essa comunicação.

1.2 APLICAÇÕES DAS POFS E LEDS

As facilidades de manuseio, baixo custo do material, simples métodos de elaboração e segurança de operação das fibras de plástico, as tornam um material atrativo para trabalhos didáticos de comunicações ópticas e desenvolvimento, principalmente, nas seguintes áreas:

1.2.1 Redes Industriais & Informática

Por não serem suscetíveis a ruídos eletromagnéticos podem ser instaladas em áreas industriais alimentadas por fiações onde trafegam correntes elétricas de alta amperagem, tal qual atmosferas tóxicas e explosivas, para comunicação e controle das máquinas que operam nesses ambientes. Pode-se utilizar também para interconexão de robôs industriais.

Essas fibras têm também uma grande utilidade em computadores e periféricos, pois elimina o “loop da terra” e transientes elétricos causados por surtos

de energia e tempestades, por exemplo. Além proporcionar altas taxas de transferência de dados entre eles, sem gerar indução eletromagnética.

1.2.2 Redes automotivas

Os carros inteligentes (*smart cars*) em projeto na Europa estão substituindo grande parte da sua fiação elétrica pelas fibras de plástico. A razão está nas propriedades químicas e mecânicas da guia que as tornam mais flexíveis e menos suscetíveis a superaquecimento, ao trafegar qualquer tipo de informação. Porém há um cuidado na disposição dessas fibras em áreas perto do motor, por exemplo, que emana uma quantidade significativa de calor, porque, se isso ocorrer à fibra plástica, pode perder suas propriedades e talvez sua aplicação fique comprometida. Por isso existem POFs especiais, de policarbonato, por exemplo.

1.2.3 Redes LAN – *Local Area Network* e de acesso

A utilização de POFs é altamente competitiva para aplicações em LANs e acesso a última milha. Isso se observa, pois comparado aos cabos metálicos, tem um peso e tamanho menor, e mais alta capacidade; Imunidade a interferências eletromagnéticas advinda das redes elétricas e de raios; Fácil multiplexação óptica; Isolamento elétrico entre os dispositivos terminais interconectados e segurança na transferência de dados.

Em alguns edifícios no Japão já existe redes de POF de tecnologia Lucina™, instalada em edifícios – FTDD *fiber to the desk*.

1.2.3.1 Visible Light communication - VLC

Trata-se de um meio de transferência de dados que utiliza a luz visível (780 – 375nm) para comunicação sem fio. Como subsistema de tecnologia de comunicação óptica, utiliza lâmpadas fluorescentes comuns para transmitir sinais em 10 Kbit/s ou LEDs para transmitir até 500 Mbit/s [8].

É uma tecnologia que, por exemplo, aproveita a luz emitida por um LED branco para iluminação do ambiente e a filtra, de modo a utilizar somente os comprimentos de onda que apresentam propriedades favoráveis à comunicação. Por exemplo, o azul que tem uma resposta mais rápida.

Em Janeiro de 2010 uma equipe de pesquisadores da *Siemens e Fraunhofer Institute* demonstrou uma transmissão de 500 Mbit/s com um LED branco, numa distância de 5 metros e recentemente, sistemas indoor de VLC vêm se tornando bastante atrativos no mercado.

1.2.4 Enlaces submarinos

Enlaces sem fios submarinos são utilizados por conta das altas taxas de dados que podem ser transmitidas quando comparadas a sistemas acústicos e baixa atenuação de percurso quando comparado a sinais de RF na água, além do baixo custo. Os LEDs azul-verde tem uma mínima atenuação por espalhamento e absorção [9], em comparação com outros comprimentos de onda.

As principais aplicações são de monitoramento em empreendimentos submarinos, observação ao vivo de condições submarinas, compilação de

informações de sensores espalhados no fundo do mar para exploração das vidas submarinas e veículos autônomos de trabalho submersos [10].

1.3 OBJETIVO

De certa forma os estudos sobre as fibras plásticas são uma repetição daqueles realizados em fibras de vidro, na maioria dos casos, daqueles já alcançados, pois o que se realiza é uma adaptação da tecnologia existente. Porém as POFs têm um mercado mundial de aplicações como a área medicinal, automotiva, de consumo eletrônico, interconexão entre outros, já citados anteriormente. Esses mercados que motivam a evolução desses componentes optoeletrônicos.

As distorções que surgem em enlaces analógicos são devidas principalmente à resposta não linear das fontes ópticas. Uma técnica para quantificar a curva dinâmica de potência óptica de saída x tensão elétrica do sinal de entrada ($P \times V$) que caracteriza a não-linearidade de um enlace consiste em primeiramente injetar de 1 e 2 tons de sinal (V) em diversas frequências e medir a resposta (P). A seguir, de posse dos resultados experimentais, aplica-se a teoria das séries de Volterra [11] para obter a resposta $P(V)$ na forma de polinômios. Trata-se de um processo bastante trabalhoso.

O único trabalho encontrado foi realizado por Roberto Gaudino o qual descreve uma técnica mais simples e direta, que permite obter na tela de um osciloscópio a resposta dinâmica $P(V)$, restando então apenas fazer um ajuste matemático para descobrir o seu formato . O artigo [12] trata então da

caracterização de distorção dinâmica de LEDs verdes, porém utilizando um sinal injetado da forma triangular e com frequência de repetição limitada em 100 kHz, a fim de garantir o regime sem-memória temporal (memory-less) e um desacoplamento de efeitos térmicos, conforme explicado adiante. O propósito do trabalho, é caracterizar as não-linearidades dos LEDs através de equações matemáticas e a partir daí sugerir métodos matemáticos que realizem uma pré-distorção (compensação).

O objetivo principal do presente trabalho é medir e modelar matematicamente a curva PxV de LEDs visíveis puros e em combinação com enlaces de POF, com o propósito de ter o domínio matemático dessa não-linearidade. Para um sistema emissor mais fiel, a utilização de modulações diretas mais robustas seria viabilizada com uma redução expressiva de erros. Possibilitando uma elevada taxa de transmissão de dados.

Analisa-se os LEDs, e seus distintos comportamentos na medida em que se variam os comprimentos de onda de operação dos componentes. Verificou-se sua largura de banda de operação, as curvas de tensão em função da corrente, para analisar a área de operação, bem como a distorção destes componentes quando modulados, por um conjunto de senóides.

No próximo capítulo, é realizada a revisão bibliográfica, enfatizando os dispositivos e materiais utilizados nas experiências laboratoriais. São tratados os dispositivos optoeletrônicos de maneira macro, e a teoria que cerca os LEDs e fotodetectores (*PD-photodetectors*). As propriedades das fibras ópticas plásticas também serão abordadas, bem como os princípios de comunicações ópticas

analógicas: Ganho de Radiofrequência (RF); Largura de banda; Ruído e Distorção de 2^a (harmônicos) e 3^a (produtos de intermodulação) ordens.

Por fim, um estudo detalhado acerca das não-linearidades dos LEDs, analisando as propostas expostas na série de Volterra [11] e na compensação [12].

O terceiro capítulo tratará da descrição dos resultados das caracterizações dos LEDs no modo estático. Serão enfatizadas as propriedades dos LED Diemount [13], bem como sua caracterização estática (curvas I_xV , P_xV , P_xI e espectro óptico), análise da largura de banda de operação dos LEDs e caracterização dinâmica da não-linearidade e distorção dos componentes, sem realização de enlace com POFs e misturador de modos.

O quarto capítulo abordará a caracterização dinâmica da banda e não-linearidade dos enlaces com POFs. Quais seriam as contribuições e diferenças apontadas, quando se utiliza uma fibra óptica de 40m de comprimento.

O quinto capítulo será responsável por apresentar as discussões e ponderações, sugerindo trabalhos futuros, além de concluir a dissertação.

2. REVISÕES BIBLIOGRÁFICAS

No presente capítulo será feita uma revisão bibliográfica sobre os componentes que foram utilizados em bancada. O interesse é detalhar as propriedades e funcionamentos dos equipamentos, dando mais ênfase aos componentes que foram explorados durante as atividades. Neste caso os LEDs ultrabilhantes serão mais discutidos e detalhados, bem como a abordagem dos fundamentos de comunicações analógicas.

Porém, a fim de contextualizar, é importante saber qual a contribuição desse dispositivo num enlace de comunicações ópticas. Ressalta-se que todos os principais componentes de um enlace óptico serão abordados, contudo, não com a mesma ênfase [7].

Na Figura 1 a seguir, apresentam-se três componentes primários num enlace analógico óptico: Um transmissor óptico, uma fibra óptica e um receptor óptico. No transmissor o sinal de entrada modula a luz emitida através de um emissor óptico, que tem seu foco voltado para o interior do cabo de fibra óptica, o mais centralizado possível. Essa fibra transfere o sinal óptico modulado para o receptor, que faz a conversão do sinal óptico em sinal elétrico [7].

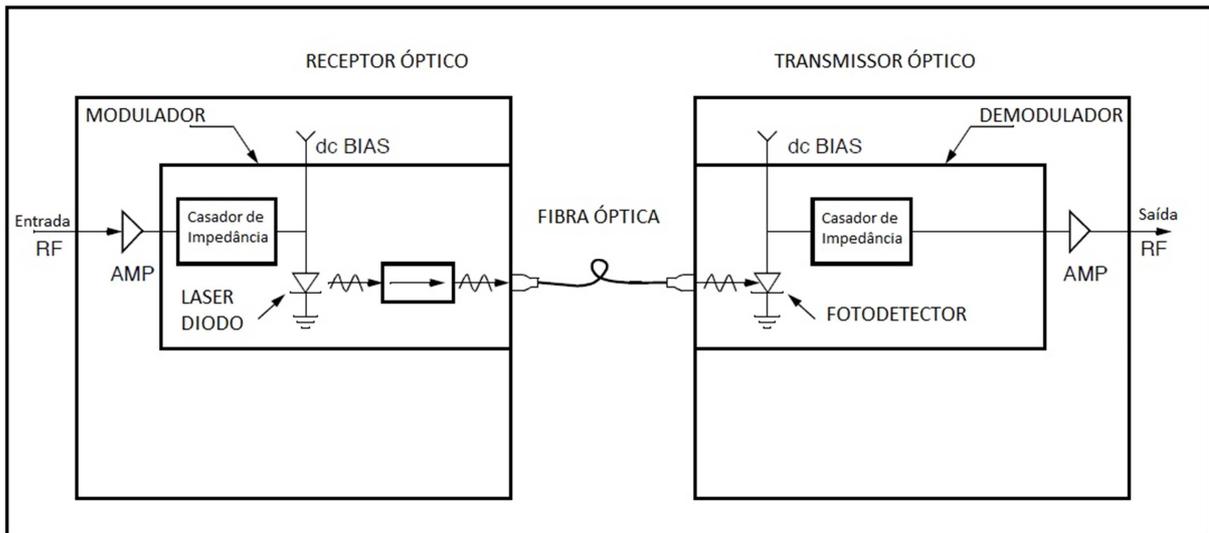


Figura 1: Esquema básico de Comunicação Óptica analógica

2.1 OPTOELETRÔNICA

2.1.1 LED

Em sistemas ópticos, onde feixes de luz gerados por uma fonte que carrega a informação, lasers diodos e diodos emissores de luz – LED - são dois dos mais comuns emissores. Seus tamanhos bem reduzidos são compatíveis com os pequenos diâmetros da fibra, e suas estruturas sólidas de baixo consumo elétrico são compatíveis com a moderna construção compacta dos eletrônicos.

Na maioria dos sistemas operando abaixo de alguns GHz (ou poucos Gbit/s), as informações são postas dentro de um feixe de luz óptico por modulação da fonte de corrente de entrada do sinal, o que caracteriza a modulação interna de um

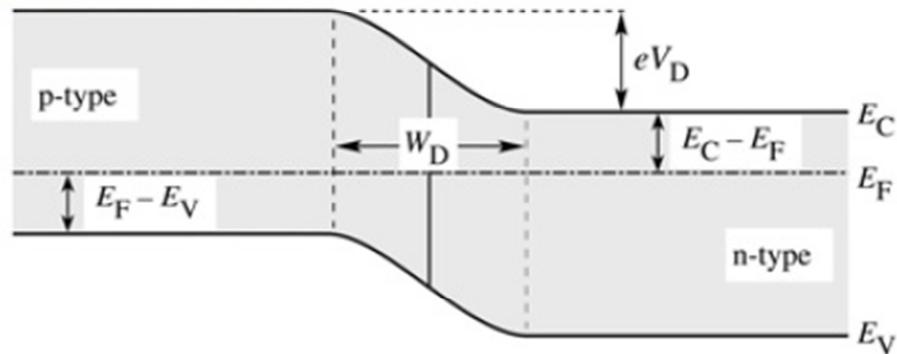
emissor óptico, ou seja, quando se modula diretamente o estímulo elétrico para a geração de luz. As modulações externas são consideradas quando existe interesse em ultrapassar essas taxas mais altas, e assim trabalhar na modulação da luz gerada após ser excitada pela corrente de bias, responsável por alimentar o emissor na região de interesse. A explanação sobre o LED inclui também princípios de operação e modulação.

2.1.1.1 Propriedades elétricas

Dada uma junção p-n em semiconductor, considera-se uma abrupta junção com concentração N_d de material doador e N_a de material aceitador. Todos os dopantes são assumidamente, para fins didáticos, completamente ionizáveis, então a concentração é $n = N_d$ e a concentração de buracos livres é $p = N_a$. Também é assumido que a não compensação de dopantes ocorre através de impurezas e defeitos não intencionais.

Na vizinhança de uma junção p-n não polarizada, elétrons gerados pelo doador do lado tipo n difunde até o lado tipo p onde ele encontra alguns buracos onde é realizada a recombinação. Um processo semelhante ocorre com buracos que difundem para o lado tipo n. Como resultado, a região próxima a junção p-n é esgotada de portadores livres. Sendo conhecida como a região de depleção. A Figura 2, ilustra esta região.

(a) junção p-n sem bias



(b) junção p-n com bias

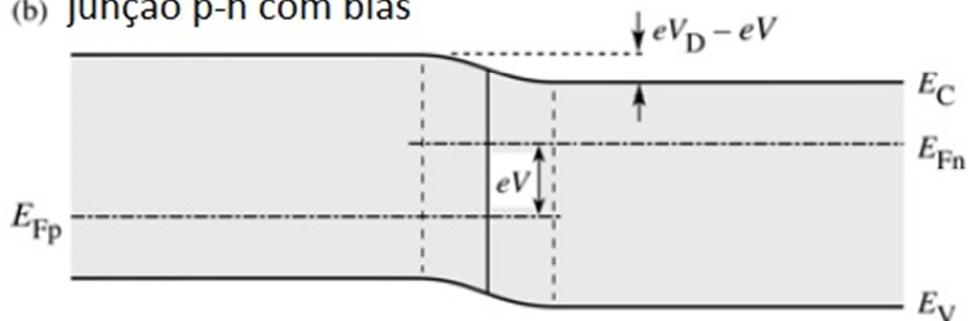


Figura 2: Junção p-n (a) sem tensão de bias e (b) com tensão de bias (polarização elétrica)

Na falta de portadores livres na região de depleção, a única carga na região é formada por doadores e receptores ionizados. Esses dopantes formam uma espessa região de carga, isto é, doadores no lado tipo n e aceptores no lado tipo p. Essa região de carga no espaço produz uma diferença de potencial que é chamado de tensão de difusão. Esta representa a barreira que os portadores livres devem ultrapassar a região do tipo oposto de condutividade.

A região de depleção forma uma barreira potencial altamente resistiva pois a área é desprovida de portadores livres. Uma tensão de bias aplicada externamente

aumenta e diminui a barreira da junção p-n para alimentação reversa e direta, respectivamente.

LEDs constituem-se essencialmente de pelo menos uma junção p-n formada por materiais semicondutores de banda direta, capazes de emitir luz quando os portadores injetados se recombinam [14].

2.1.1.2 Propriedades Ópticas

A região ativa de um LED ideal emite um fóton para cada elétron injetado. Cada partícula de carga quântica – elétron – produz uma partícula de luz quântica – fóton. Portanto uma região ativa ideal tem eficiência quântica, com valor unitário. A eficiência quântica interna é definida como:

$$\eta_{int} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de fotons emitidos na região ativa por segundo}}{\text{n}^{\circ} \text{ de elétrons injetados dentro do LED por segundo}} = \frac{P_{int}/(hv)}{I/e}$$

Equação 1

onde P_{int} é a potência óptica emitida pela região ativa e I é a corrente injetada.

Fótons emitidos pela região ativa devem ultrapassar o encapsulamento do LED. Num modelo ideal todos os fótons emitidos pela região ativa são também irradiados para o espaço livre. Num LED real nem todo fóton emitido pela região ativa vai para o espaço livre, alguns podem nunca sair da estrutura do dispositivo, ocasionados, por problemas mecânicos, por exemplo. A luz emitida pela região ativa pode ser reabsorvida pela região do substrato, se for de sua propriedade a absorção

para aquele comprimento de onda. A luz pode ser sugada pela superfície metálica do dispositivo, além do fenômeno de total reflexão interna, chamado também de luz confinada, reduzindo a capacidade da luz em irradiar externamente à estrutura do semiconductor. A eficiência de extração desses fótons é dada como:

$$\eta_{\text{extração}} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de fótons emitidos no espaço livre por segundo}}{\text{n}^{\circ} \text{ de fótons emitidos na região ativa por segundo}} = \frac{P/(h\nu)}{I/e}$$

Equação 2

onde P é a potência óptica emitida no espaço livre.

A eficiência de extração pode ser uma severa limitação para LEDs de alto desempenho. É bastante complexa uma extração acima de 50% sem fazer uso de sofisticados e custosos processamentos do dispositivo [15].

A eficiência quântica externa é:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ext}} &= \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de fótons emitidos no espaço livre por segundo}}{\text{n}^{\circ} \text{ de elétrons injetados dentro do LED por segundo}} = \eta_{\text{quântica externa}} = \frac{P/(h\nu)}{P_{\text{int}}/(h\nu)} \\ &= \eta_{\text{int}} \eta_{\text{extraction}} \eta_{\text{extração}} \end{aligned}$$

Equação 3

Esse parâmetro dá a razão entre o número de partículas úteis pelo número de partículas de carga.

A eficiência óptica é definida como:

$$\eta_{\text{optica}} = \frac{P}{IV}$$

Equação 4

onde IV é a potência elétrica provida pelo LED.

2.1.1.2.1 *Espectro De Emissão*

O LED tem como propriedade a emissão espontânea de luz e recombinação do par elétron-buraco, além de simultânea emissão de fóton. O processo de emissão espontânea é fundamentalmente diferente do processo de emissão estimulada que ocorre em diodos lasers.

O processo de recombinação é ilustrado no esquema da Figura 3 a seguir. Elétrons na banda de condução e buracos na banda de valência têm sua distribuição parabólica da seguinte forma:

$$E' = E_C + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_e^*},$$

Equação 5

para elétrons e

$$E = E_V + \frac{(h/2\pi)^2 k^2}{2m_h^*},$$

Equação 6

para buracos. Onde $2m_e^*$ e $2m_h^*$ são as massas efetivas dos elétrons e dos buracos, h é a constante de Planck, k é o número da onda portadora, e E_V e E_C são as bordas das bandas das camadas de valência e condução, respectivamente [16].

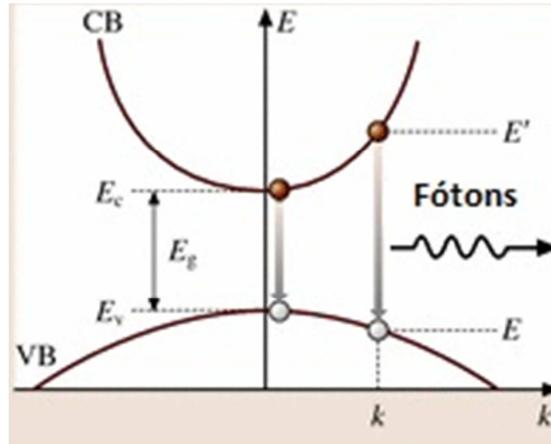


Figura 3: Dispersão parabólica de elétron e buraco

A condução de energia e conservação de momento leva ao princípio do mecanismo de recombinação radiativa, que segue a distribuição de Boltzmann em que elétrons e buracos têm uma média de energia cinética igual a kT [4]. Pelo princípio da conservação de energia, a energia do fóton é dada pela diferença entre a energia do elétron E_e e energia do buraco E_b , ou seja:

$$h\nu = E_e - E_b \approx E_g$$

Equação 7

A energia do fóton é aproximadamente igual ao gap de energia, E_g , se a energia térmica é muito menor que esse gap de energia $kT \ll E_g$ então o

comprimento de onda da emissão de um LED pode ser atribuído somente pela escolha do material semiconductor dado a respectiva energia de gap. Por exemplo, GaAs tem um *bandgap* de 1,42V em temperatura ambiente então um LED de GaAs emite no infravermelho, de 870nm de comprimento de onda. Dado que:

$$v = 2\pi f$$

Equação 8

A quantidade total de energia de gap, dada pelo comprimento do espectro na metade do máximo de emissão óptica é exposta na equação a seguir:

$$E = 1,8kT$$

Equação 9

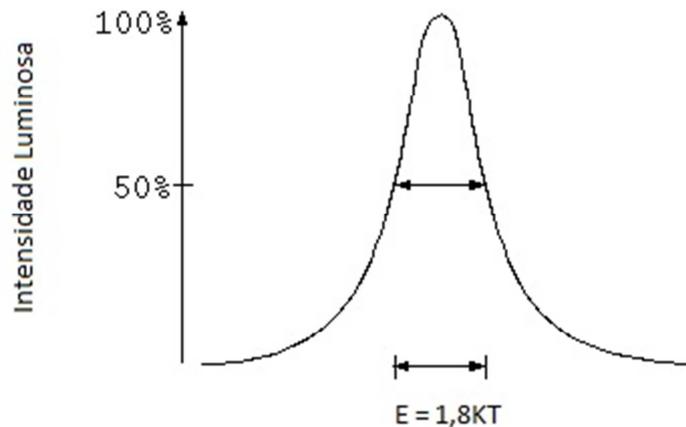


Figura 4: Energia de gap de um dado LED

Observando o comportamento da curva de intensidade luminosa, através de um espectrômetro, exemplificada na Figura 4 a cima, tem-se o $\Delta\lambda$, em que se alcançam os valores de diferença de potencial. Por exemplo, numa temperatura

teórica ambiente, a largura da linha do LED GaAs emitindo em 870nm é $\Delta E = 46meV$ ou $\Delta\lambda = 28nm$.

O comprimento espectral da emissão do LED é importante em vários aspectos: Primeiramente porque a banda de emissão do LED que emite em um dado comprimento de onda do espectro visível é relativamente estreito, comparado com todo o espectro do visível. Por exemplo, a abrangência da cor vermelha é a faixa de 625 até 730 nm, o qual é muito maior que a emissão típica de emissão do espectro do LED. Além disso, fibras ópticas são dispersivas, e têm seus níveis de atenuação para diferentes comprimentos de onda, além trabalhar com uma faixa de diferentes velocidades de propagação para um pulso formado por uma gama de comprimento de onda. Essa dispersão material nas fibras limita as taxas de transmissão alcançáveis, pelo LED, graças a essa propagação. Por isso o interesse da faixa na qual o emissor transmitirá.

2.1.1.2.2 *Cone De Luz Emitido*

A luz gerada dentro de um semicondutor tem a possibilidade de não escapar do encapsulamento se há uma total reflexão na interface ar – semicondutor, ou, caso o ângulo de incidência do feixe seja próximo da incidência normal, a luz tem maiores possibilidades de sair do semicondutor. A reflexão total ocorre para raios de luz com incidência oblíqua em que não há refração do mesmo, descoberto o valor desse ângulo, define-se o cone de luz de emissão do semicondutor. A reflexão

interna total reduz a eficiência externa significativamente em particular para LEDs fabricados com materiais de alta refração, conforme já abordado anteriormente e ilustrado na Figura 6 a seguir [16].

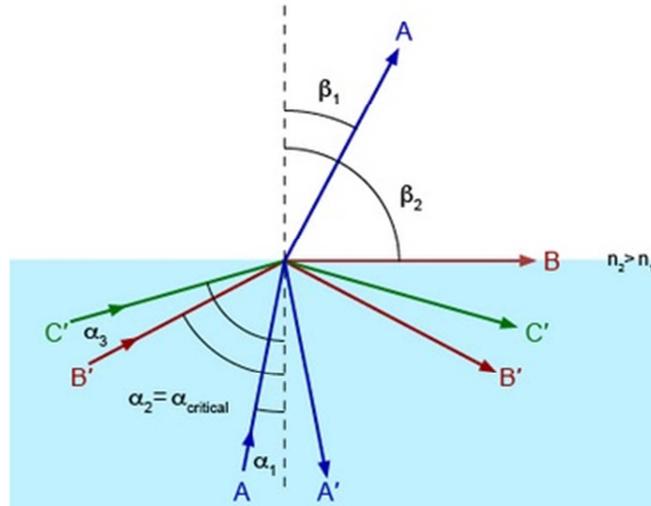


Figura 5: Reflexão, refração e reflexão total

Considerando-se que dentro do semicondutor o ângulo de incidência na interface semicondutor – ar é dado por α , e o ângulo de incidência do raio refratado é dado por β . É possível inferir da lei de Snell escrita na equação 10:

$$\overline{n_s} \operatorname{sen} \alpha = \overline{n_{ar}} \operatorname{sen} \beta$$

Equação 10

onde $\overline{n_s}$ e $\overline{n_{ar}}$ são os índices de refração do semicondutor e do ar, respectivamente. Para obter o ângulo crítico deve-se considerar $\beta = 90^\circ$, assim ter-se-á o ângulo, cuja reflexão é total, da seguinte forma, a partir da equação 11:

$$\operatorname{sen} \varphi = \overline{n_{ar}} / \overline{n_s}$$

Equação 11

Como os índices de refração dos semicondutores são relativamente grandes, por exemplo, o índice do GaAs é de 3,4, o ângulo crítico para uma reflexão total concomitantemente é bem reduzido. Nesse caso, o seno do ângulo é aproximadamente o mesmo valor do ângulo, conforme a equação 12:

$$\varphi_c \approx \overline{n_{ar}} / \overline{n_s}$$

Equação 12

O ângulo calculado como o de reflexão total é o mesmo que define o cone de luz emissora. Isso significa que para a luz emitida internamente a esse cone garante-se que ela escapará do semicondutor, enquanto a que for emitida fora do cone estará sujeita a porção que será refletida internamente.

O cálculo da área superficial do cone espectral, com raio “r” a fim de determinar a fração total de luz que é emitida dentro do cone de luz emissor é a área da superfície da calota dada pela seguinte integral:

$$A = \int_{\varphi=0}^{\varphi_c} dA = 2\pi r^2 (1 - \cos\varphi_c)$$

Equação 13

onde r é o raio da superfície esférica do LED e φ_c , o ângulo de corte, a partir do qual se tem reflexão total.

Se assumir que o ponto de emissão de luz é omnidirecional de potência P_{fonte} e que irradiaria luz em todos os sentidos uniformemente pode-se considerar que a

potência que escapa através do cone emissor de luz pode ser proposta na equação 14:

$$P_{cone} = P_{fonte} \frac{2\pi r^2(1 - \cos\varphi_c)}{4\pi r^2}$$

Equação 14

onde $4\pi r^2$ é a superfície completa da esfera emissora.

O cálculo apresentado indica que somente uma parte da energia óptica produzida escapa do encapsulamento do semiconductor, esse número pode ser mensurado através da seguinte equação15:

$$\frac{P_{cone}}{P_{fonte}} = \frac{1}{2}(1 - \cos\varphi_c)$$

Equação 15

Por conta do material com alto índice de refração, o ângulo crítico de reflexão total é bem pequeno e o cosseno pode se expandido dentro da série de potência na equação 16 a seguir:

$$\frac{P_{cone}}{P_{fonte}} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{\varphi_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \varphi_c^2$$

Equação 16

Usando a aproximação da equação17:

$$\frac{P_{cone}}{P_{fonte}} \approx \frac{1}{4} (\overline{n_{ar}} / \overline{n_s})^2$$

Equação 17

O problema de escape de luz é significativo quando tratamos LEDs de grande eficiência. Na maioria dos semicondutores a refração é relativamente alta (maior que 2,5) então uma porcentagem baixa da luz gerada no semicondutor escapa de um LED plano. O problema é menos significativo em semicondutores com pequeno índice de refração e polímeros.

2.1.1.2.3 *Relação entre temperatura e intensidade*

A intensidade da potência óptica emitido pelos LEDs decai com o aumento da temperatura, essa queda se dá devido a alguns fatores de dependência das propriedades do LED com o calor, tais como: Recombinação não radiativa através de níveis baixos; Recombinação na superfície e perda de portadores sobre barreiras de heteroestruturas.

A dependência de temperatura dos LEDs, são descritas pela equação 18:

$$I = I|_{0K} \exp(-T/T_1)$$

Equação 18

onde T_1 é a temperatura característica que descreve a relação de temperatura do LED. Uma alta temperatura característica é desejável, pois implica numa baixa dependência.

É interessante observar que tanto o LED quanto os lasers semicondutores tem dependência distintas de temperatura da intensidade de emissão I . A

dependência é dada a partir da mesma fórmula, porém possui parâmetros diferentes da temperatura característica T_1 .

Resultados experimentais da dependência de temperatura em relação à intensidade luminosa são demonstrados na a seguir. Nela é exibida a dependência para correntes constantes nos materiais de AlGaInP/GaAs, emitindo no comprimento de onda do vermelho e GaInN/GaN, emitindo no comprimento de onda do azul e do verde.

A análise desse gráfico revela que o LED azul tem o maior T_1 e o LED vermelho tem um menor. Isso não é surpresa desde que o LED azul tenha os poços quânticos mais fundos, por isso os confinamentos das portadoras são bastante eficientes em estruturas de GaInN/GaN.

A dependência de temperatura de intensidade de emissão óptica mostrada revela que os diodos nitrogenados tem uma dependência de temperatura menor que os LEDs de AlGaInP, por exemplo. Dois fatores contribuem para essa independência. Primeiramente as barreiras de ativo-confinamento são maiores em gap de sistemas de materiais nitrogenados. Conseqüentemente, portadoras na região ativa de GaInN são muito bem confinadas. Portanto vazamento em portadoras fora dos poços e de transbordo de portadoras tem menos relevância em LEDs de GaInN. Além disso, AlGaInP tem transições diretas e indiretas do gap na ordem de 555nm. Em elevadas temperaturas, os vales indiretos se tornam progressivamente cheios, então a eficiência radioativa decresce [16].

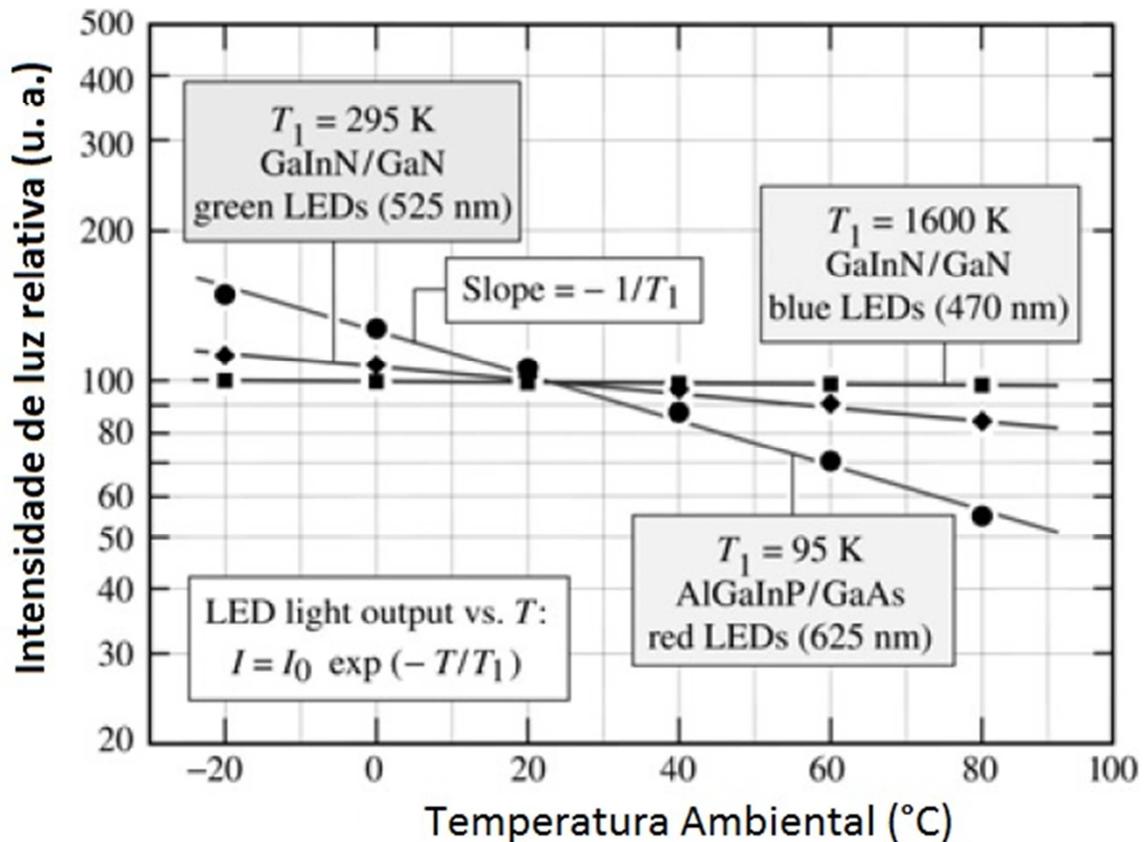


Figura 6: Variação da intensidade luminosa em função da Temperatura ambiente

2.1.1.3 LEDs Ultrabrilhantes

A melhoria na eficiência luminosa dos LEDs de espectro visível tem sido contínua.

Objetivando uma grande eficiência luminosa e um baixo custo de fabricação, comparado com LEDs verdes de GaIn, LEDs âmbar são utilizados em aplicações que tem alto brilho e baixo consumo de potência. Nos anos oitenta, grandes redes

eram feitas com alimentadores de lâmpadas incandescentes energizadas por geradores elétricos que, quando ligados, eram alimentados por motores de gasolina. Hoje em dia essas fontes de alimentação elétrica dos LEDs âmbar, por exemplo, são energizados por células fotovoltaicas durante o dia e bateria durante a noite. O que demonstra um grande avanço no consumo elétrico desses dispositivos utilizados para iluminação.

Os LEDs de GaAsP e GaP:N são dispositivos com mais baixo custo e eficiência. Tais LEDs não podem ser substituídos em aplicações de ultrabrilhantes devido a sua inerente ineficiência quântica. O desacoplamento do substrato de GaAs causa nos LEDs de GaAsP uma eficiência interna baixa. Já o GaP:N tem uma baixa eficiência interna por conta de Nitrogênio como impureza [16].

Não somente a eficiência luminosa como também a potência total emitida pelo LED é importante para muitas aplicações, em particular onde grande fluxo de luminosidade é requerido. Esses são os casos de semáforos e aplicações de iluminação. Onde fontes de luz de grande potência como os bulbos incandescentes podem ser facilmente substituídos por provedores de luz mais potentes e de mais baixo consumo energético.

O espectro de emissão óptica dos LEDs vermelho, azul, verde e âmbar estão exibidos no esquema a seguir, Figura 7, serão os abordados nas caracterizações experimentais. Comparações entre seus espectros ópticos revelam que o verde tem um espectro mais largo que os outros. O alargamento do espectro de emissão se dá

por conta de flutuações aleatórias das componentes químicas do material ativo, o que acarretará em um alargamento espectral além dos $1,8kT$, comprimento de onda térmico esperado.

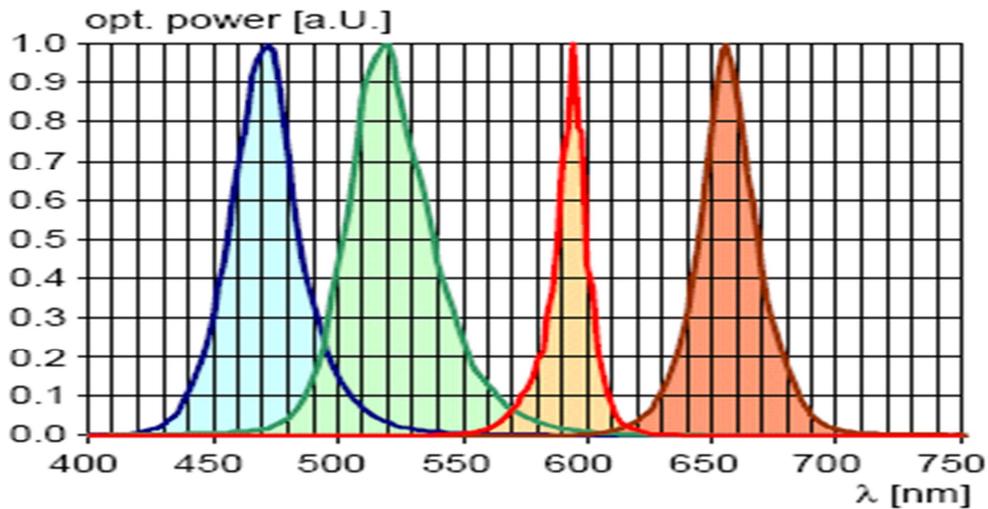


Figura 7: Espectro visível

2.1.1.3.1 Característica elétricas dos LEDs visíveis

As caracterizações da corrente em função da tensão dos LEDs verde, azul e vermelho estão exibidas na Figura 8 a seguir. Uma inspeção mais detalhada da tensão direta para 1 mA do LED verde ($V = 2,65V$) indica similaridade para o LED azul ($V=2,75V$) mesmo sabendo que a energia de emissão dos dois são significativamente diferentes ($\lambda_{\text{azul}} = 470 \text{ nm}$, $h\nu_{\text{azul}} = 2.64 \text{ eV}$; $\lambda_{\text{verde}} = 525 \text{ nm}$, $h\nu_{\text{verde}} = 2.36 \text{ eV}$). A pequena diferença entre as duas correntes de excitação indicam que as portadoras perdem energia pela emissão de fótons quando injetado pela barreira de GaN na região ativa de GaInN. O que acontece quando são injetados pela

barreira de GaN dentro da região mais rica de In do LED verde. Essa energia, dissipada pela emissão dos fônons é suprida pela tensão externa aplicada ao LED [4].

A resistência em série do diodo pode ser inferida pela curva de caracterização $I \times V$. Os LEDs azul e verde têm uma alta resistência, maior que a do vermelho. Essa maior resistência pode ser atribuída a uma série de fatores incluindo a resistência “lateral” na camada divisora de tipo n, encontrado em substratos de safira, grandes efeitos de polarização que ocorrem em material nitrado, mais baixa condutividade na camada de proteção, e maior contato resistivo tipo p. A mais baixa condutividade do tipo p é devida a uma maior energia ativa no aceitador (aproximadamente 200meV) em GaN e GaInN portanto uma pequena porção dos aceitadores é ativada [17].

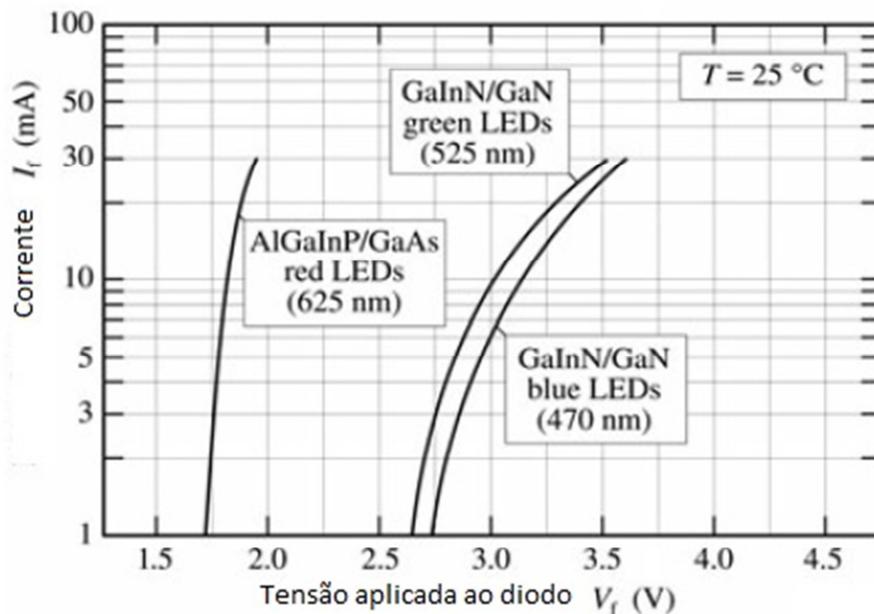


Figura 8: Corrente em função da tensão aplicada

Para todos os diodos mostrados, a tensão aplicada decai com o aumento da temperatura. A queda em tensão direta é devido ao decaimento da energia de gap. Nos diodos emissores de luz azul e verde de GaInN, a mais baixa tensão é também função do decaimento em série da resistência que ocorre em altas temperaturas. Esse decaimento da resistência ocorre devido a níveis mais altos de ativação dos aceitadores que ocorrem em temperaturas mais altas e o resultado da alta condutividade das camadas de GaN e GaInN do tipo p [17].

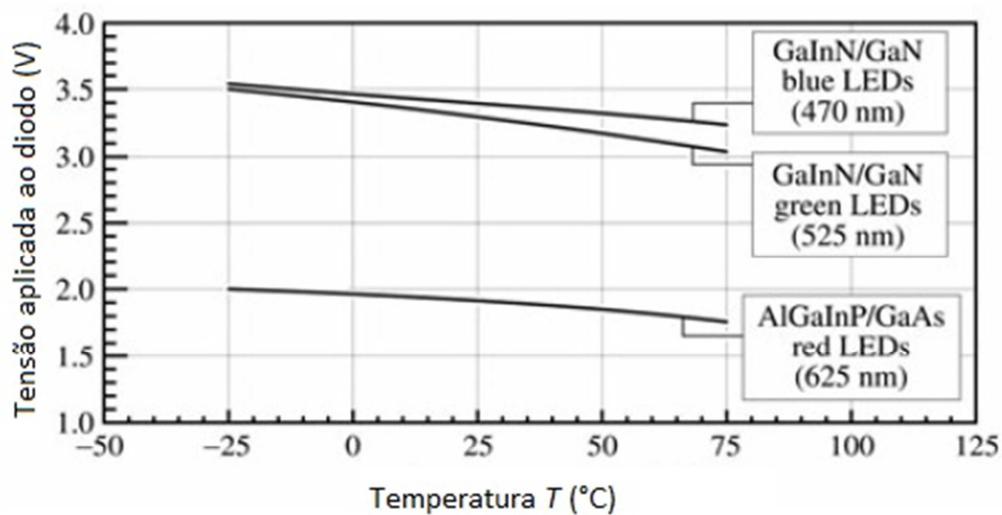


Figura 9: Relação da Tensão aplicada com a temperatura

2.1.2 Diodo Laser

A intensidade óptica do diodo laser é descrita através do gráfico simplificado (Potência X Corrente), apresentado na Figura 10 a seguir. Quando o laser diodo é alimentado com uma corrente de bias, I_0 , maior que a corrente limiar de seu

funcionamento, I_{th} , a potência óptica tem acréscimo aproximadamente linear com a corrente de entrada [7].

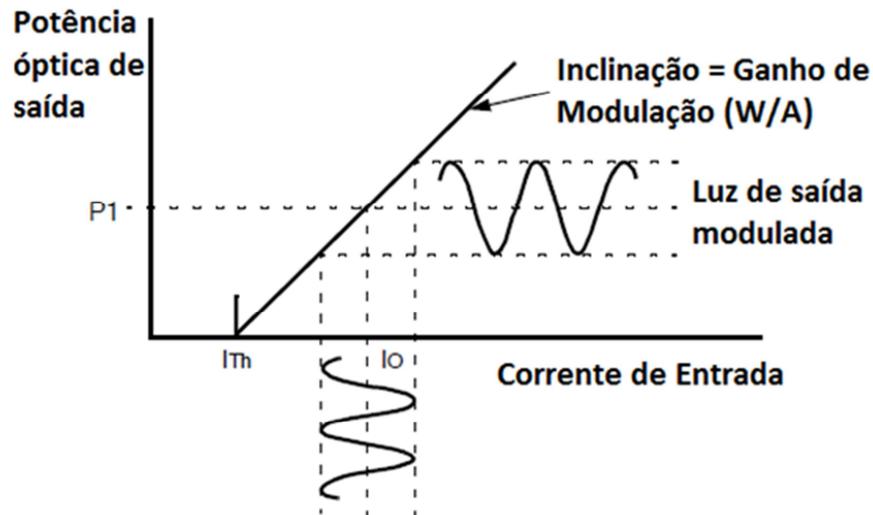


Figura 10: Ganho de modulação do transmissor óptico

A eficiência da conversão de corrente elétrica em luz emitida, é dada da forma com que essa inclinação da curva (Pot. X Cor.) se apresenta. Existe uma enorme variação desse ganho de modulação típico devido a diferentes modos de acoplamento da luz por conta das frequências. Portanto deve ser especificado se o valor é devido a ganho de corrente contínua ou alta frequência [7].

Além do laser diodo, existe uma vasta gama de transmissores ópticos, que variam suas aparições em estudos e experimentos, de acordo com a necessidade e particularidade de cada projeto. Por exemplo, num projeto em que se necessite de praticidade e robustez do circuito aconselha-se o uso de LED que, apesar de não serem tão refinados, são mais resistentes. Enquanto para um sistema que necessite

de uma precisão maior, indica-se um laser, porém é muito mais frágil, vulnerável e suscetível a avarias durante o manuseio.

Com o avanço contínuo do desenvolvimento dos componentes optoeletrônicos, principalmente emissores ópticos, conforme já abordado anteriormente, há desenvolvimento desses componentes para as mais diversas aplicações, no caso dos lasers diodos, são utilizados para uma eficiência maior em comunicações de dados.

2.1.3 Fotodetectores

O olho pode ser considerado um fotodetector, pois capta a luz externa e transforma em sinapses cerebrais, que identificam e interpretam a luz captada. Contudo esse fotodetector não seria utilizado em comunicações ópticas de alto desempenho, pois sua resposta é bem lenta, e sua sensibilidade é bem baixa, se comparada às requeridas nesses tipos de tecnologia. Além disso, a responsividade espectral do olho humano é bastante reduzida, limitada entre os comprimentos de onda de 0,4 até 0,7 μ m, não à toa esse espectro é chamado de visível.

Por isso, também, LEDs visíveis são úteis na realização de testes em fibras ópticas, pois quebras e discontinuidades podem ser testadas e constatadas visualmente pelo espalhamento da luz.

No presente t3pico ser3o analisados os dispositivos detectores de luz, que t3m como fun3o converter a energia dos f3tons em corrente el3trica. Dando-se mais 3nfase ao PIN fotodiodo, modelo de fotodetector utilizado nas pr3ticas laboratoriais.

As importantes propriedades dos detectores s3o reponsividade, espectro de detec3o e tempo de subida (banda). A responsividade, ρ , 3 a rela3o entre a corrente de sa3da do detector (i) e a pot3ncia 3ptica de entrada (P). A unidade da responsividade 3 representada por amp3res/watts, de acordo com a equa3o 19:

$$\rho = \frac{i}{P}$$

Equa3o 19

O espectro de detec3o se refere 3 curva de detec3o do dispositivo em fun3o do espectro do comprimento de onda da luz injetada. Por conta da grande variedade de responsividade dos detectores, para diferentes projetos de comunica3o 3ptica com vastos comprimentos de onda dentro de um espectro usam-se fotodetectores de caracter3sticas distintas, considerando as necessidades do usu3rio.

E o tempo de resposta, t_r , 3 o tempo em que 10 a 90% da corrente final de sa3da do fotodetector leva quando excitado por uma determinada pot3ncia 3ptica de varia3o degrau. Essa defini3o 3 an3loga 3quela utilizada para a explica3o do tempo de resposta do emissor. A frequ3ncia de corte, frequ3ncia de 3dB, representa

o valor em que a potência emitida pelo dispositivo decai em até 3dB, da frequência inicialmente experimentada.

$$f_{3dB} = 0,35/t_r$$

Equação 20



Figura 11: Tempo de resposta do fotodetector

2.1.3.1 Fotodiodo PIN

Mais utilizados em sistemas de fibra, o diodo PIN tem uma grande camada semicondutora intrínseca entre as regiões “p” e “n”, como ilustrado na Figura 12 a seguir. A camada intrínseca não tem cargas livres, por isso, sua resistência é bem alta e a tensão dos fotodetectores se resume a essa região sendo as forças de interação elétricas grandes dentro dela. Por conta dessa camada ampla, a chance

de absorção do fóton é maior que na região curta de “p” ou “n”. Isso aumenta a eficiência e a velocidade relativa de resposta do fotodiodo.

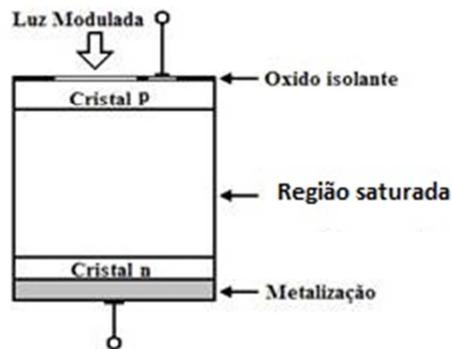


Figura 12: Esquema simplificado de fotodiodo tipo PIN

2.1.3.2 Comprimento de onda de corte

Para criar um par elétron-buraco um fóton deve ter energia suficiente para atravessar um elétron pela região saturada. Essa premissa, $hf \geq W_g$ leva ao comprimento de onda de corte expressa na equação 21:

$$\lambda = \frac{1,24}{W_g}$$

Equação 21

onde λ é representada em μm e W_g é a energia de bandgap em volts. Ou seja, está é a energia mínima para absorção de luz do fotodetector.

Na outra extremidade do link de fibra óptica, a luz é detectada por um receptor PIN de fotodiodo, o qual converte a luz incidente, novamente, em corrente elétrica. O comportamento do fotodiodo é ilustrado pela curva de responsividade

apresentada no gráfico a seguir. Nota-se, que esta é bastante linear. A inclinação dessa curva é a responsividade, tipicamente maior que 0,75mA/mW para um fotodetector de fotodiodo.

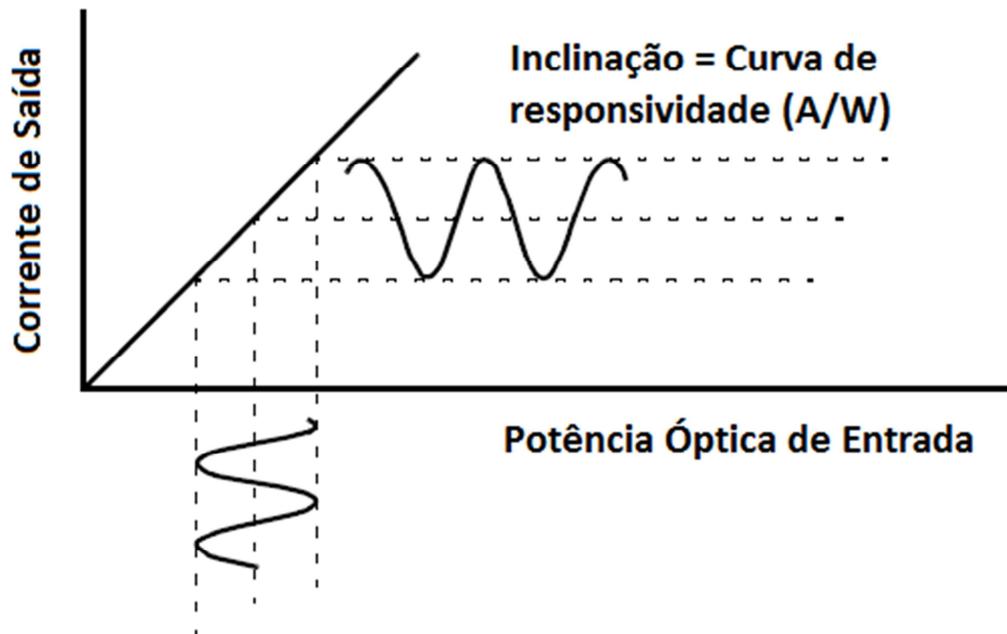


Figura 13: Responsividade do Receptor Óptico

Diferentemente dos emissores, os receptores de fotodiodo não variam com a temperatura. Portanto, um estabilizador de temperatura é completamente dispensável. Algumas precauções também são tomadas para minimizar a reflexão dos sinais luminosos de volta na fibra, o que causaria uma degradação no desempenho do enlace [7].

Alguns receptores podem contemplar uma pós-amplificação, como transformadores de banda larga, e/ou redes de casadores de impedância que trazem uma melhora na eficiência do enlace. Devido a toda essa generalidade de

sistemas de circuito elétricos, a eficiência num receptor é diferenciada somente se analisar a responsividade do chip de fotodiodo separadamente.

2.1.4 Fibra óptica de plástico

A fibra óptica é o terceiro componente primário de um link de comunicação óptica. Comparativamente à fibra multimodo, a fibra monomodo é mais utilizada por conta da sua menor dispersão e perda. Para um sinal cujo valor do comprimento de onda se enquadra em 1310nm, por exemplo, a atenuação óptica da fibra de sílica é abaixo de 0,4dB/Km. Enquanto que para comprimento de onda 1550nm, é menor que 0.25dB/Km.

Tipicamente a fibra é cabeada num tubo resistente e flexível, de 3mm de diâmetro e conectado aos transmissores e receptores munidos de reutilizáveis conectores ópticos. A natureza da emenda da guia facilita a montagem física de uma arquitetura de rede, possibilitando a execução de uma grande variedade de projetos com configurações bastante variadas.

O desempenho do transmissor e do receptor num enlace óptico linear depende também das características ópticas da fibra que está sendo usada. Os

principais parâmetros a serem analisados são comprimento de onda, conectores, proteção e dispersão.

Neste trabalho, abordaremos a revisão teórica das fibras de plástico, bem como seu comportamento, pois foi esse tipo de fibra utilizada nas caracterizações práticas [4].

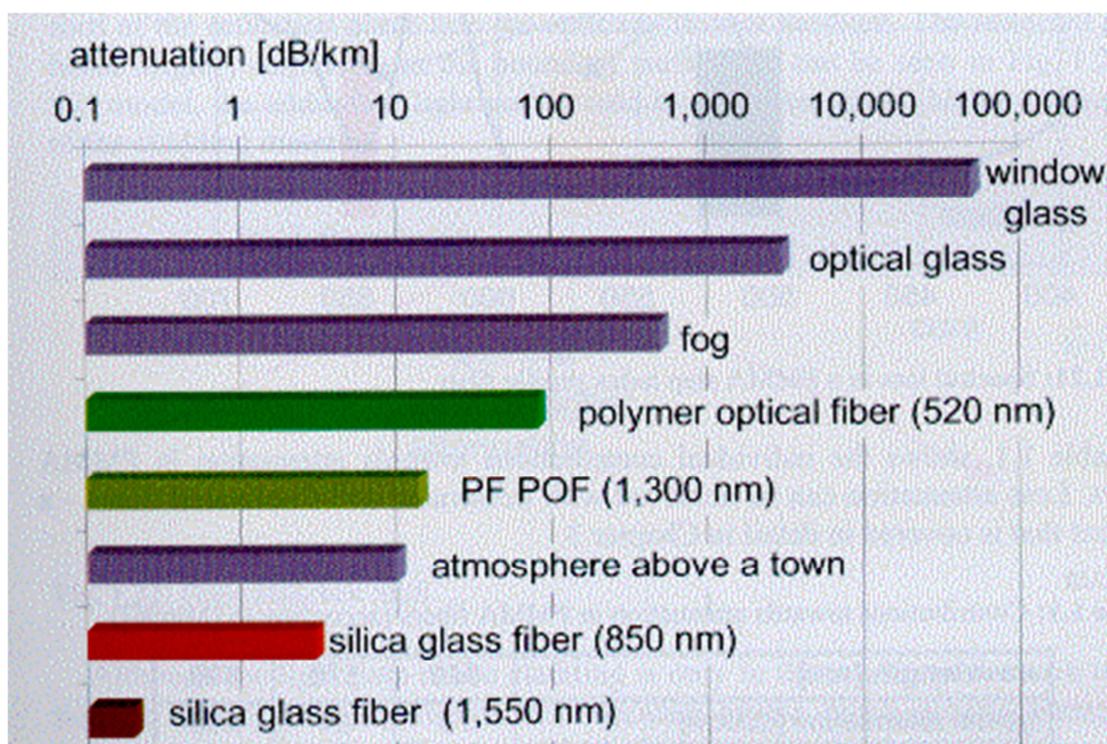


Figura 14 Comparação do coeficiente de atenuação entre diversos meios de transmissão óptica

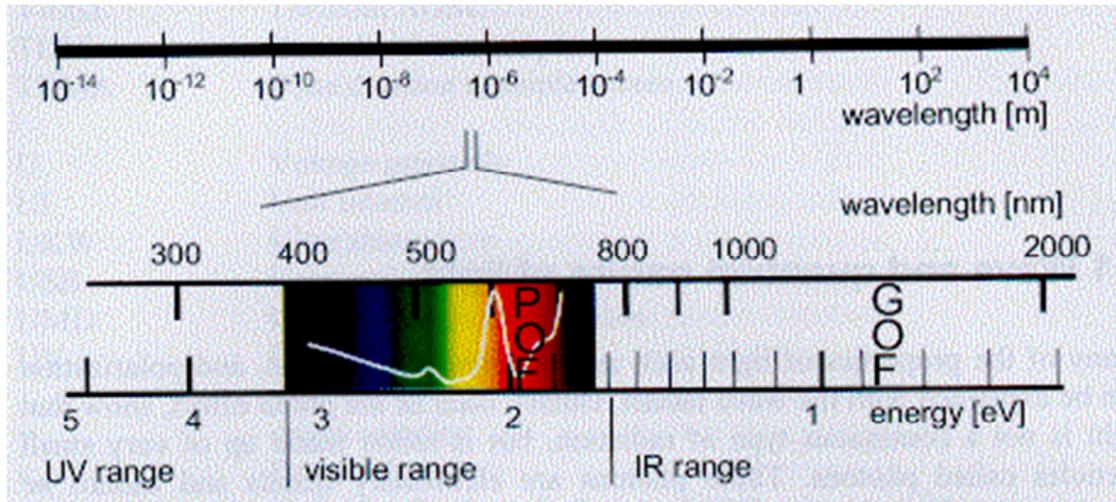


Figura 15 Janelas de transmissão da POF

Pode-se observar, na Figura 15, que as janelas de transmissão das fibras ópticas plásticas se encontram no espectro visível. Onde se conclui que para trafegar um sinal por essa fibra com a maior eficiência é melhor que sejam utilizados emissores cujas frequências portadoras se encontrarão nessa faixa. Para tal, utilizaram-se os LEDs das cores vermelha, verde, âmbar e azul como emissores do sinal, porque apresentariam uma atenuação menor para as fibras de Polimetilmetacrilato - PMMA.

Porém, os LEDs são diodos emissores de luz espontânea, na sua forma mais simples, de junções PN, quando alimentados por corrente elétrica no sentido direto. Nele a potência óptica emitida é função da eficiência quântica externa ou fração de fótons que escapa do LED, da energia de um fóton e da fração de par elétron-buraco que se recombinam através de emissões luminosas espontâneas. Caso esses valores sejam constantes obtém-se uma linearidade na resposta do LED. Como são fixos até uma determinada corrente aplicada, a curva não é linear quando se

percorre toda a faixa de aproveitamento elétrico do LED, dependendo da composição química do dispositivo [4].

Geralmente as POFs propagam mais de um único modo de luz, multimodais, portanto são submetidas aos seguintes efeitos: Acoplamento modal, atenuação, banda-passante e atenuação. Efeitos esses, que variam com o comprimento da fibra e com as condições de injeção de luz.

2.2 PRINCÍPIOS DE COMUNICAÇÕES ANALÓGICAS

Nesse item serão discutidos os princípios de comunicações analógicas, em um sistema óptico. A motivação desse tópico se dá porque a intenção inicial deste trabalho, era de digitalizar um sinal analógico. Depois de alguns desdobramentos e resultados colhidos em bancada, decidiu-se por focar na linearização desses sinais, que apresentavam distorcidos. Por isso, serão abordados os quatro principais parâmetros de comunicações analógicas, dando ênfase à análise de distorção que será amplamente discutida.

Uma das utilizações primárias de um enlace analógico (linear) de fibra óptica é o envio de sinais de micro-ondas de um transmissor, ou receptor eletrônico, a antenas localizadas remotamente.

Devido à flexibilidade de enlaces de fibra óptica, antenas podem ser projetadas para sinais analógicos ou digitais provindos de uma vasta gama de aplicações, conforme abordado anteriormente. As fibras ópticas plásticas combinam facilidade de manuseio, grande largura de banda e pouco peso. Esses componentes

de transmissão RF e micro-ondas para altas frequências vêm beneficiando indiretamente, entre outras aplicações, o já bastante explorado, uso de fibras óticas em cabeamento televisivo. Nestas aplicações, as fibras estendem transmissões de sinais de TV, melhoram suas qualidades e seus sistemas de realimentação além de reduzir custos quando comparados com sistemas empregados somente com cabo coaxiais.

Num sistema óptico, a combinação de perdas de componentes deve ser baixa o suficiente para assegurar que chegará luz suficiente ao receptor. Para um sistema, potência suficiente significa o montante de potência que produza uma relação sinal ruído desejável.

Quando se faz a seleção de qualquer componente para um enlace óptico, existe uma série de análises críticas e quantitativas que têm de ser calculadas prioritariamente à implementação, como em qualquer enlace de comunicação de radiofrequência ou micro-ondas. Os tópicos a serem discutidos, a seguir, tratam quatro parâmetros básicos, citados anteriormente: Ganho; Comprimento de banda; Ruído e Distorção.

2.2.1 Ganho de RF

A perda (ou ganho) de radiofrequência num enlace óptico é função de quatro variáveis: Eficiência do receptor, eficiência do transmissor, relação das impedâncias de entrada e saída e perda na fibra [7]. Porém, na maioria dos casos, o ganho de

potência de um enlace, pode ser medido basicamente analisando correntes de entrada e saída de acordo com a equação 22:

$$G_{link} = \left(\frac{I_{saída}}{I_{entrada}} \right)^2 \left(\frac{R_{saída}}{R_{entrada}} \right)$$

Equação 22

Onde $R_{saída}$ é a carga resistiva no receptor de saída e $R_{entrada}$ é a entrada resistiva do transmissor. A relação entre as correntes de entrada e de saída $\left(\frac{I_{saída}}{I_{entrada}} \right)$ pode ser expandida para termos de características do enlace na equação 23 [7]:

$$\left(\frac{I_{saída}}{I_{entrada}} \right) = \frac{(\eta_{T_X,RF}(\eta_{R_X,RF}))}{L_{opt}}$$

Equação 23

Onde $\eta_{T_X,RF}$ é a eficiência do transmissor, incluindo amplificador (se houver) e casamento de impedância, em converter a corrente de RF de entrada numa potência óptica modulada. E $\eta_{R_X,RF}$ é a eficiência do receptor como um todo, transformar o sinal óptico modulado em corrente. Esse valor de RF não é o mesmo, citado anteriormente, como responsividade do fotodiodo. Por fim, L_{opt} é a perda óptica da fibra utilizada no enlace, calculada da seguinte forma:

$$L_{opt} = \left(\frac{Potência\ Óptica\ no\ Transmissor}{Potência\ Óptica\ no\ Receptor} \right)$$

Equação 24

Substituindo a equação 23 na 22, obtém-se o resultado através da equação 25:

$$G_{link} = \left(\frac{\eta T_X, RF(\eta R_X, RF)}{L_{opt}} \right)^2 \left(\frac{R_{saída}}{R_{entrada}} \right)$$

$$G_{link,dB} = 20 \log (\eta T_X, RF(\eta R_X, RF)) - 2L_{opt,dB} + 10 \log \left(\frac{R_{saída}}{R_{entrada}} \right)$$

Equação 25

Geralmente os fatores de resistência na entrada e na saída são dados em $dB(A/W)$ e $dB(A/W)$, o que facilitaria no momento em que forem feitos os cálculos de ganho de um enlace. Simplificando a equação 25, tem-se a equação 26:

$$G_{link,dB} = GT + GR - 2L_{opt,dB} + 10 \log \left(\frac{R_{saída}}{R_{entrada}} \right)$$

Equação 26

Onde GT é o ganho/ perda na transmissão e GR é ganho/perda na recepção, e são relacionados à eficiência no transmissor e receptor do enlace.

$$GT = 20 \log (T_X, RF)$$

Equação 27

$$GR = 20 \log (R_X, RF)$$

Equação 28

Por exemplo, combinando um transmissor de resistência 75ohms, de ganho - $1dB(A/W)$, um receptor de mesma impedância, porém com um ganho de $20dB(A/W)$, e uma fibra que tenha $12dB$ de perda óptica, entregaria um sinal de RF com ganho de:

$$G_{link,dB} = -1 + 20 - 2(12) + 10 \log \left(\frac{75}{75} \right)$$

$$G_{link,dB} = 19 - 24 = -5dB$$

Equação 29

Como é indicado na equação 26, para cada adição em dB na perda de transmissão da fibra essa a mudança é multiplicada por dois. Esse fenômeno ocorre por conta da conversão de potência óptica em energia de rádio frequência. Aqui a corrente de RF é diretamente proporcional à potência óptica, mas a potência varia com o quadrado da corrente. Quando se tira o logaritmo esse termo quadrático torna-se o fator 2 que multiplica a perda óptica.

A Figura 16 a seguir, mostra os efeitos de uma perda óptica, de responsividade e eficiência de um transmissor considerando um receptor de $0,375(mA/mW)$, ganho de recepção de $-8,51dB(A/W)$.

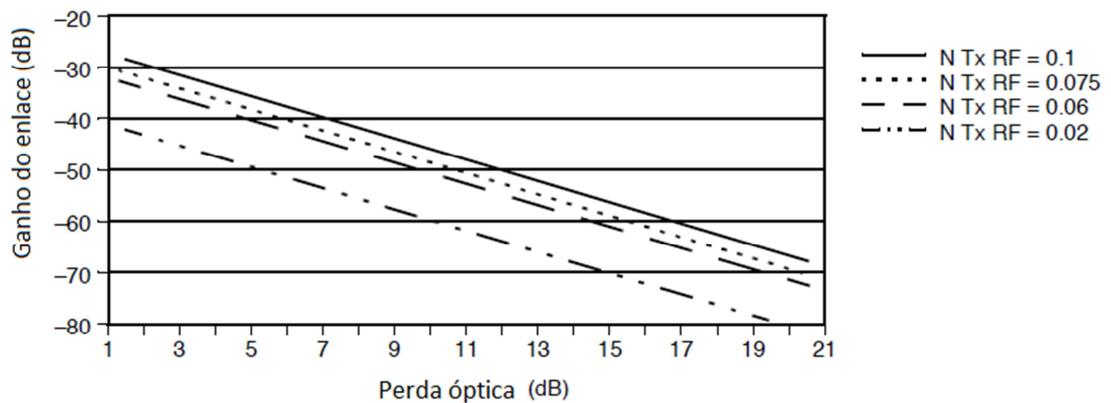


Figura 16: Contribuição do transmissor na perda de um sistema óptico

Um aspecto bastante interessante e que geralmente passa despercebido na equação quatro, é o fator $2L_{opt,dB}$. Por exemplo, um par formado por um transmissor e receptor quando ligado por uma fibra de perda de $0dB$, tem um ganho de RF de

$-39dB$. Porém, quando instalada um fibra com perda de $2dB$, o ganho passa a ser $-43dB$. Devido ao termo que duplica a atenuação na fibra [7].

2.2.2 Largura de banda

A faixa de frequências sobre o qual um enlace de fibra óptica pode ser submetido, é limitado pela largura de banda de operação do transmissor, do receptor e pela dispersão óptica que a fibra exhibe. O tamanho da banda de operação de um enlace, usualmente é definida como a aquela em que o sinal da modulação em micro-ondas cai de amplitude em 3 dB.

Na maioria dos casos, a banda do transmissor limita a frequência de operação do enlace, por isso a banda do transmissor é primariamente aquela que recebe mais atenção. Como mostra o gráfico da Figura 17 [7].

O método utilizado para medição desse parâmetro é a varredura de frequência, onde é fixada uma tensão de bias, num determinado transmissor, e partindo daí, variam-se as frequências as quais ele será modulado. Observando o comportamento óptico do mesmo, analisa-se até que o mesmo decaía de 3 dB do valor inicial. Esse valor é a largura de banda do transmissor. Para o caso dos outros componentes ópticos que utilizados nos testes não influenciarem no resultado, ou seja, se a fibra utilizada for muito curta e o receptor tiver uma banda muito maior que o receptor [7].

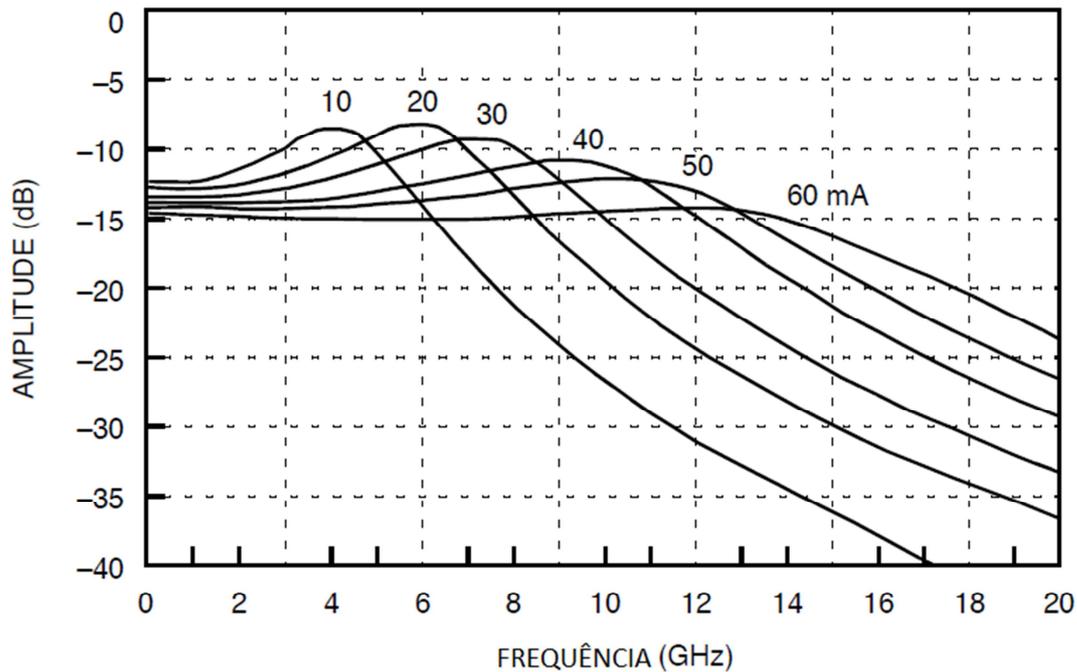


Figura 17: Largura de Banda

As curvas do gráfico da Figura 17 acima compreendem as diversas polarizações elétricas aplicadas a um transmissor, onde se varia a frequência, e registra-se a amplitude do sinal, observando o decaimento dessa amplitude. No próximo capítulo será detalhada a execução desta prática no laboratório.

Como se pode notar, a banda passante do LED varia de acordo com a corrente de bias injetada no sistema, assim um ponto ótimo é escolhido para balancear esta frequência e outros parâmetros de corrente como ruído, linearidade e tempo de vida do dispositivo. Quando integrado todo o módulo de transmissão, outros componentes são avaliados como limitantes de banda, é o caso do amplificador e do casamento de impedância, por exemplo.

A banda dos receptores é limitada pela capacitância e mobilidade das portadoras do chip de fotodiodo ou por componentes elétricos adicionais como os amplificadores e os casadores de redes. Na maioria dos casos as velocidades de resposta desses receptores são maiores que a dos outros componentes do enlace como um todo.

Em algumas situações, as fibras por si só podem distorcer ou borrar os sinais de pulso estreito, devido ao fato que muitos desses diferentes comprimentos de onda trafegam em diferentes velocidades pela fibra. Para evitar essa dispersão modal e material, transmissores com um estreito comprimento de banda óptica são utilizados.

2.2.3 Ruído

O ruído consiste na alteração de alguma das características do sinal transmitido por efeito de um outro sinal exterior ao sistema de transmissão, ou gerado pelo próprio sistema de transmissão. Estes sinais indesejados são de natureza aleatória, não sendo possível prever o seu valor num instante de tempo futuro.

Em muitos casos, o ruído é produzido pelos próprios equipamentos ativos utilizados na composição dos sistemas de transmissão e recepção, tais como os amplificadores LASER ou fotodiodos. Estes dispositivos produzem ruído, de origem

térmica e de origem quântica, o qual passa a ser processado juntamente com o sinal desejado nos estágios subsequentes.

O ruído pode ser aditivo (soma-se ao sinal) ou multiplicativo (o sinal resultante é o produto do sinal transmitido pelo ruído).

Uma vez que o ruído é um processo aleatório, este deve ser descrito e tratado com recursos estatísticos. O ruído diz-se branco quando a sua densidade espectral de potência média é constante a todas as frequências; diz-se colorido no caso contrário. As características do ruído são ainda descritas através da função densidade de probabilidade da sua amplitude. Diz-se então que o ruído segue uma distribuição Normal (Gaussiana), de Poisson, etc.

Uma das formas de ruído mais utilizadas para modelar este aspecto de um sistema de transmissão é o Ruído Branco Aditivo e Gaussiano (AWGN – Additive White Gaussian Noise).

Os efeitos do ruído no desempenho dos sistemas de transmissão podem ser minimizados através da utilização de usos de técnicas como filtragem, entre outros. No entanto, e devido a natureza aleatória do ruído, não é possível eliminar completamente o ruído num sistema de transmissão [7].

Dentro da banda de um enlace, a contribuição do ruído advindo de vários componentes tem de ser considerada. Para especificar e quantificar um ruído num dado enlace, a tendência é utilizar o ruído de entrada equivalente (equivalent input noise - EIN). É definido como a junção de todos os ruídos na entrada do enlace que

seria necessário para produzir o ruído observado na saída do enlace, se o enlace como um todo fosse sem ruído. As unidades desse parâmetro podem ser mW/Hz ou dBm/Hz:

$$EIN_{enlace,mW} = \frac{Ruído_{saída,mW}}{Glink}, (1) \text{ pois}$$

$$Glink \cdot EIN_{enlace,mW} = Ruído_{saída,mW} (2)$$

$$EIN_{enlace,dBm} = Ruído_{saída,dBmW} - Glink_{dB} (3)$$

Equação 30.1, 29.2 e 29.3

Uma forma alternativa de medida do ruído é a figura de ruído (noise figure - NF), que é a relação, em dB, de uma potência de ruído atual sobre aquele que seria produzido por um dispositivo similar, em perfeito desempenho do ruído.

Definido como premissas que a entrada para esse dispositivo ideal é terminado com uma carga passiva de temperatura padrão em 290k (T_0). A potência de ruído disponível para tal carga é escrita na equação30:

$$K_{T_0} = \left(1,38 \cdot \frac{10^{-20} mW}{(K \cdot Hz)(290K)} \right)$$

$$= 4,0 \cdot 10^{-18} mW/Hz$$

$$= -174 dBm/Hz$$

Equação 31

Relacionam-se os dois parâmetros anteriormente citados, do seguinte modo para a equação 31:

$$NF = 10\log(EIN_{mW/Hz}/KT_0)$$

$$NF = EIN_{dBm/Hz} + 174 \text{ dBm/Hz}$$

Equação 32

Por exemplo, um enlace que tem um ruído de saída de -85dBm/Hz, e ganho de -40dB teria uma entrada equivalente de ruído (EIN) de -125dBm/Hz e figura de ruído (NF) de 49dB. As equações 10 e 11 determinam que o EIN deva ser expresso para uma largura de banda maior que 1 Hz.

Definidos esses parâmetros de medição de ruído, dar-se-á atenção às principais fontes de ruído, advindo dos componentes, num enlace de fibra óptica. São eles: Ruídos provenientes dos amplificadores, na transmissão do sinal; ruído do diodo emissor de luz; ruídos de disparo; ruídos advindos dos componentes casadores de impedância, no receptor.

Desde que os enlaces de fibra óptica apresentem significativo montante de perda do sinal, o ruído proveniente de amplificadores, na transmissão do sinal geralmente apresenta uma perda muito menor que de todos os outros componentes, por essa razão será desprezado.

2.2.3.1 Ruído do emissor de luz

O ruído de emissor de luz aparece com uma flutuação aleatória de intensidade do sinal óptico. Existem duas contribuições principais para esses efeitos existirem. O primeiro é exatamente variação de intensidade da luz, como é gerada pelo diodo. O segundo é relacionado à flutuação de frequência da luz, que pode degradar o sinal, se a fibra for dispersiva [7].

O ruído do emissor medido diretamente no transmissor é sempre referenciado como um ruído de intensidade relacionada (relative intensity noise - RIN), esse nome por se tratar da relação entre a média quadrática da amplitude do ruído de flutuação por unidade de comprimento de banda, P^2 , com o quadrado da potência óptica de DC, P_0 .

2.2.3.2 Ruído de disparo

O segundo principal contribuinte para um ruído no enlace é por efeito súbito chamado de ruído de disparo. Ruído de disparo ocorre por conta de a luz ser composta de pacotes discretos de energia, chamados fótons, que transporta o sinal num fluxo não suave, e sim como *stream* infinitesimal de energia quântica. A forma aleatória de chegada de cada um desses fótons gera um ruído também aleatório na corrente de saída do fotodiodo. A média quadrática desse ruído é dada na equação 32 a seguir:

$$I_{disparo} = \sqrt{2 \cdot e \cdot I_{dc} \cdot BW}$$

Equação 33

Onde $I_{disparo}$ é a média quadrática do valor do ruído de disparo (corrente) no fotodiodo, e é a carga elementar $1,6 \times 10^{-19}$ Coulombs, I_{dc} é a corrente que passa pelo fotodiodo e BW é o canal ou resolução do canal que será medido.

2.2.3.3 Ruído no receptor

O receptor adicionará ruído também do amplificador ou dos elementos casadores de impedância incorporados, ou imediatamente depois do receptor. Desde que seja necessário ter algum amplificador, na maioria das situações, é importante considerar cuidadosamente essas contribuições. O ruído do receptor é referenciado de volta ao de entrada assim conforme equação 33:

$$EIN_{RX,dBm} = Ruído_{RX,saída,dBm} - G_{enlace,dB}$$

Equação 34

O ruído de receptor é especificado pela corrente de ruído equivalente. Similar ao EIN, a corrente de ruído equivalente é teoricamente formada pela média quadrática da corrente no fotodiodo que seria requerida para gerar o atual somatório de ruído observado na saída do fotodiodo, imaginando que todos os outros

componentes que formam o receptor não têm ruído algum. A equação 34 abaixo relaciona:

$$I_{ENC} = I_{saída} \left(\frac{R_{fd}}{\eta_{R_x, RF}} \right)$$

Equação 35

Onde I_{ENC} é a média quadrática do ruído equivalente de corrente no fotodiodo e $I_{saída}$ a efetiva média quadrática do ruído de saída do fotodetector.

2.2.3.4 Ruído térmico

Esse tipo de ruído é gerado dentro na resistência de carga do fotodetector R_{carga} . Elétrons dentro de qualquer resistor nunca permanecem estacionários, por conta das duas energias térmicas ele se mantém constantemente em movimento, mesmo sem nenhuma tensão aplicada. A movimentação do elétron é aleatória, então a linha de fluidez das cargas pode ser direcionada a um eletrodo ou a outro, em qualquer instante. Portanto existe uma corrente aleatória dentro do resistor, chama-se essa corrente de corrente térmica $I_{térmico}$, e sua média no tempo é zero. A média da potência gerada dentro do resistor é $R_{carga} \overline{I_{térmico}^2}$, onde $\overline{I_{térmico}^2}$ é a média quadrática do valor da corrente térmica.

Uma iluminação constante aplicada P ilumina um fotodetector, ao invés de permanecer fixa a corrente $I = \eta e P / hf$, a corrente varia aleatoriamente em torno

desse valor. Quando uma potência incidente é tão menor que o sinal inserido e o ruído corrente têm amplitudes comparáveis, a presença do sinal é mascarada. Mesmo com moderadas inserções de potência óptica o sinal da corrente pode não ser largo o suficiente para que alcance níveis desejáveis de clareza na recepção.

2.2.3.5 Ruído total do enlace

Quando os ruídos do emissor de disparo do fotodetector são adicionados juntamente ao ruído do terminal do receptor, cada ruído obedece a uma lei diferente, respeitando do somatório de perda óptica num dado sistema [7].

Especificamente, o EIN do LED se mantém constante, o EIN do fotodiodo cresce proporcionalmente a perda óptica e o EIN do terminal receptor aumenta proporcionalmente ao quadrado da perda óptica (com certeza, o ruído térmico efetivo é constante, mas desde que ele é referido de volta à entrada do enlace suas contribuições relativas à entrada do sinal aumenta assim como as perdas do enlace aumentam). A equação 35 a seguir relaciona as EIN do sistema.

$$EIN_{enlace_{mW/Hz}} = EIN_{disparo_{mW/Hz}} + EIN_{laser_{mW/Hz}} + EIN_{térmico_{mW/Hz}}$$

Equação 36

2.2.4 Distorção

No transmissor, é possível utilizar tanto um diodo emissor de luz, LED, quanto um diodo laser. Para aplicações analógicas, o ponto de polarização deve situar-se

aproximadamente no ponto médio da região linear do dispositivo. O sinal pode ser enviado utilizando várias técnicas de modulação, a mais simples para ligações com fibras ópticas é a modulação direta de intensidade. A modulação da potência óptica resulta da variação de corrente injetada, em torno do seu ponto de polarização, proporcionalmente ao nível elétrico do sinal. Utiliza-se modulação em amplitude, frequência e fase para técnicas usualmente utilizadas.

Diferentemente do ruído que é intrínseco aos componentes analisados, e que pode independe da frequência aplicada, a distorção só ocorre na presença de pelo menos um sinal. Apesar de ser independente do tipo de modulação, deve-se atentar para a não-linearidade da fonte óptica: Distorções harmônicas, ruído de intensidade relativa (*relative intensity noise* - RIN) e produtos de intermodulação.

Apesar de, no presente trabalho, tratarmos da distorção no emissor óptico (nesse caso o LED), as maiores contribuições de distorção quando se constrói um enlace óptico são provindas dos moduladores e fotodetectores. Porém, comparativamente um ao outro, as distorções nos moduladores ópticos são predominantes.

A Figura 18 a seguir, ilustra a modulação direta de um sinal senoidal, que está sendo modulado na faixa de operação central do emissor. Portanto observa-se que não há distorção do sinal, pois a área de utilização do emissor é linear.

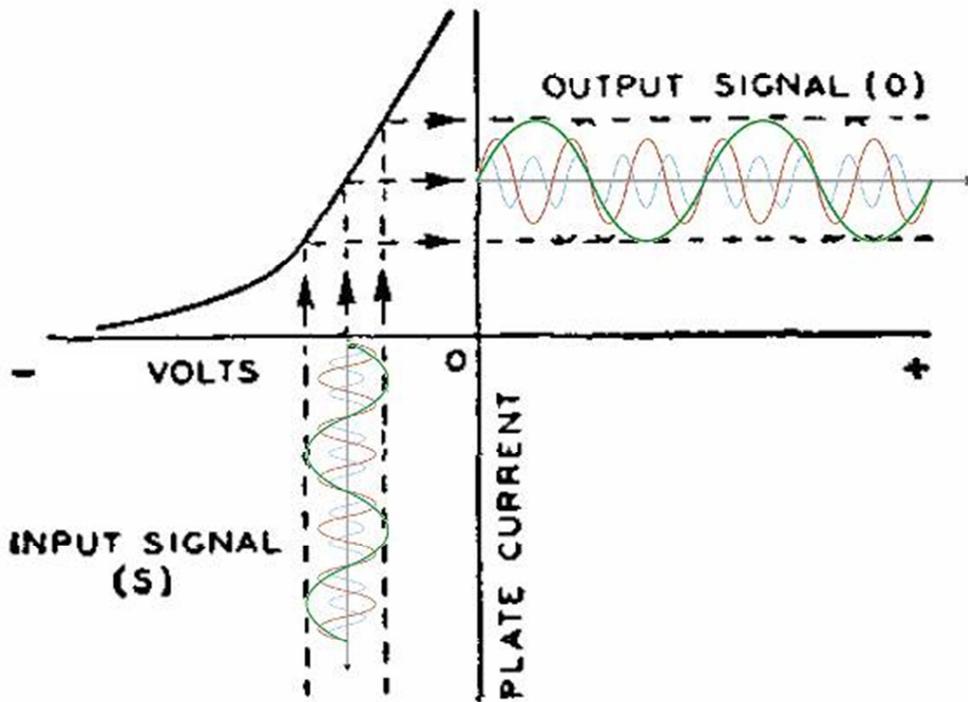


Figura 18: Linearidade do Emissor

A não linearidade se justifica quando se trabalha com a modulação de um pulso, minimamente, e como resposta obtém-se a componente de outras frequências. Ou seja, a saída do sinal, causada por uma dada função de transferência é função do sinal de entrada, na maioria dos dispositivos ópticos, que é expressa pela equação 36:

$$Y_{saída} = H(s)Y_{entrada}$$

Equação 37

Devido a “criação” de outras frequências causadas pela não-linearidade para corrente, voltagem e potência dos componentes, só faz sentido tratar como ganho a frequência fundamental, pois as outras teriam ganho infinito, visto que elas não existiam antes de passar pela função de transferência do dispositivo

Quando se deseja expressar uma função de transferência aplicada a sinais pequenos a série de Taylor é a mais utilizada, como uma soma infinita de potências com coeficiente de derivadas e em torno de um dado ponto. A definição da série de Taylor é escrita na equação 37, a seguir:

$$h(x) \cong \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(x-a)^k}{k!} \frac{\partial^k h}{\partial x^k}$$

Equação 38

Realizando a modulação de um pulso de sinal num LED, por exemplo, com uma amplitude A , uma frequência ω e uma tensão B_0 de polarização desse LED a resposta do sinal modulado seria de acordo com a equação 38:

$$f(t) = B_0 + A \cdot \text{sen}(\omega t)$$

Equação 39

Se expandir uma dada função de transferência, qualquer que seja, na série de Taylor até a terceira ordem, o que na maioria dos casos é suficiente, encontrar-se-ão componentes dos harmônicos da frequência fundamental, indicados na equação 39:

$$h(x) = 1 + m \text{sen}(\omega t) + \frac{h_2}{2} \left(\frac{m}{h_1}\right)^2 [1 - \cos(2\omega t)] + \frac{h_3}{4} \left(\frac{m}{h_1}\right)^3 [3\text{sen}(\omega t) - \text{sen}(3\omega t)]$$

Equação 40

onde, m é um número real e $h_k = \frac{1}{k!} \frac{\partial^k h}{\partial x^k}$, notam-se as contribuições dos harmônicos:

$$m + \frac{3h_3}{4} \left(\frac{m}{h_1}\right)^3, \text{ fundamental } (\omega)$$

$-\frac{h_2}{2} \left(\frac{m}{h_1}\right)^2$, segundo (2ω) – segundo harmônico

$-\frac{h_3}{4} \left(\frac{m}{h_1}\right)^3$, terceiro (3ω) – terceiro harmônico

E em corrente contínua: $1 + \frac{h_2}{2} \left(\frac{m}{h_1}\right)^2$.

Esses componentes de distorção harmônica foram exibidos utilizando somente um pulso de sinal para modulação. Ao aplicarem-se mais pulsos aos sinais na entrada modulados, do dispositivo, não somente a distorção harmônica vai existir, mas também a contribuição do ruído de intermodulação desses sinais. Portanto termos adicionais devido de não linearidade são incorridos [18].

3. CARACTERIZAÇÃO DOS LEDS (MONTAGEM, RESULTADOS E DISCUSSÕES)

3.1 LEDs DIEMOUNT

Os LEDs Diemont foram utilizados nos experimentos descritos a seguir. Estes componentes apresentam um design que combina um refletor metálico parabólico, com outro refletor plástico, responsáveis por alcançar ângulos de emissão estreitos e considerável eficiência óptica de acoplamento. Tais LEDs são apropriados para sistemas que necessitem de um acoplamento mais crítico de luz, na fibra [13].

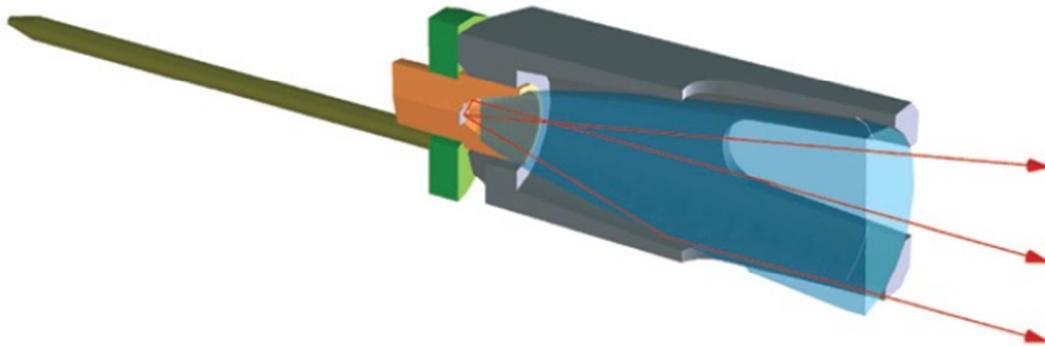


Figura 19: LED Diemount

O LED utilizado nos experimentos cujo módulo está representado na Figura 19 acima, tem seu chip acoplado à base sólida metálica refletora. Tal base é desenvolvida para obter um feixe mais estreito e acoplamento total da luz na fibra. Esta configuração se dá prioritariamente através de acoplamento direto da

terminação da fibra ao metal, desenvolvida pela Diemount, tem aplicação em sistemas de iluminação e óticos para transferência de dados. Um plástico parabólico de aproximadamente 10 (dez) milímetros é instalado por fora do metal refletor que guia a luz a partir deste ponto. Além de uma fibra, responsável pelo acoplamento final e facilidade mecânica na construção do enlace. Graças a esse design é possível alcançar resultados consideráveis de ganho e eficiência no acoplamento da luz nas fibras.

3.1.1 Espelhos refletores

O refletor parabólico de plástico é uma continuação do metálico, o que o faz responsável por guiar o feixe luminoso. A uma dada distância do LED os feixes luminosos se tornam mais dispersos, responsáveis por um ângulo de abertura maior do LED. Os espelhos refletores os guiam, refletidos, para dentro do feixe novamente. Ou seja, a luz que se expandiria numa direção variada, se depara com os espelhos refletores e são guiadas novamente para um ângulo de abertura mais restrito. As vantagens são das mais variadas, mas duas em especial devem-se elencar: Primeiramente não seria necessário um revestimento, para diminuir o ângulo de abertura desses feixes luminosos bem como a simplicidade da geometria dos componentes. Isso faz com que o componente se torne cada vez mais barato, e não necessite de montagens adicionais para aprimorar a diretividade dos LEDs [13].

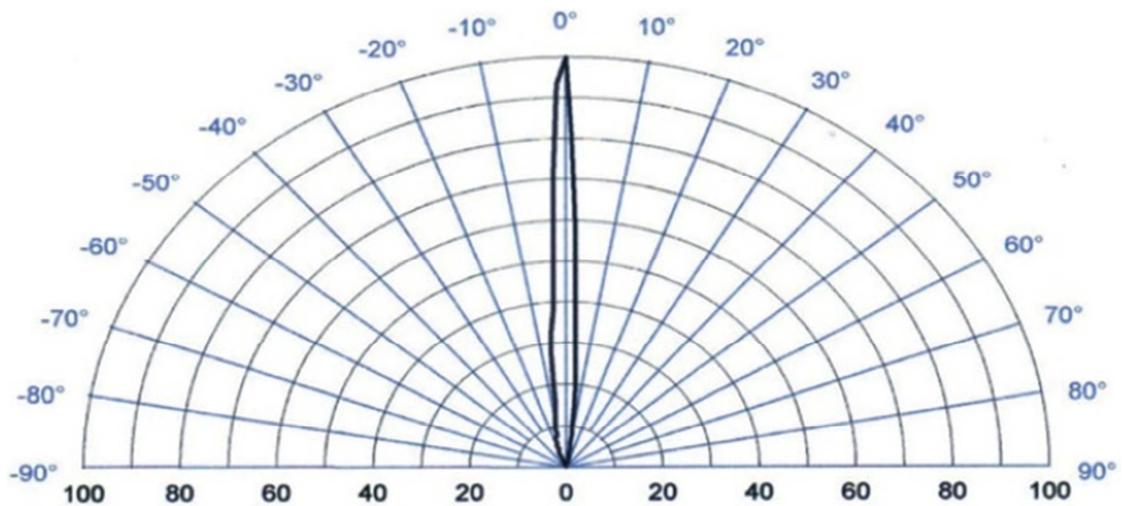


Figura 20: Intensidade luminosa em função da variação angular do LED Diemount

A maior vantagem no desenvolvimento deste LED com refletor parabólico é o quase total acoplamento da luz emitida pelo módulo num ângulo muito pequeno, de aproximadamente 4° [13]. O tamanho destes refletores define a largura do feixe luminoso, bem como seu ângulo de abertura, podendo um refletor de 10mm de comprimento, alcançar níveis consideráveis de colimação.

Sistemas convencionais de composição de LEDs, com lentes, emitem numa potência significativamente maior, porém seus ângulos de abertura são significativamente maiores, além de a eficiência luminosa ser bastante reduzida. Já os utilizados nos experimentos e produzidos pela Diemount, tem uma abertura angular menor e não divergem tão significativamente. Conforme ilustrado na Figura 21.

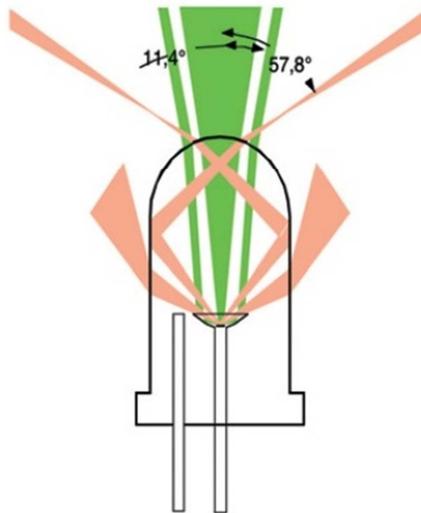


Figura 21: LED convencional

Conforme citado anteriormente, os LEDs Diemont, explanados nesse tópico, foram aqueles utilizados nos experimentos. Apesar de serem apresentados os métodos de caracterização, bem como os valores encontrados nos próximos tópicos, na Tabela 1 a seguir, são expostos os dados técnicos, a uma corrente típica de 20mA, dos LEDs Diemount encontrados na bibliografia.

Tabela 1: Propriedades do LED Diemount

	Vermelho	Azul	Verde	Âmbar
Máximo comprimento de onda [nm]	625	454	516	592
Comprimento de onda dominante [nm]	615,9	457,9	521,2	589,8
Intenidade Luminosa média [cd]	19,3	9	12,3	6,9
Abertura angular média (0-180)[°]	+3	+3	+5,5	+5,8

3.2 CARACTERIZAÇÃO ESTÁTICA: CURVA PXV E ESPECTRO ÓPTICO

Prioritariamente, estes LEDs foram construídos e desenvolvidos para aplicações de iluminações, e, nas literaturas encontradas, a maioria das vantagens apresentadas tende às questões de eficiência elétrica e intensidade luminosa. O estudo e caracterização desses componentes para análise do desempenho de transferência de dados é uma inovação em parte idealizada no LACOP (Laboratório de Comunicações Ópticas - UFF), onde foram desenvolvidos os experimentos.

Porém, as vantagens descritas, oriundas de construções optoeletrônicas desse tipo levam a uma gama de aplicações interessantes (indústria automotiva, tecnologias médicas, sensores tecnológicos e comunicações de dados), já detalhadas anteriormente. A intenção era aproveitar a grande eficiência espectral e luminosa desses componentes, causada, principalmente, por estes refletores, para acoplar em fibras com menor abertura numérica (NA) e desenvolver sistemas que gerassem bons resultados para comunicação de dados.

Os LEDs aqui caracterizados são fabricados em uma estrutura modular tipo pigtail com aproximadamente 5 cm de POF em sua terminação pela Diemount GmbH (Alemanha). Os módulos baseiam-se em uma armação refletora dupla de microestrutura parabólica onde o chip do LED fica posicionado no foco, que é responsável pelo auto-acoplamento de potência óptica na POF. A luz do LED é emitida com um pequeno ângulo de divergência, tipicamente de 3° a 4°, e então é acoplada com grande eficiência na POF de 1 mm e NA = 0,5 integrada ao módulo. A alimentação elétrica do módulo é realizada através de dois pinos conectores afastados entre si de 4,0 mm.

Para a realização do processo de caracterização do LED, montou-se um circuito contendo fonte de voltagem, gerador de função aleatória, Bias-T e os LEDs desempenhando o papel de emissor. Na recepção utiliza-se um fotodetector e osciloscópio. Conforme ilustrado na Figura 22, e foto da Figura 23.

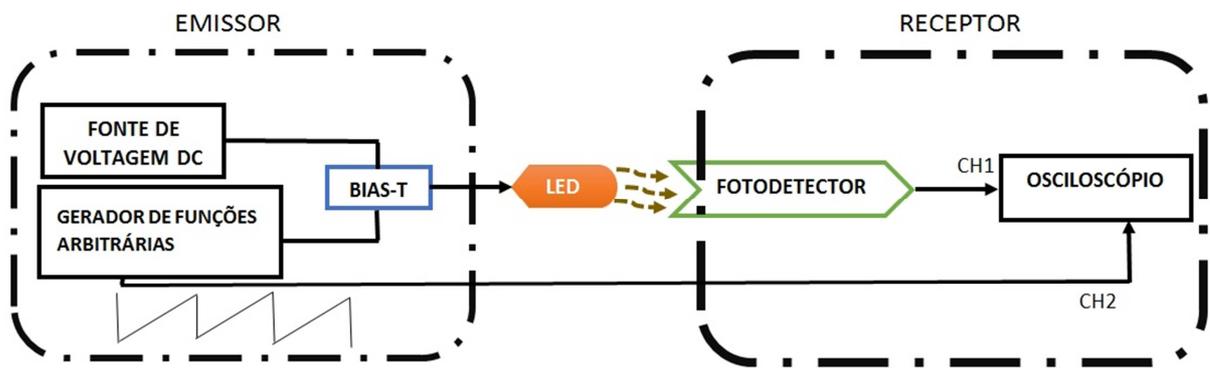


Figura 22: Desenho esquemático da montagem experimental utilizada na caracterização estática e dinâmica da resposta PxV dos LEDs, e de sua largura de banda por varredura de frequências

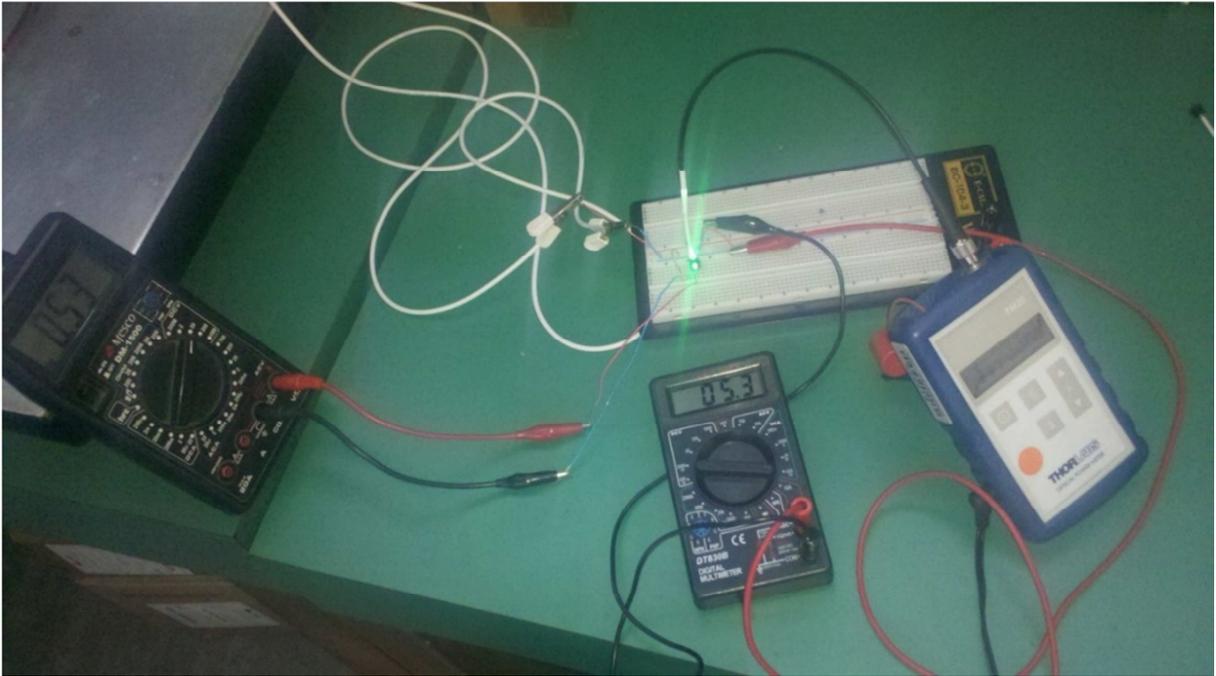


Figura 23: Bancada de experimentos para realização da caracterização do LED

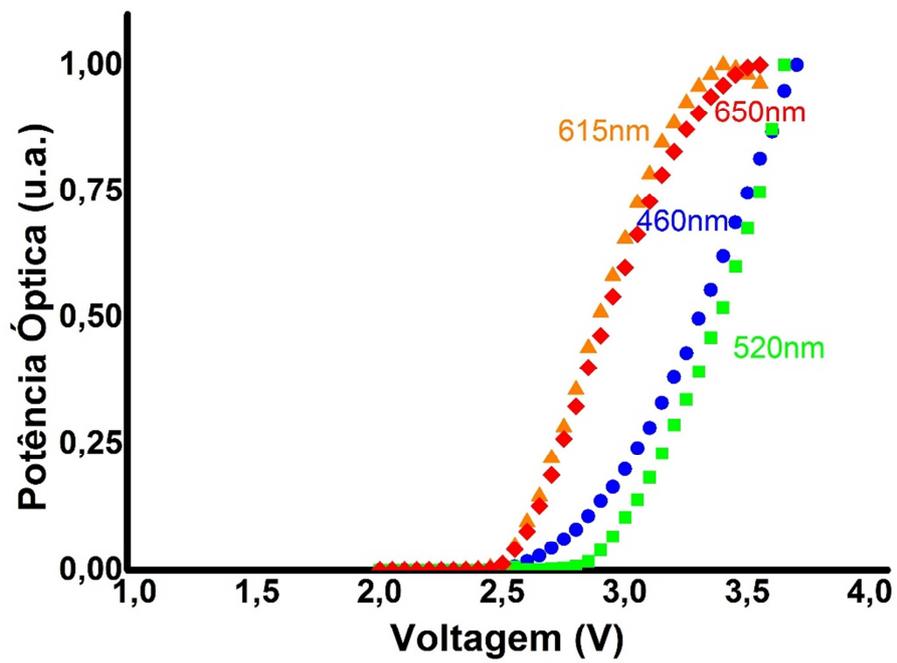


Figura 24: Curva de Potência Óptica em função da Tensão elétrica aplicada

A caracterização deste parâmetro, onde se observa a potência óptica no LED em função da tensão aplicada, tem o objetivo principal de evitar as distorções dos sinais aplicados a esses componentes, operando na região da curva que apresenta derivada constante.

3.3 ESPECTRO ÓPTICO DOS LEDS

Utilizou-se o espectrômetro CCD da THORLABS para análise e aferição do comprimento de onda dos emissores estudados. Tomou-se este cuidado, pois, conforme mencionado anteriormente, esses dispositivos não tem a transmissão de dados como principal motivador para fabricação. Portanto seria ideal, dentro do intervalo de cada cor, ter a informação de qual o valor do comprimento de onda de pico.

Os espectrômetros têm a função de indicar as propriedades da luz que está em análise. Sua construção básica se resume a uma rede de difração e receptor, que capta a luz após sucessivas reflexões, de modo a realizar a distinção dos comprimentos de onda do feixe, em luz aproximadamente monocromáticas.

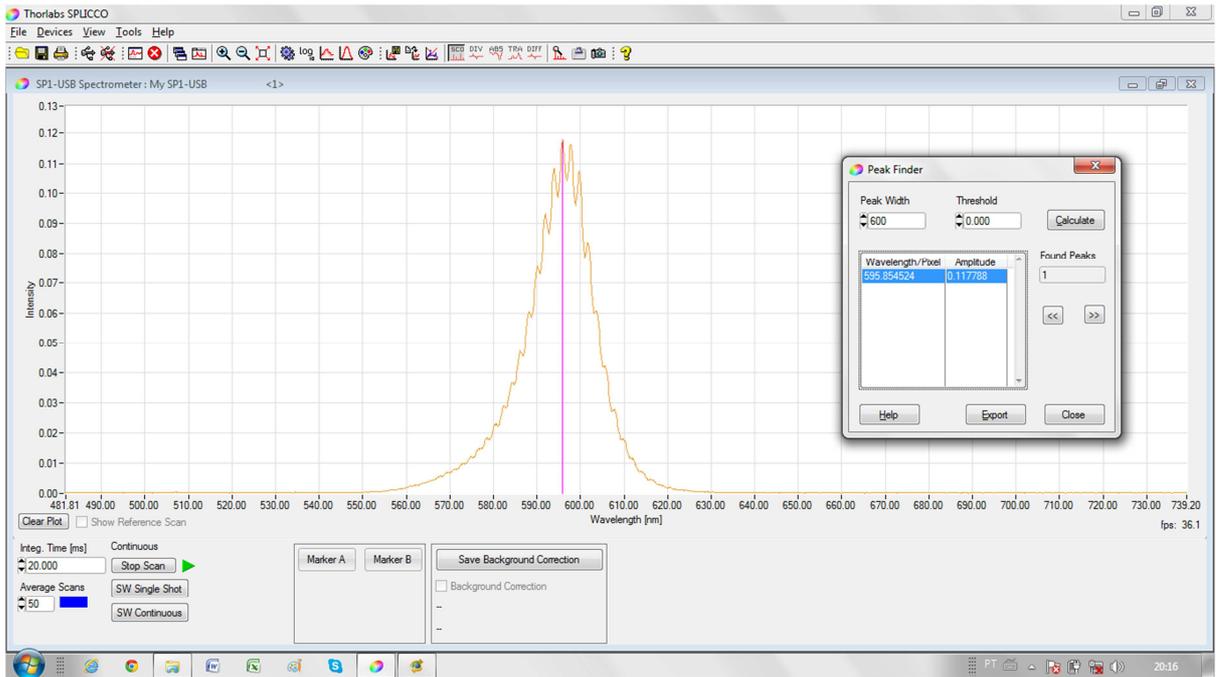


Figura 25: Espectro óptico do LED Âmbar

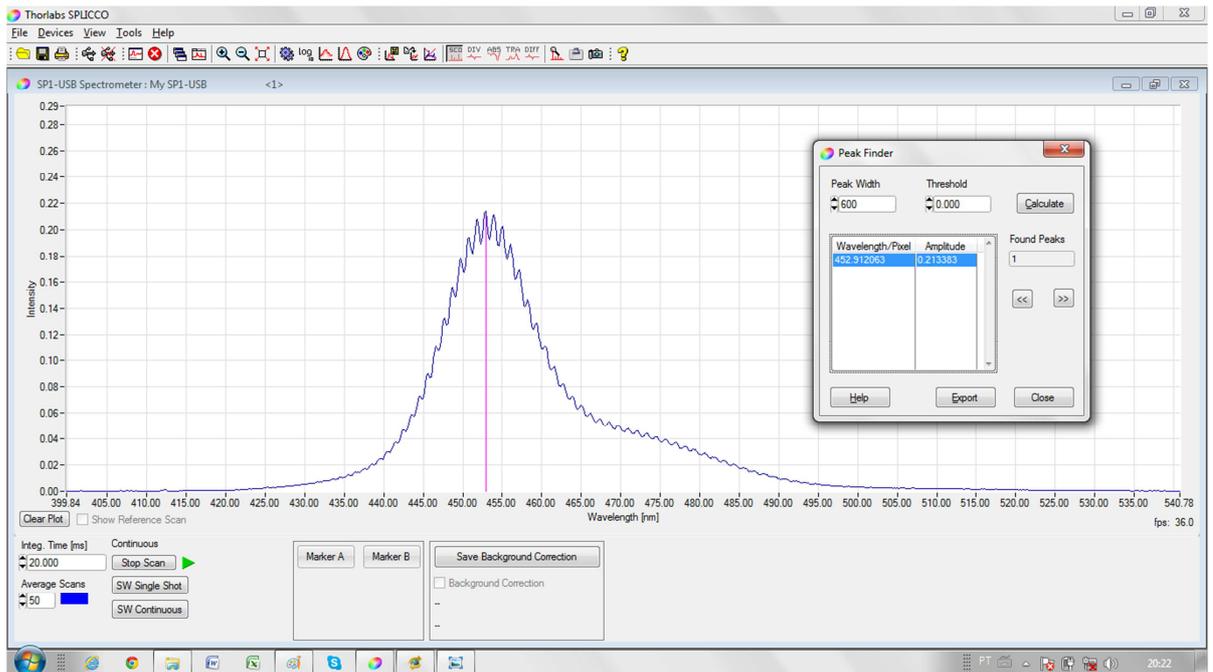


Figura 26: Espectro óptico do LED Azul

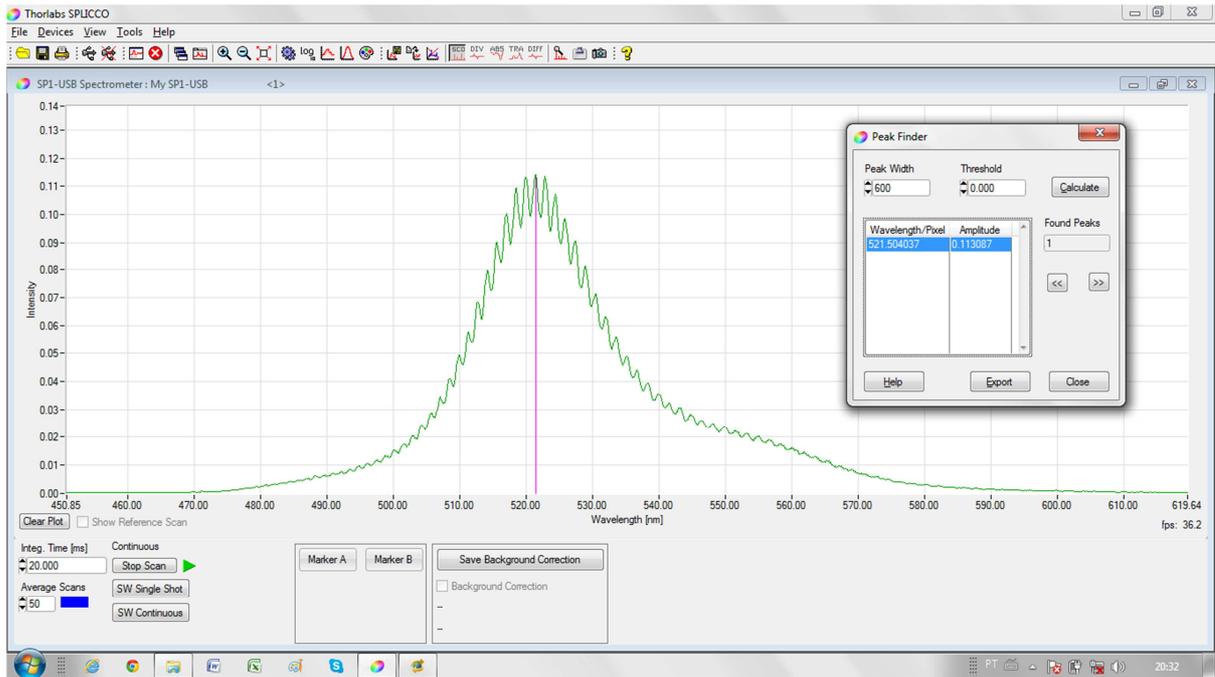


Figura 27: Espectro óptico do LED Verde

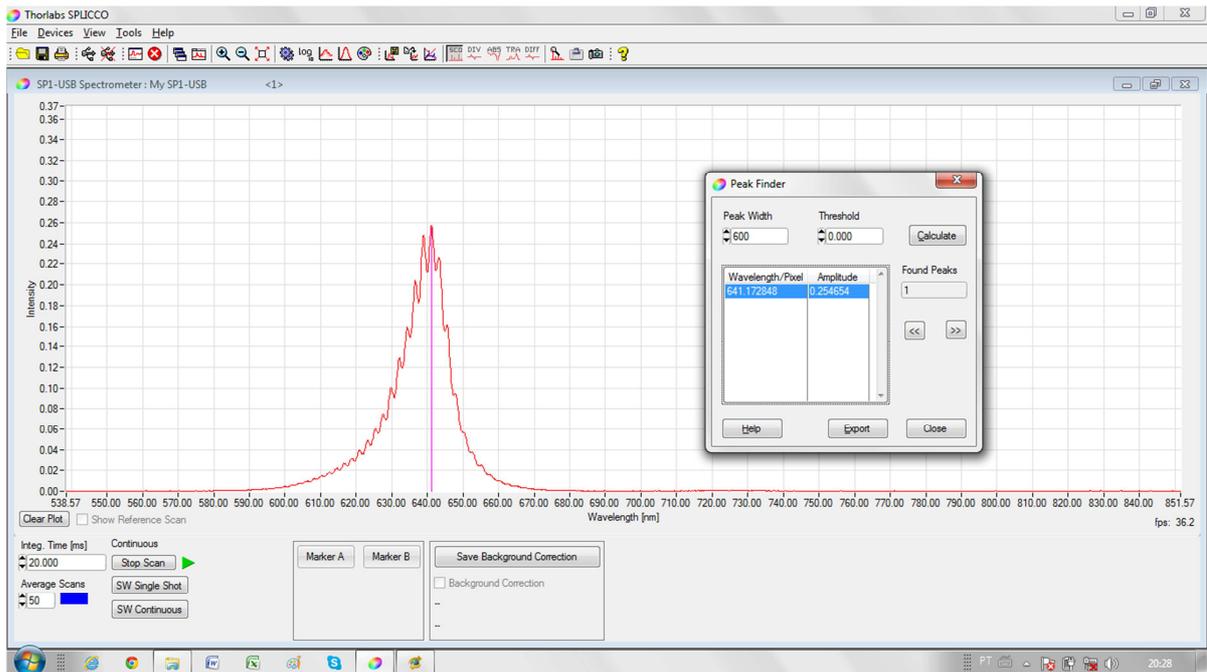


Figura 28: Espectro Óptico do LED Vermelho

Os valores encontrados, e apresentados da Figura 25, até Figura 28 acima, representam o comprimento de onda de corte de cada dispositivo em análise.

Traçada uma reta com valor de metade da intensidade luminosa do λ_c , encontra-se, $\Delta\lambda$, o intervalo óptico de operação do componente. A tabela a seguir indica os valores, espectro óptico de operação e de comprimento de onda de corte, supracitados.

LED	λ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)
AZUL	452	18,9
VERMELHO	641	10,2
ÂMBAR	595	14,3
VERDE	521	22

Tabela 2: Espectro Óptico dos LEDs

3.4 CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA: BANDA

A Figura 22 mostra esquematicamente o aparato experimental utilizado para a caracterização da resposta estática da potência óptica, em função da voltagem aplicada (curvas PxV) nos LEDs. Bem como para a medida de sua largura de banda pelo método de varredura em frequências [19]. Para as medidas PxV estáticas, o osciloscópio era substituído por um medidor de potência óptica e o gerador de funções configurado para aplicação de uma onda senoidal, sem modulação adicional, aumentando-se gradualmente a frequência aplicada a esse sinal.

Essa frequência era discretamente aumentada gradualmente, e registada juntamente com o valor da tensão pico a pico associada. Os gráficos foram montados em escalas logarítmicas, nos dois eixos, pois assim facilitaria a visualização do leitor. Essa largura de banda é verificada varrendo as frequências

aplicadas, a partir da mais baixa, até a metade do valor de tensão pico a pico aplicada inicialmente.

Da Figura 29 até a Figura 32, exibidas a seguir, demonstram as bandas dos LEDs estudados, nota-se que não há uma discrepância evidente entre eles. Os valores expostos foram retirados do software utilizado para análise, onde é possível verificar o valor da frequência correspondente [20].

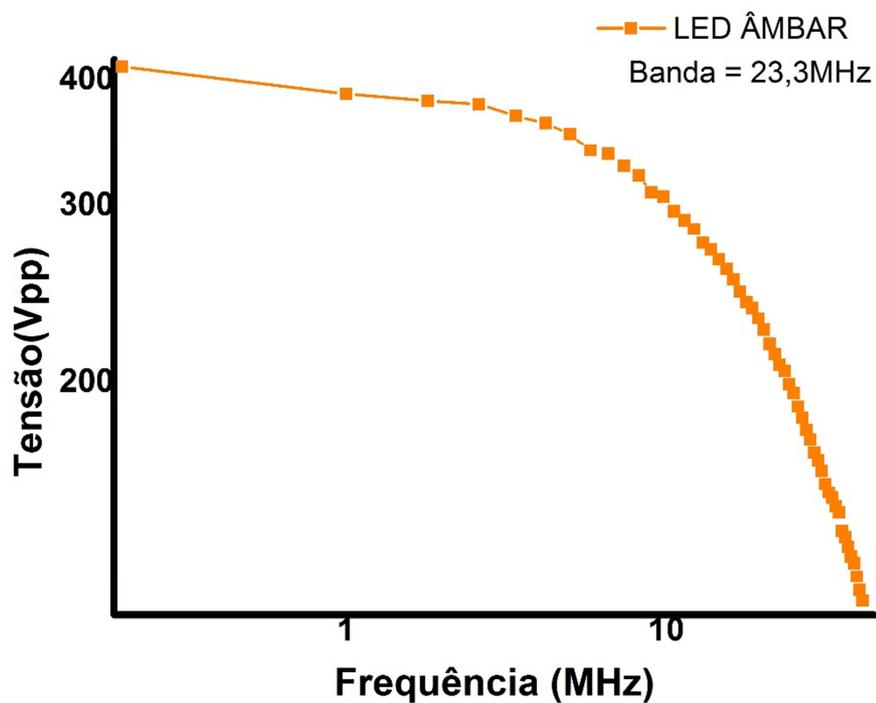


Figura 29: Largura de Banda do LED Diemount Âmbar (595nm)

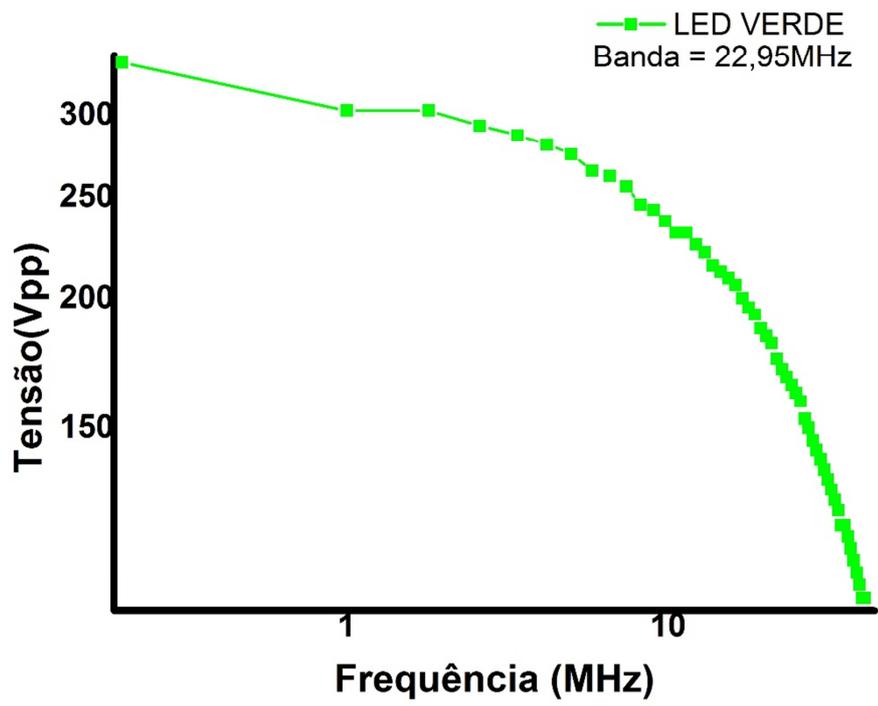


Figura 30: Largura de Banda do LED Diemount Verde (520nm)

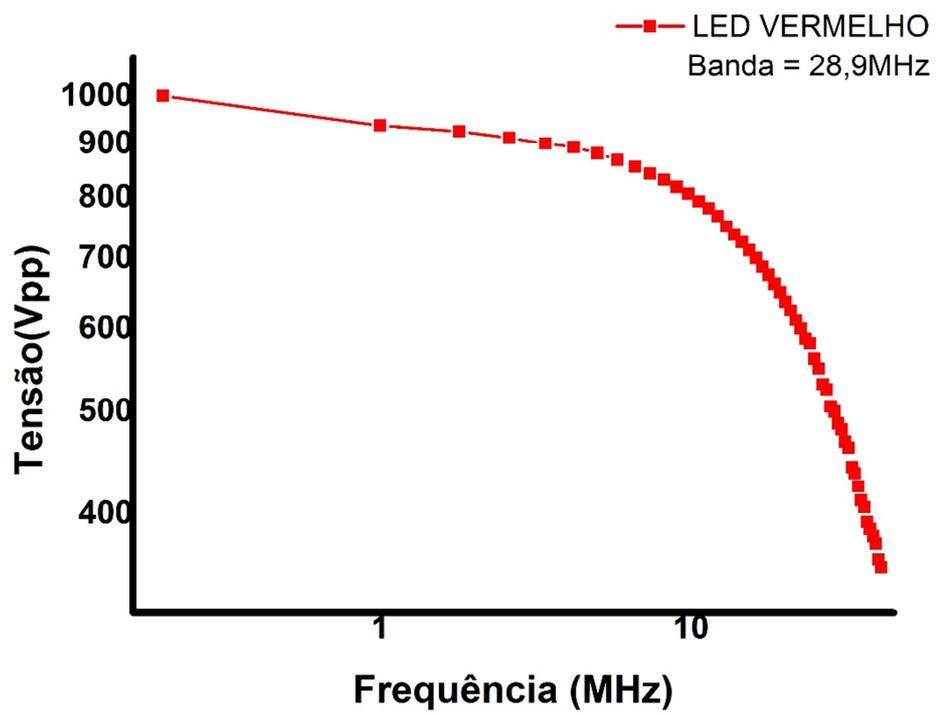


Figura 31: Largura de Banda do LED Diemount Vermelho (650nm)

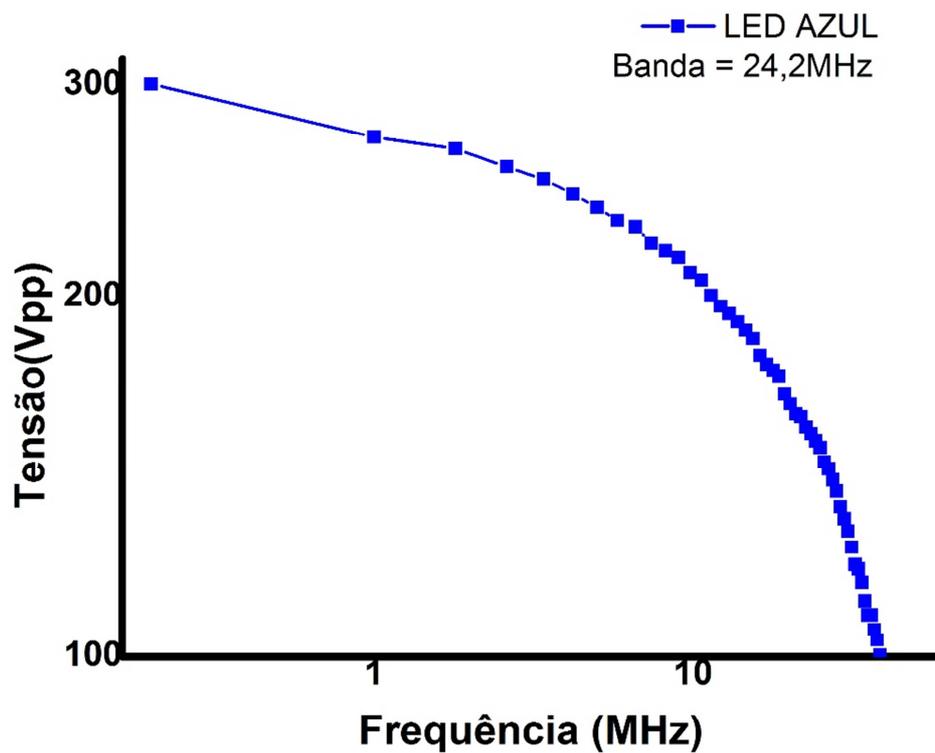


Figura 32: Largura de Banda do LED Diemount Azul (460nm)

LED	Potência (mW) em 20mA	λ nominal (nm)	Banda (MHz)
AZUL	4	460	24,2MHz
VERMELHO	4	650	28,9MHz
ÂMBAR	1,4	590	23,3MHz
VERDE	2,3	520	22,95MHz

Tabela 3: Largura de banda verificada

Conforme detalhado no capítulo anterior, os LEDs têm, dentre suas propriedades, o tempo de resposta para recombinação de seus portadores. Esse

tempo pode ser alcançado através de cálculos reversos, visto que, empiricamente, temos o valor da banda desses dispositivos.

Preocupou-se em verificar as bandas dos LEDs, principalmente, por conta da operação dos mesmos. A fim de evitar os efeitos de memória (*memoryless*), a modulação aplicada ao LED será cuidadosamente aplicada. Portanto as frequências de repetição da onda de formato dente de serra, não passarão de 2,4 MHz, conforme será visto nos próximos tópicos.

Na comparação entre o comportamento das larguras de banda dos LEDs, é possível notar que o LED vermelho foi excitado com uma tensão de pico a pico, maior que os outros, seguido pelo âmbar, o verde e o azul, conforme Figura 33, a seguir.

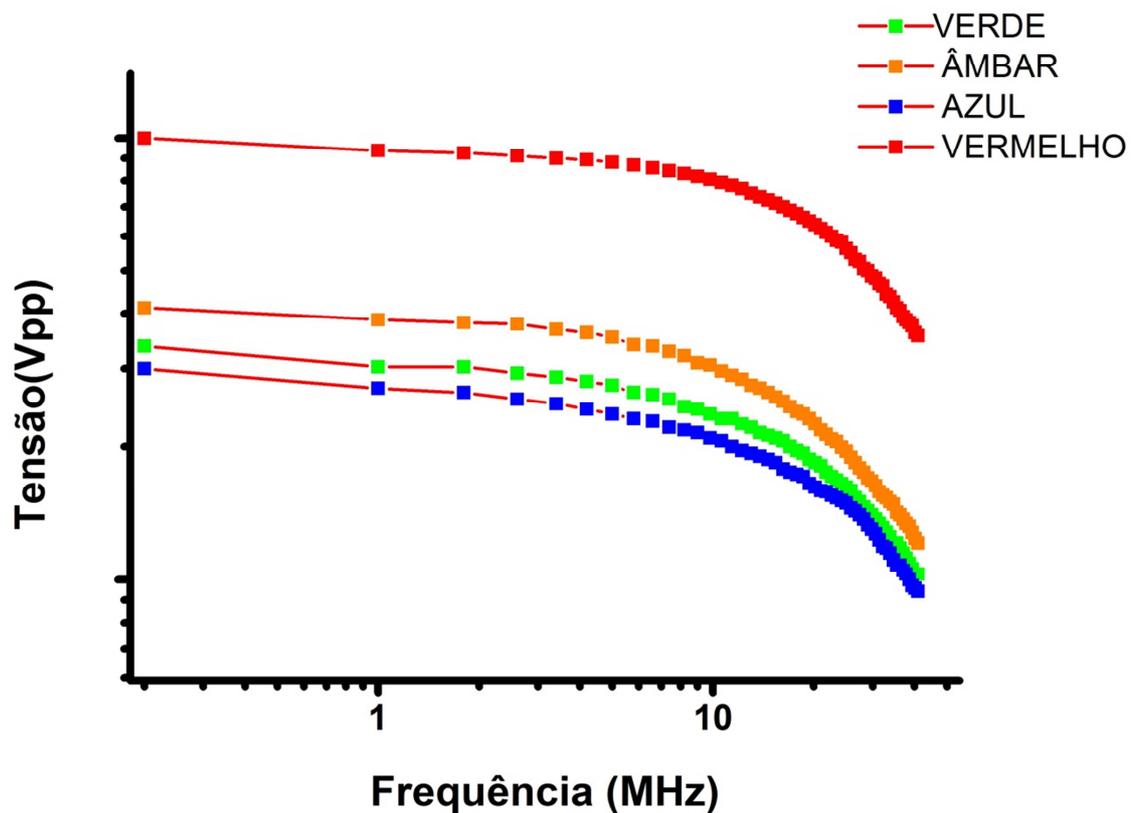


Figura 33: Comparação entre as bandas de operação dos LEDs

3.5 – CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA: NÃO-LINEARIDADE

Neste tópico será abordada a caracterização da resposta PxV (linearidade) dos LEDs, utilizando como modulação as ondas dente de serra. O motivo desta é por conta de seu crescimento progressivo e linear. Partindo deste comportamento da curva, modulada no tempo, observa-se a resposta da óptica do LED, reconvertida e observada no osciloscópio. Ou seja, a fim de acompanhar a linearidade de uma onda como essa, foi feito o acompanhamento do sinal gerado pelo LED, através do

Osciloscópio. Cabe ressaltar que o fotodetector utilizado nos experimentos para realizar a conversão óptica não fazia uso de amplificação, portanto os valores exibidos em tela não tem nenhum tratamento de ganho adicional para a recuperação desses sinais.

Nota-se, também, que os gráficos foram normalizados, com objetivo de facilitar a visualização e compreensão do comportamento dessas curvas.

Conforme citado anteriormente, o LED foi modulado utilizando o formato de onda de dente de serra. O que significa um somatório de senóides da seguinte de acordo com a equação 40:

$$f(x) = 1/2\pi \sum_{n=1}^{\infty} (\text{sen}(nx)/n)$$

Equação 41

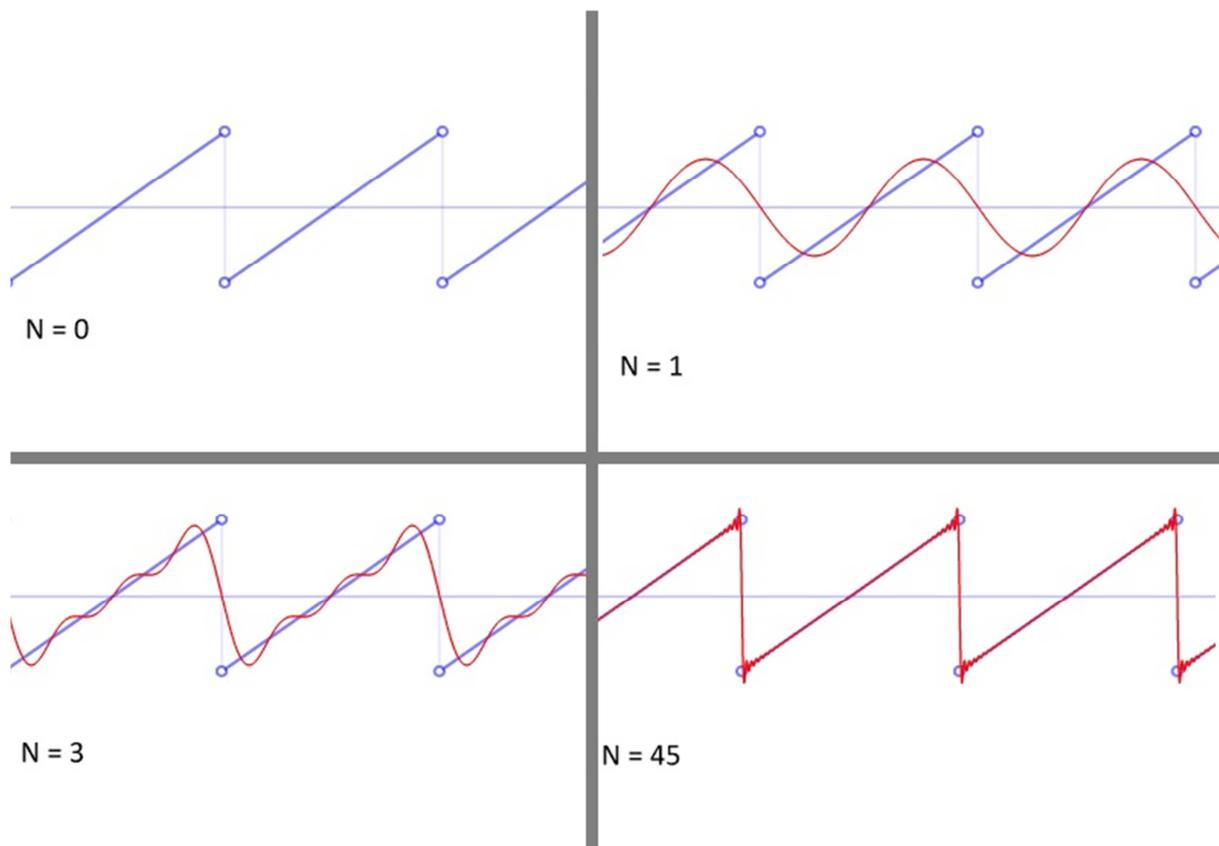


Figura 34: Representação da onda dente de serra como uma série de Fourier

A Figura 34 acima demonstra o comportamento da curva, dado o somatório até um fator que seja suficiente para representar a função dente de serra.

A única área que interessa à análise da resposta não-linear dos LEDs é a curva ascendente do “dente de serra”. Pois ali será observado se a mesma mantém uma reta de derivada constante, ou se sua resposta será distorcida e variar exponencialmente [12]. Neste artigo foi equacionado o comportamento empírico dessa não linearidade. A equação 41 apresenta a curva de modelagem da resposta não linear do LED:

$$y = a_0 + a_1 \cdot (x^c)$$

Equação 42

Para as curvas estudadas nesta dissertação, notou-se que aquelas de menor frequência de repetição obtinham uma não-linearidade mais latente. Portanto seria mais agregador analisar e discutir essas distorções, principalmente se forem discutidas possíveis correções.

Essas curvas foram ajustadas matematicamente, bem como o a reta de derivada contínua, que mais se aproximaria da resposta analisada. As funções são expostas a seguir, porém em um primeiro momento de análise do LED, sem utilização de fibra, de acordo com as equações:

$$f_1(x) = A_1 \cdot e^{(-x/t_1)} + x_1$$

Equação 43

e

$$f_2(x) = A_2 \cdot x + x_2,$$

Equação 44

respectivamente.

A função, $f_1(x)$, representa uma função de decaimento exponencial, donde, A_1 representa a amplitude do sinal, t_1 a constante de decaimento e x_0 uma constante de deslocamento (offset) da curva.

E a função, $f_2(x)$, representa a reta de derivada constante mais aproximada, para tal comportamento. Onde, A_2 representa a inclinação da reta e x_2 a constante de deslocamento (offset) da mesma.

Para parametrizar as curvas expostas a seguir, exibidas da Figura 36 até a Figura 39, ajustaram-se os parâmetros de modo a equacionar as curvas captadas na tela do osciloscópio. A tabela a seguir os elenca para todos os comprimentos de onda em análise.

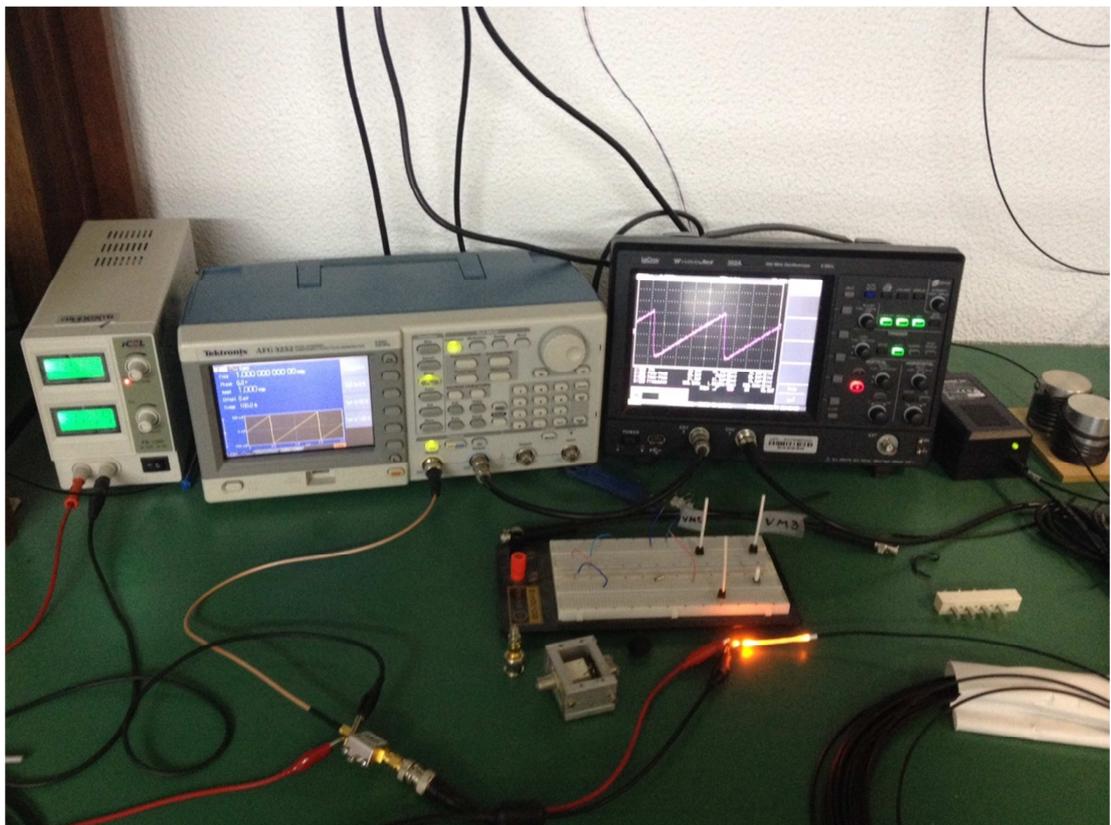


Figura 35: Bancada de experimentos (curva de saída, no osciloscópio)

	$f_1(x)$		
	t_1	A_1	x_1
AZUL (460nm)	$6,69 \cdot 10^{-4}$	-3,1	2
VERDE (520nm)	$4,08 \cdot 10^{-4}$	-3	1,33
ÂMBAR (590nm)	$4,21 \cdot 10^{-4}$	1,45	-2,77
VERMELHO (650nm)	$6,615 \cdot 10^{-4}$	-6,75	2

Tabela 4: Parâmetros da curva equacionada (LED puro)

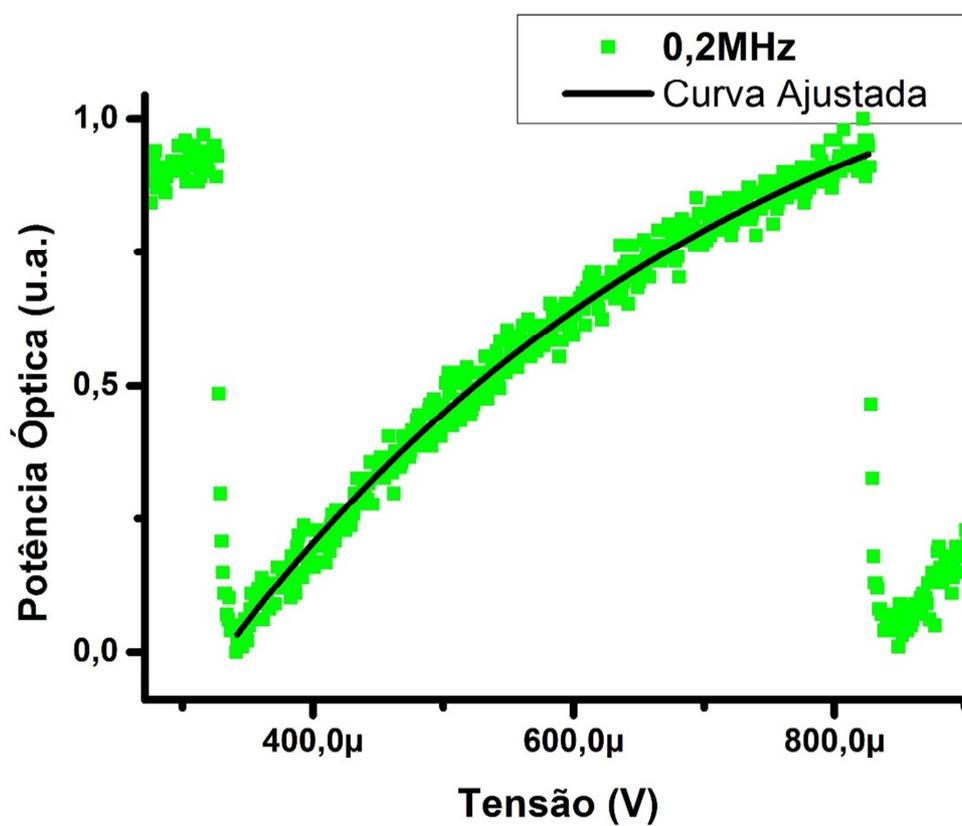


Figura 36: Ajuste da curva de resposta do LED VERDE

Utilizando-se a equação 42, com os parâmetros descritos na tabela 4 acima, ajustou-se a curva apresentada do LED verde, da Figura 36. Onde a equação é definida na equação 44:

$$f_1(x) = -3. e^{(-x/4,08.10^{-4})} + 1,33$$

Equação 45

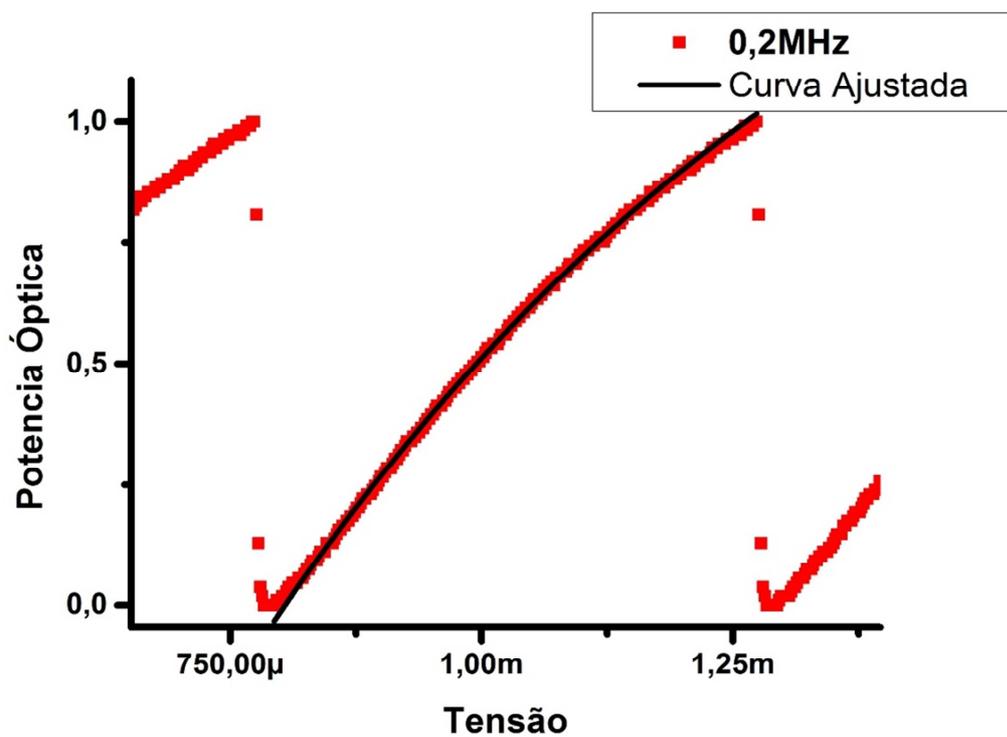


Figura 37: Ajuste da curva de reposta do LED VERMELHO

Utilizando-se a equação 42, com os parâmetros descritos na tabela 4 acima, ajustou-se a curva apresentada do LED vermelha, da Figura 37. Onde a equação é definida na equação 45:

$$f_1(x) = -6,75 \cdot e^{(-x/6,615 \cdot 10^{-4})} + 2$$

Equação 46

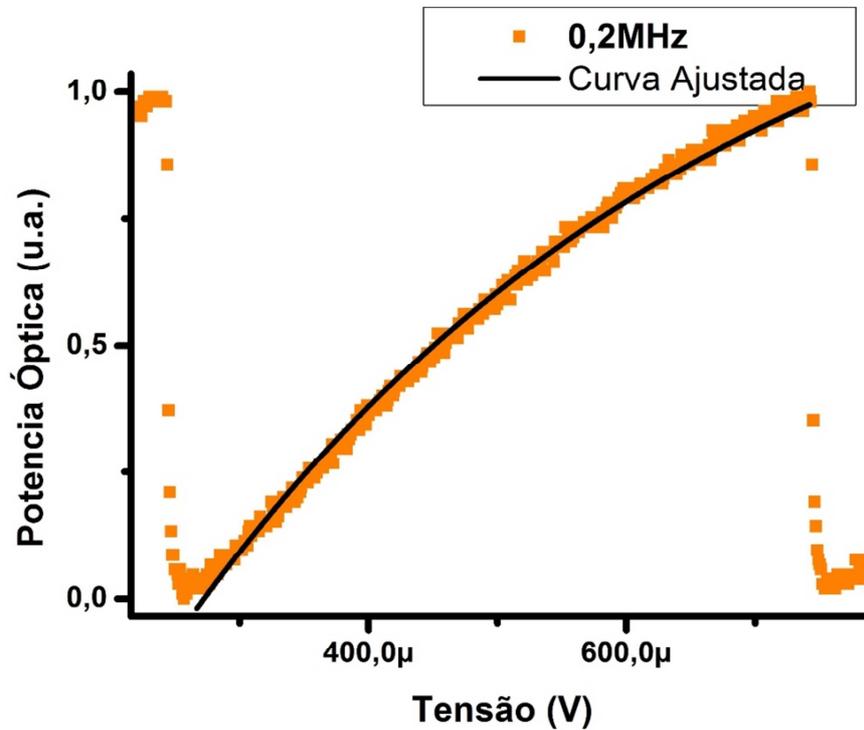


Figura 38: Ajuste da curva de resposta do LED ÂMBAR

Utilizando-se a equação 42, com os parâmetros descritos na tabela 4 acima, ajustou-se a curva apresentada do LED âmbar, da Figura 38. Onde a equação é definida na equação 46:

$$f_1(x) = 1,45 \cdot e^{(-x/4,21 \cdot 10^{-4})} - 2,77$$

Equação 47

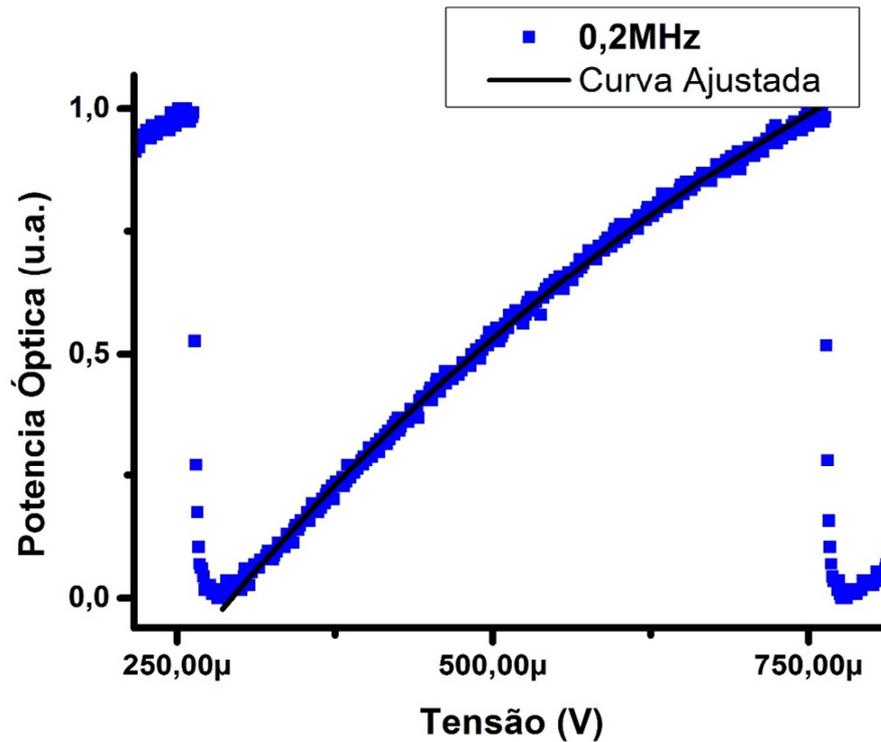


Figura 39: Ajuste da curva de reposta do LED AZUL

Utilizando-se a equação 42, com os parâmetros descritos na tabela 4 acima, ajustou-se a curva apresentada do LED azul, da Figura 39. Onde a equação 47 é definida:

$$f_1(x) = -3,1 \cdot e^{(-x/6,69 \cdot 10^{-4})} + 2$$

Equação 48

Conforme já citado anteriormente, as parametrizações das curvas se restringiram àquelas curvas que apresentavam maior distorção. É possível notar na

Figura 40, Figura 42, Figura 44 e Figura 46 que para as frequências maiores as curvas tornam-se mais lineares.

Por isso o interesse maior naquelas curvas que representam a modulação de sinais com frequências reduzidas.

Analisando a Figura 41, Figura 43, Figura 45 e Figura 47, é possível observar a variação de comportamento das curvas obtidas na medida em que se variou a frequência de repetição da onda dente de serra.

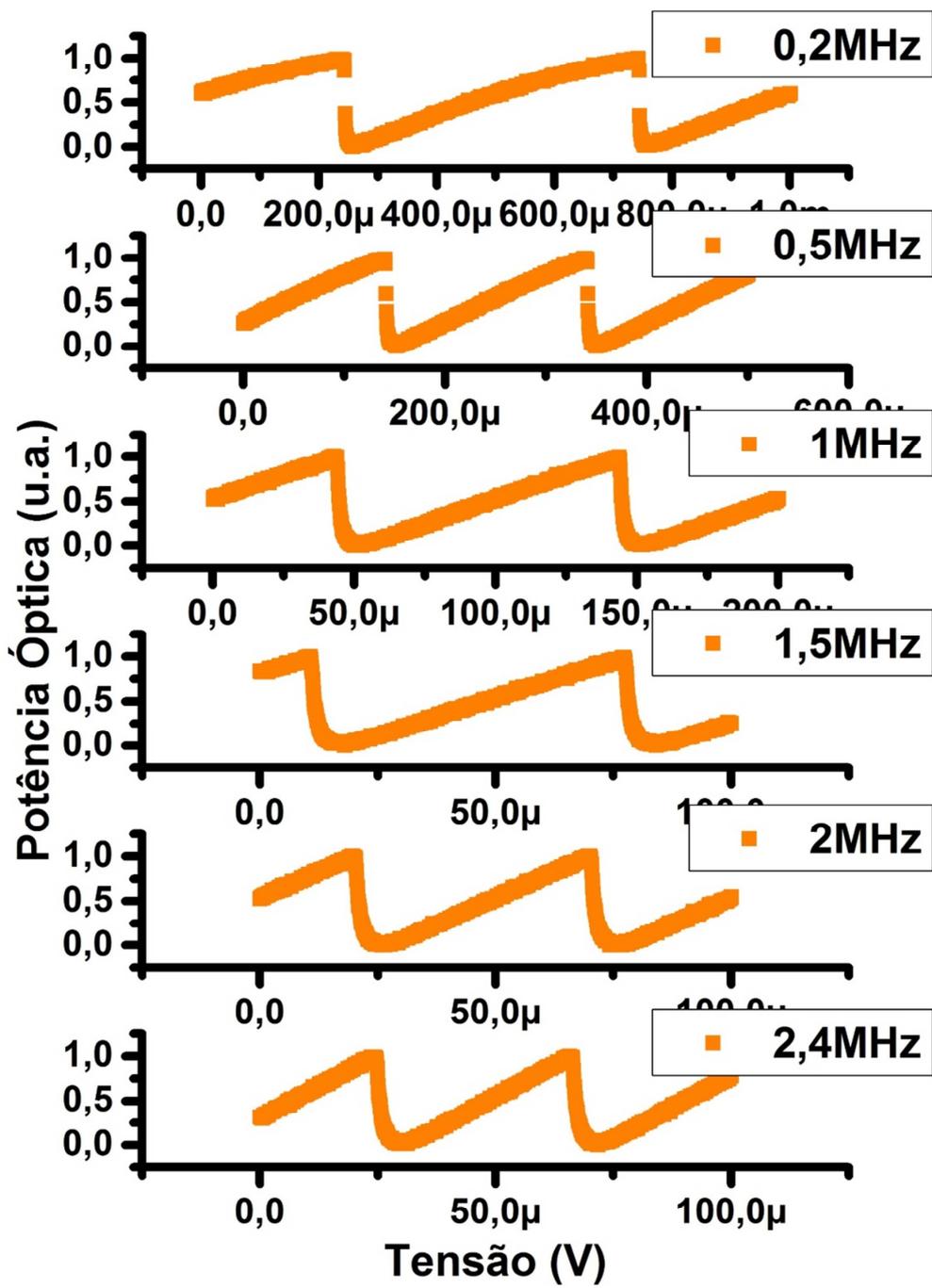


Figura 40: Resposta do LED ÂMBAR à modulação de onda dente de serra

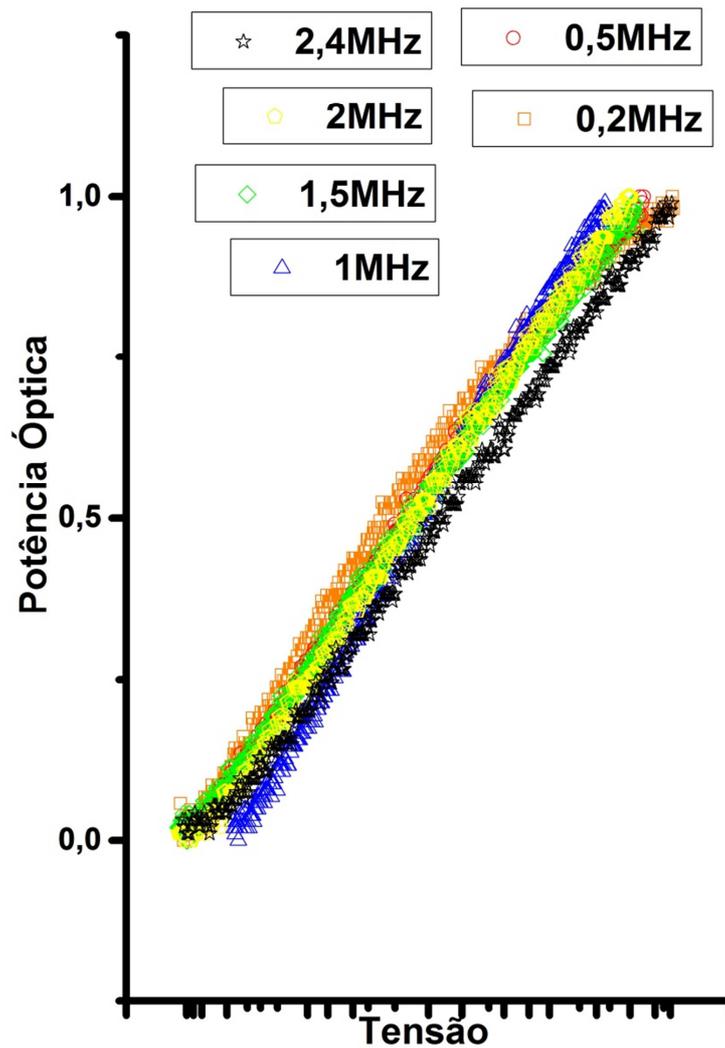


Figura 41: Comparação entre as frequências de modulação do LED ambar

A Figura 41 a cima, faz a comparação entre as curvas crescentes da forma de onda dente de serra, onde é possível observar a não linearidade apresentada pelo LED laranja. Observa-se, qualitativamente, que a curva de modulação em frequências mais baixas é menos linear. Conforme aumentadas, as curvas tendem a linearizar.

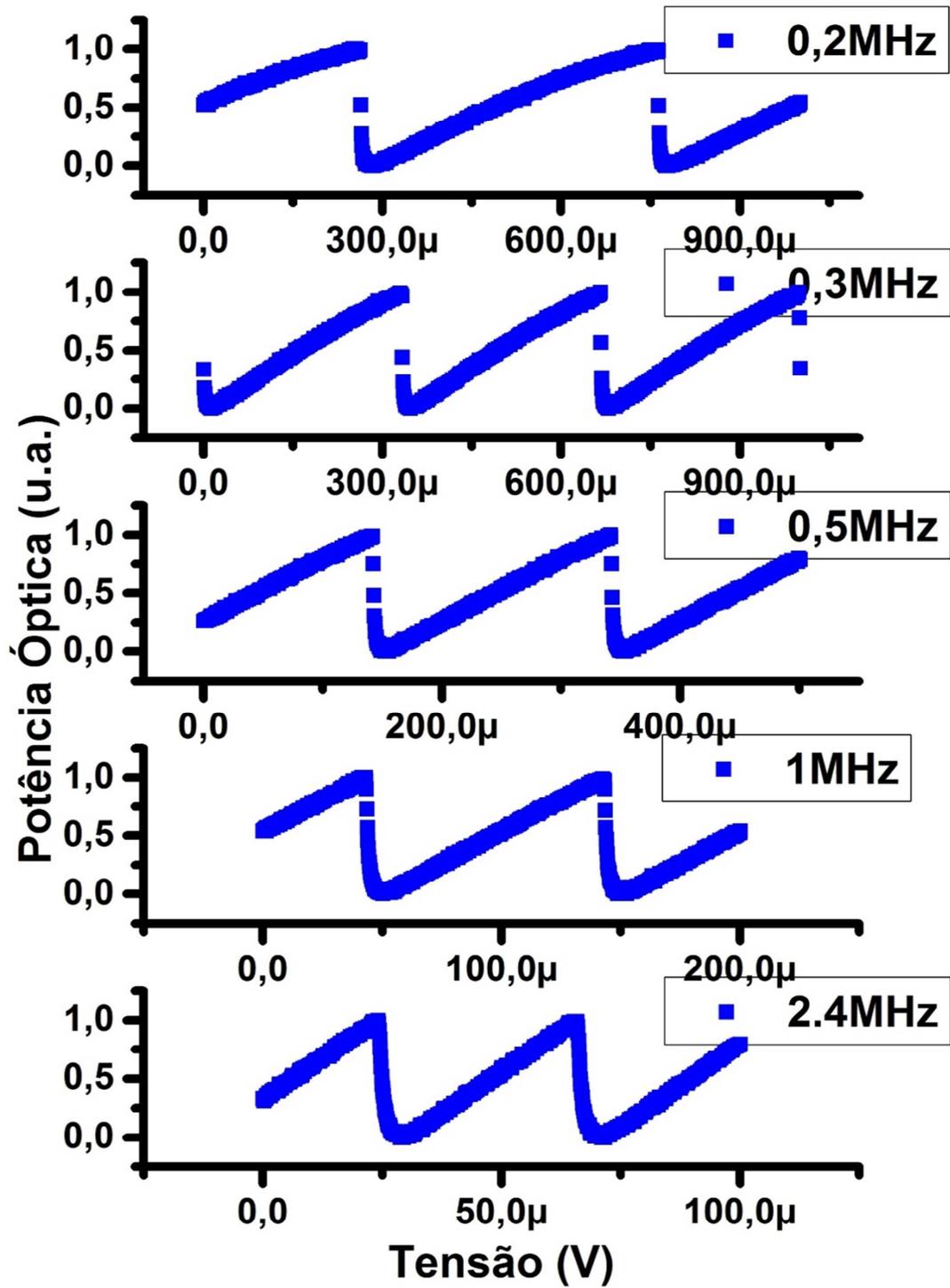


Figura 42: Resposta do LED AZUL à modulação de onda dente de serra

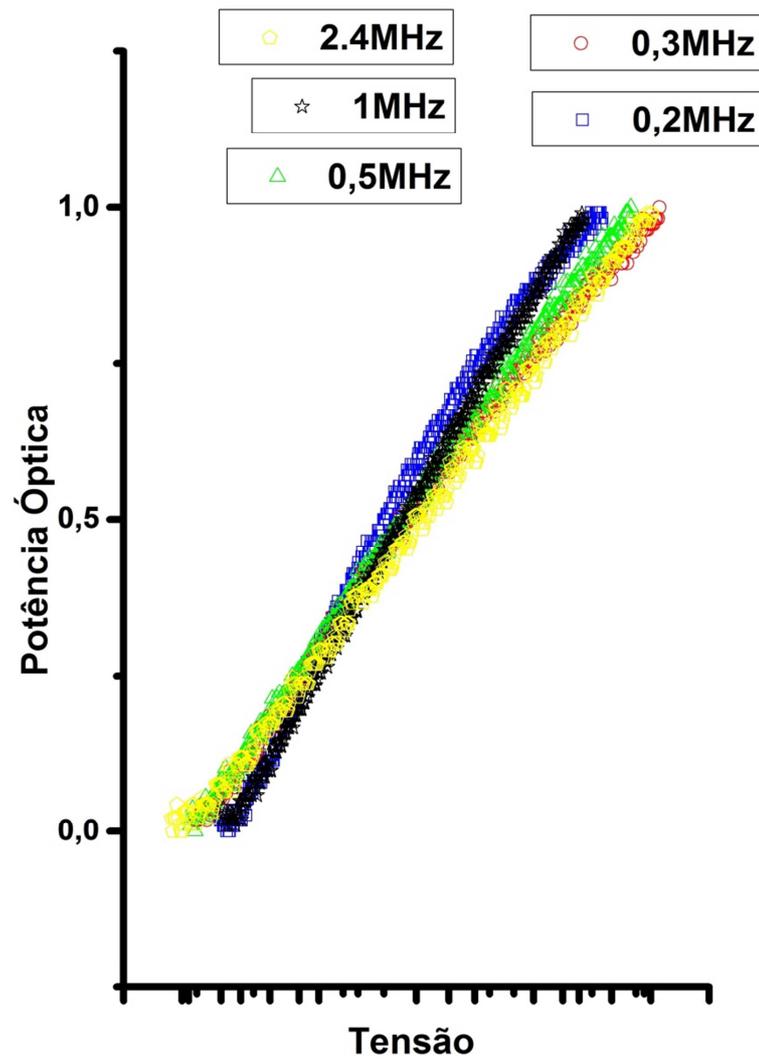


Figura 43: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul

A Figura 43 a cima, faz a comparação entre as curvas crescentes da forma de onda dente de serra, onde é possível observar a não linearidade apresentada pelo LED azul. Observa-se, qualitativamente, que a curva de modulação em frequências mais baixas é menos linear. Conforme aumentadas, as curvas tendem a linearizar.

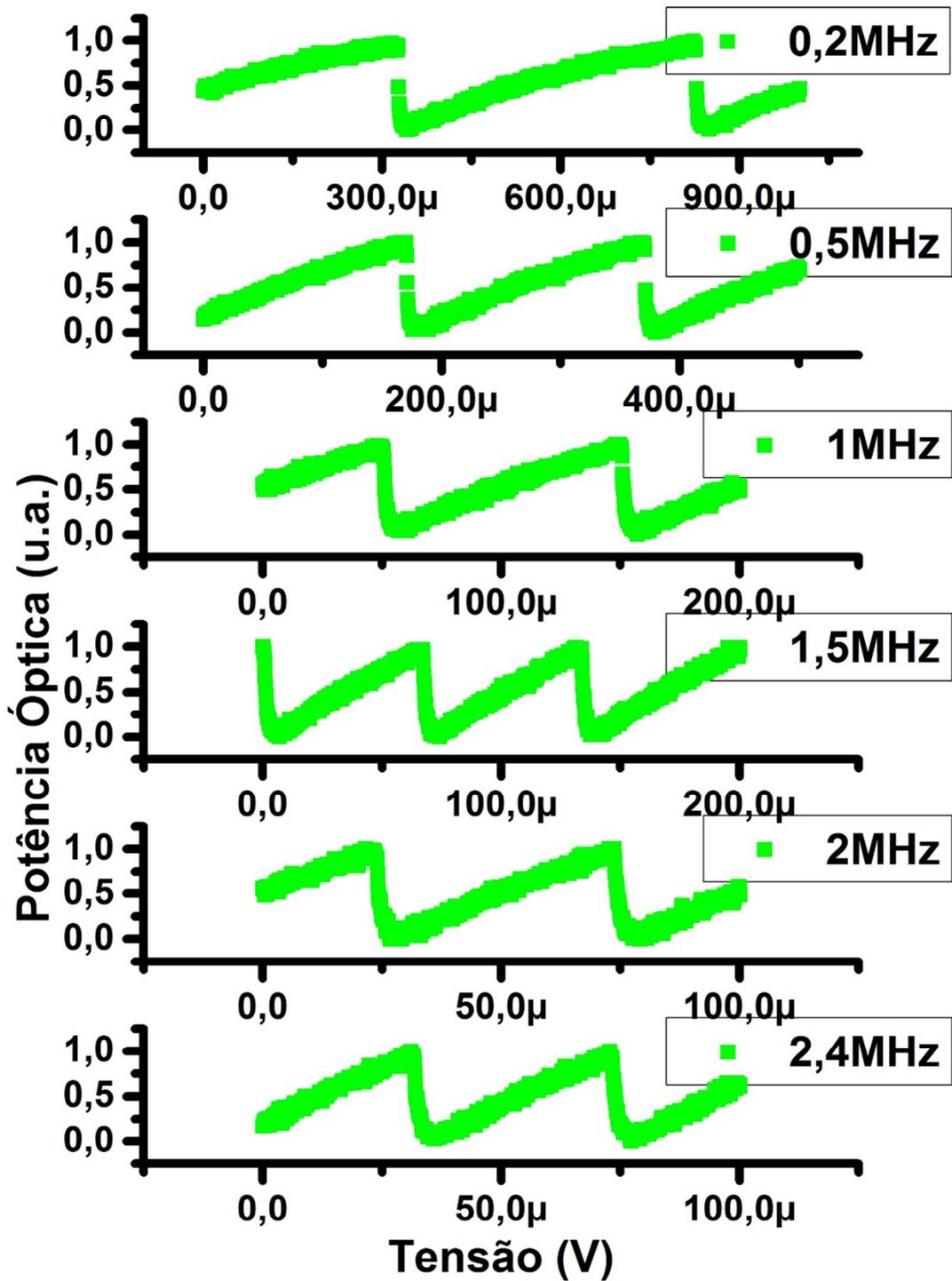


Figura 44: Resposta do LED VERDE à modulação de onda dente de serra

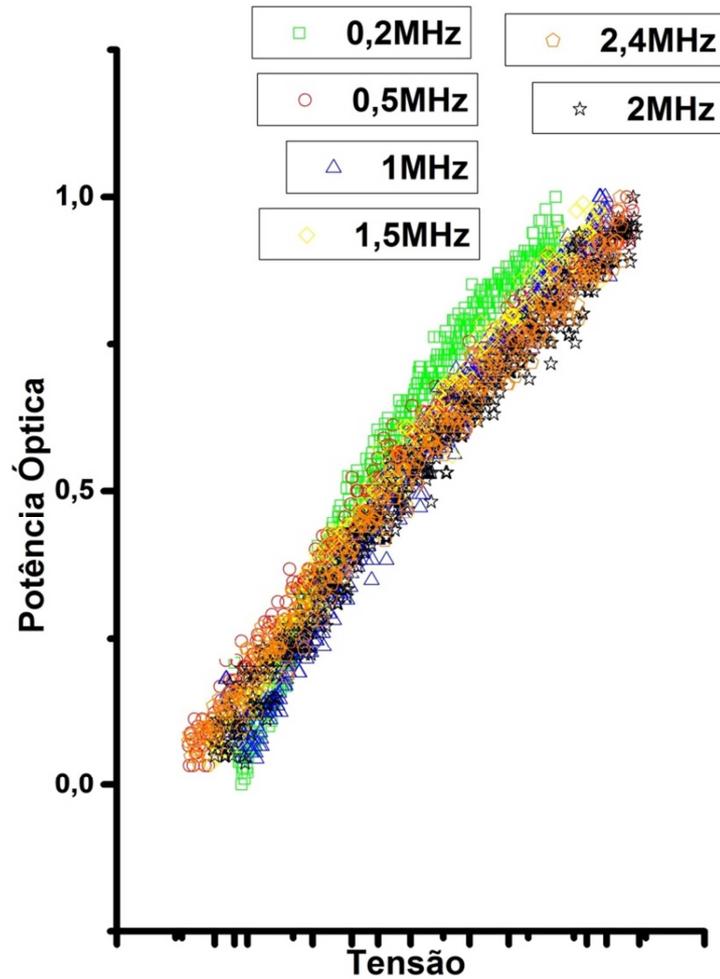


Figura 45: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde

A Figura 45 a cima, faz a comparação entre as curvas crescentes da forma de onda dente de serra, onde é possível observar a não linearidade apresentada pelo LED verde. Observa-se, qualitativamente, que dos LEDs analisados, este apresenta um menor decaimento da linearidade, conforme aumento da frequência.

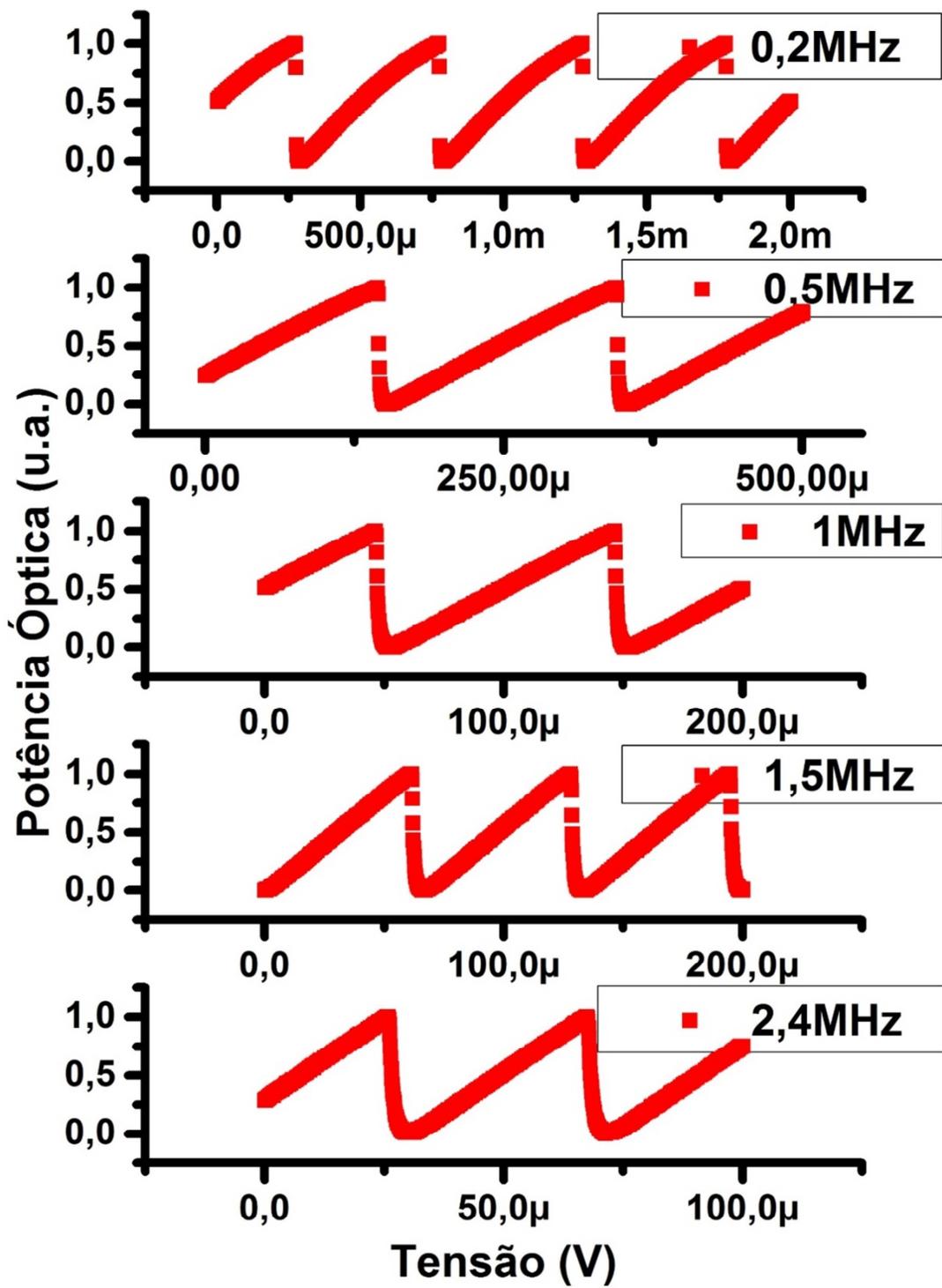


Figura 46: Resposta do LED VERMELHO à modulação de onda dente de serra

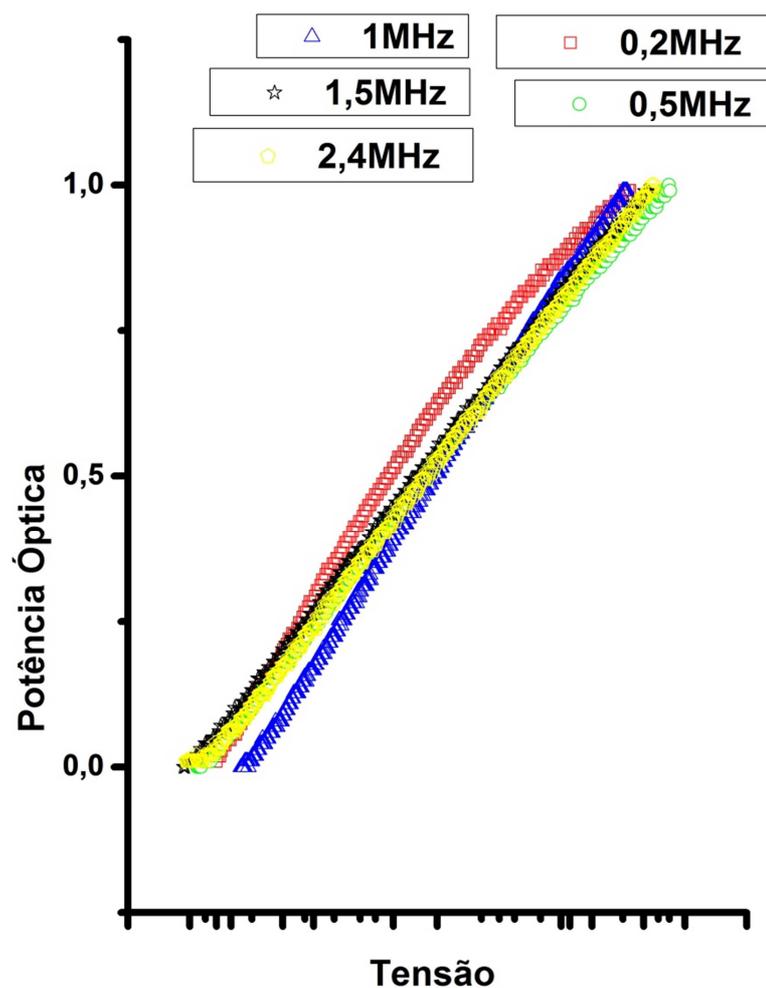


Figura 47: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho

A Figura 47 a cima, faz a comparação entre as curvas crescentes da forma de onda dente de serra, onde é possível observar a não linearidade apresentada pelo LED vermelho. Observa-se, qualitativamente, que a curva de modulação em frequências de 0,2 MHz, apresenta uma não linearidade mais latente, quando comparado às outras frequências aplicadas.

4. CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE NÃO-LINEARIDADE DOS ENLACES COM POFS

Como uma estratégia mais avançada do trabalho de análise da não-linearidade do LED, montou-se um enlace óptico utilizando uma fibra de PMMA (*polimetilmetacrilato*), de aproximadamente 20 (vinte metros), e um misturador de modos (*mode scrambler*). Assim, observou-se o comportamento do enlace, a fim de estudar qualquer variação na curva de intensidade óptica do enlace, e realizar as devidas comparações dos seus comportamentos anteriormente analisados.

4.1 ANÁLISE DE DISTORÇÃO DO ENLACE SEM MISTURADOR MODAL

Nesta nova fase de experimentos, primeiramente montou-se o enlace óptico, sem a utilização de nenhum acoplador modal, e para tal observou-se e analisou-se o comportamento da curva de distorção. Com o objetivo de partir do mesmo patamar de comparação, serão analisadas as curvas para enlace com e sem *mode scrambler*, começando a análise por esta última.

Nesta análise ajustou-se a curva captada no osciloscópio, àquela exponencial da Equação 43 alocando os parâmetros que mais se adequam a não-linearidade exposta. Para efeito de comparação traçou-se a reta que mais se aproxima da curva em discussão e definiram-se as constantes da função desta reta. Assim será possível confrontar qual o comportamento ideal de um sistema linear e qual é o apresentado. Podendo inclusive acrescentar, futuramente, a análise e modelo da pré-distorção.

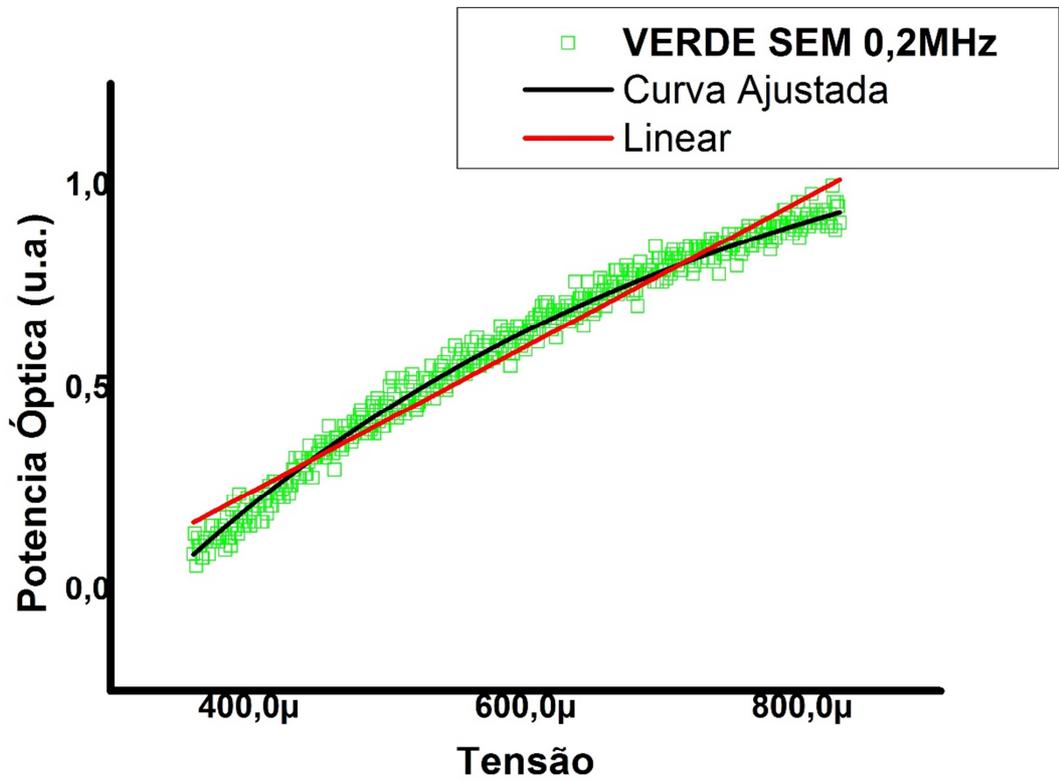


Figura 48: Ajuste da curva de resposta do LED VERDE com fibra e sem *Mode Scrambler*

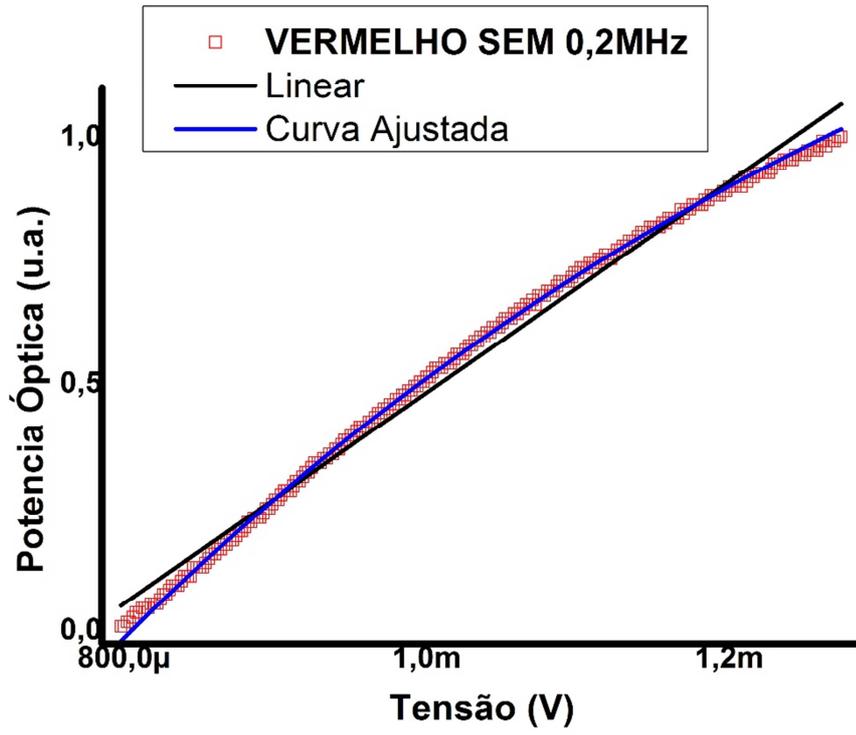


Figura 49: Ajuste da curva de resposta do LED VERMELHO com fibra e sem *Mode Scrambler*

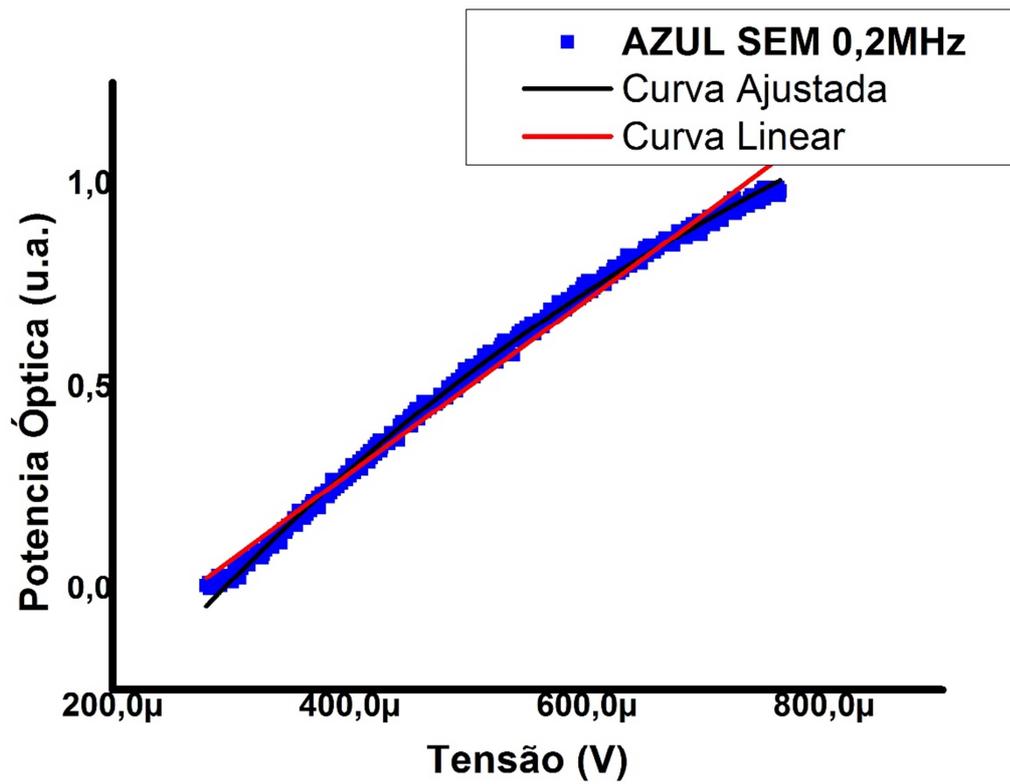


Figura 50: Ajuste da curva de resposta do LED AZUL com fibra e sem *Mode Scrambler*

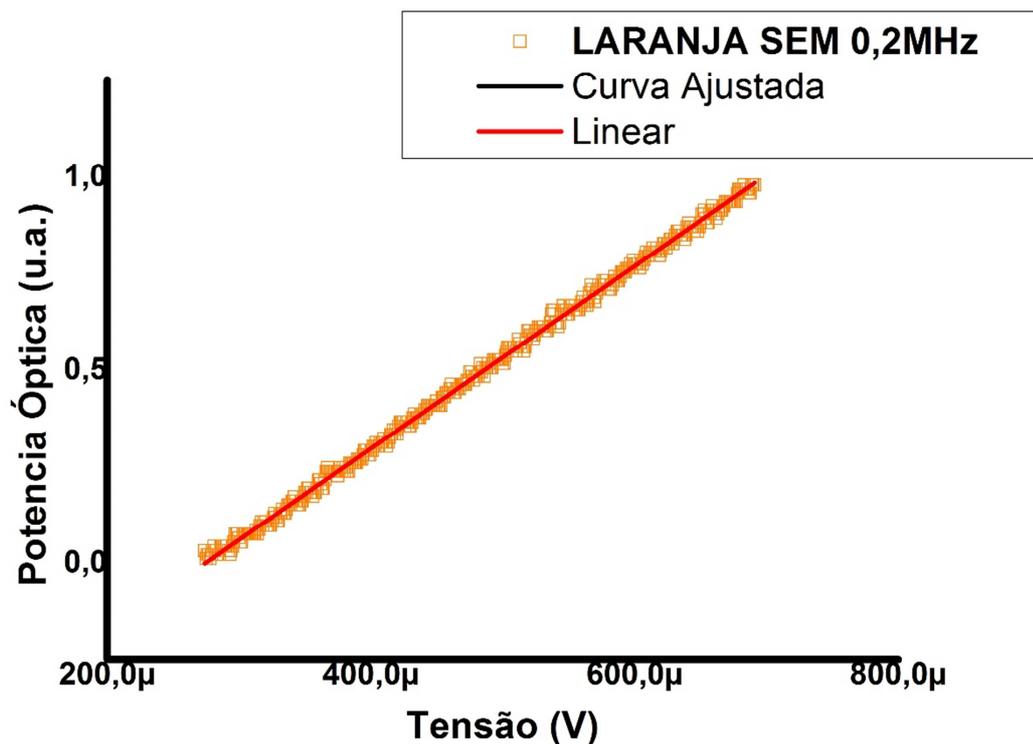


Figura 51: Ajuste da curva de resposta do LED ÂMBAR com fibra e sem *Mode Scrambler*

Observa-se que no LED âmbar a curva ajustada se confunde com a linear. Portanto nos testes realizados, o enlace utilizando um dispositivo com este comprimento de onda apresenta uma resposta completamente linear.

Visto que estudos utilizando esses LEDs para análise e caracterização, nesses comprimentos de onda, e em aplicações para telecomunicações são inéditos, entende-se que a região de atuação do LED âmbar foi amplamente utilizada, ficando sua voltagem de pico a pico na região de linearidade do ganho óptico. Ou seja, a derivada da curva de ganho do componente, nessa região, é contínua e por isso o seu potencial óptico não apresentou distorção em função da

tensão aplicada, nem houve contribuição significativa, que afetasse a linearidade do enlace.

Para todos os LEDs, variados os seus comprimentos de onda, é feita a comparação da parte de subida dessas curvas dente de serra. Com o objetivo de obter uma análise quantitativa do comportamento dessas curvas, convergiram-se todas num mesmo gráfico.

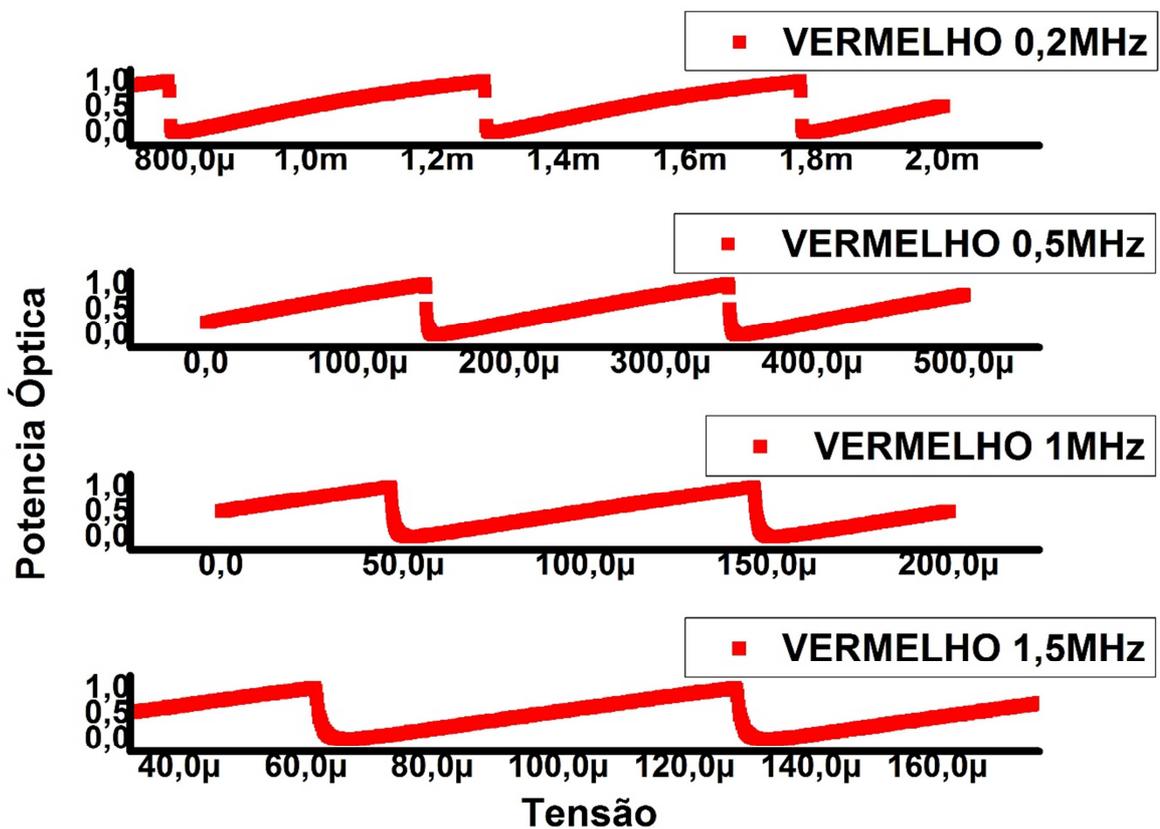


Figura 52: Resposta do LED VERMELHO com fibra à modulação de onda dente de serra

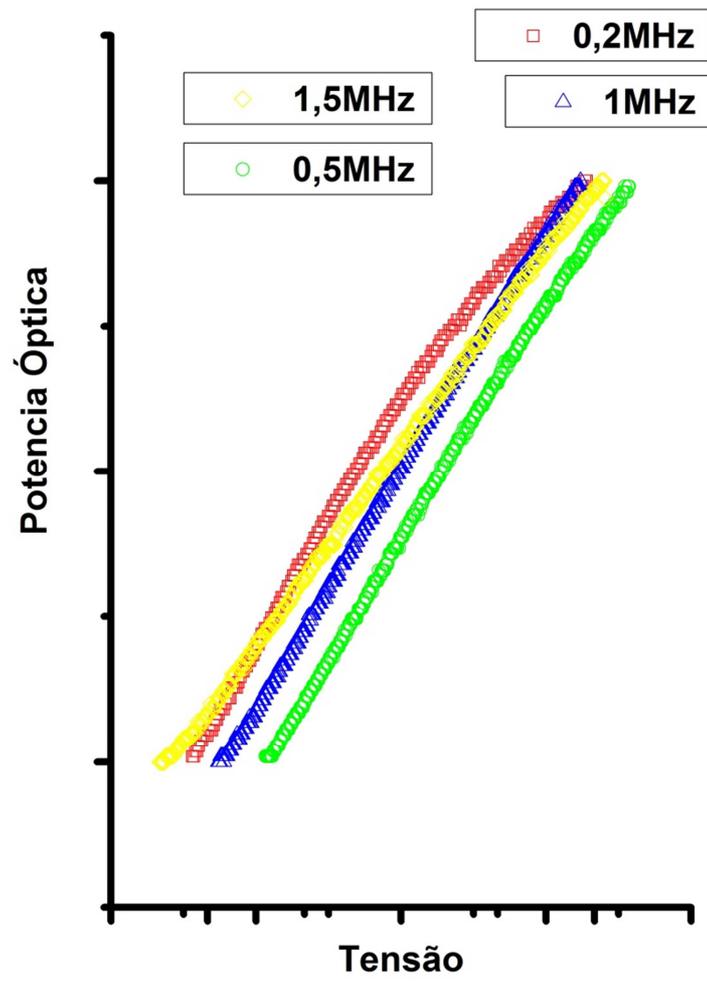


Figura 53: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com fibra

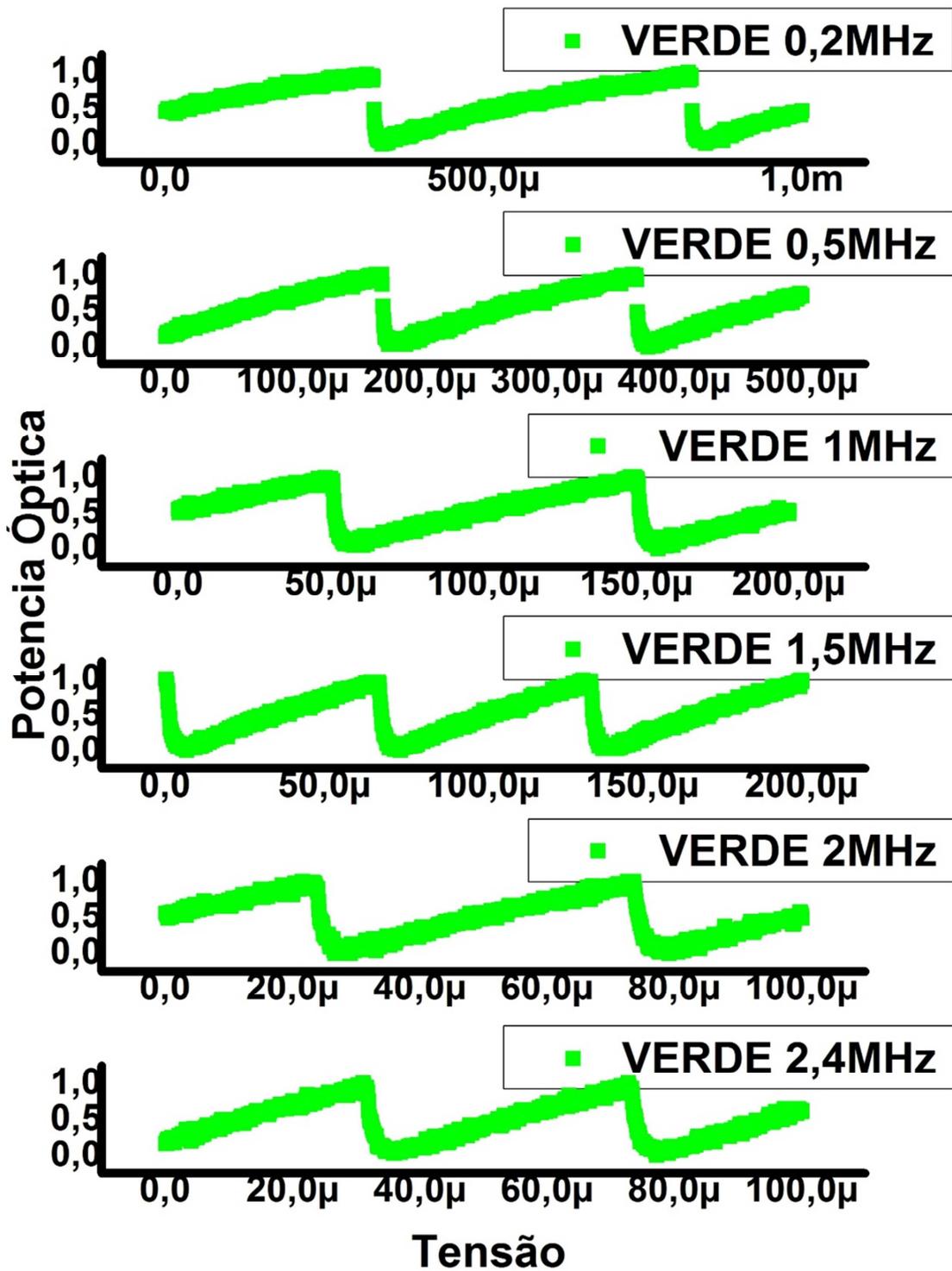


Figura 54: Resposta do LED VERDE com fibra à modulação de onda dente de serra

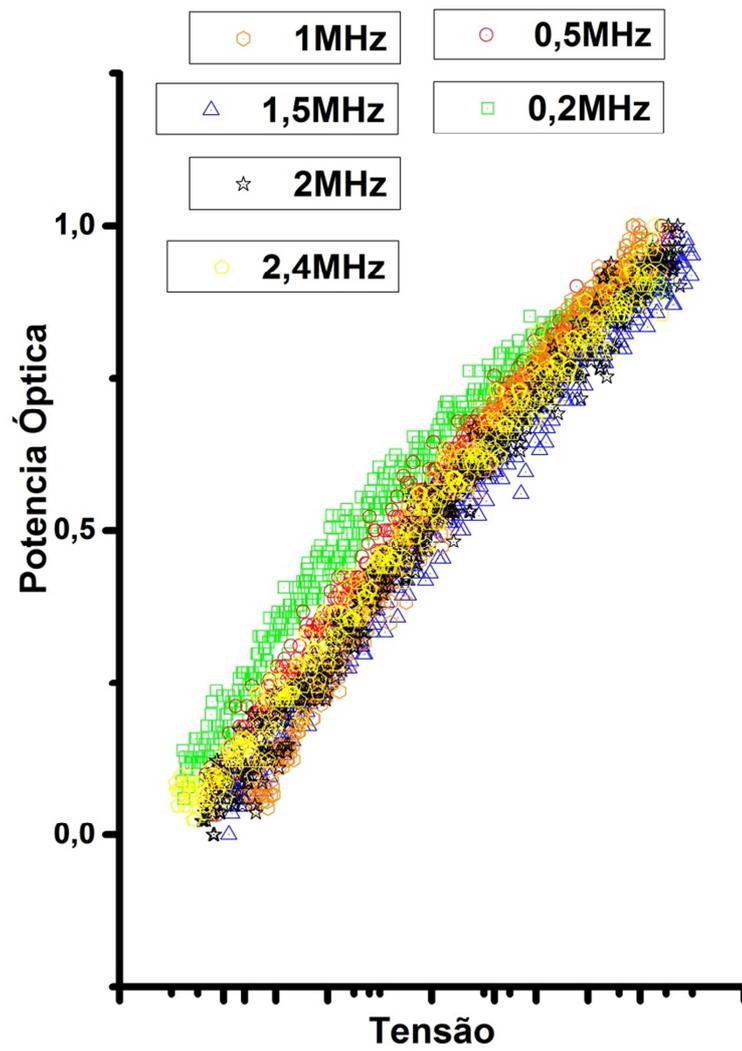


Figura 55: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com fibra

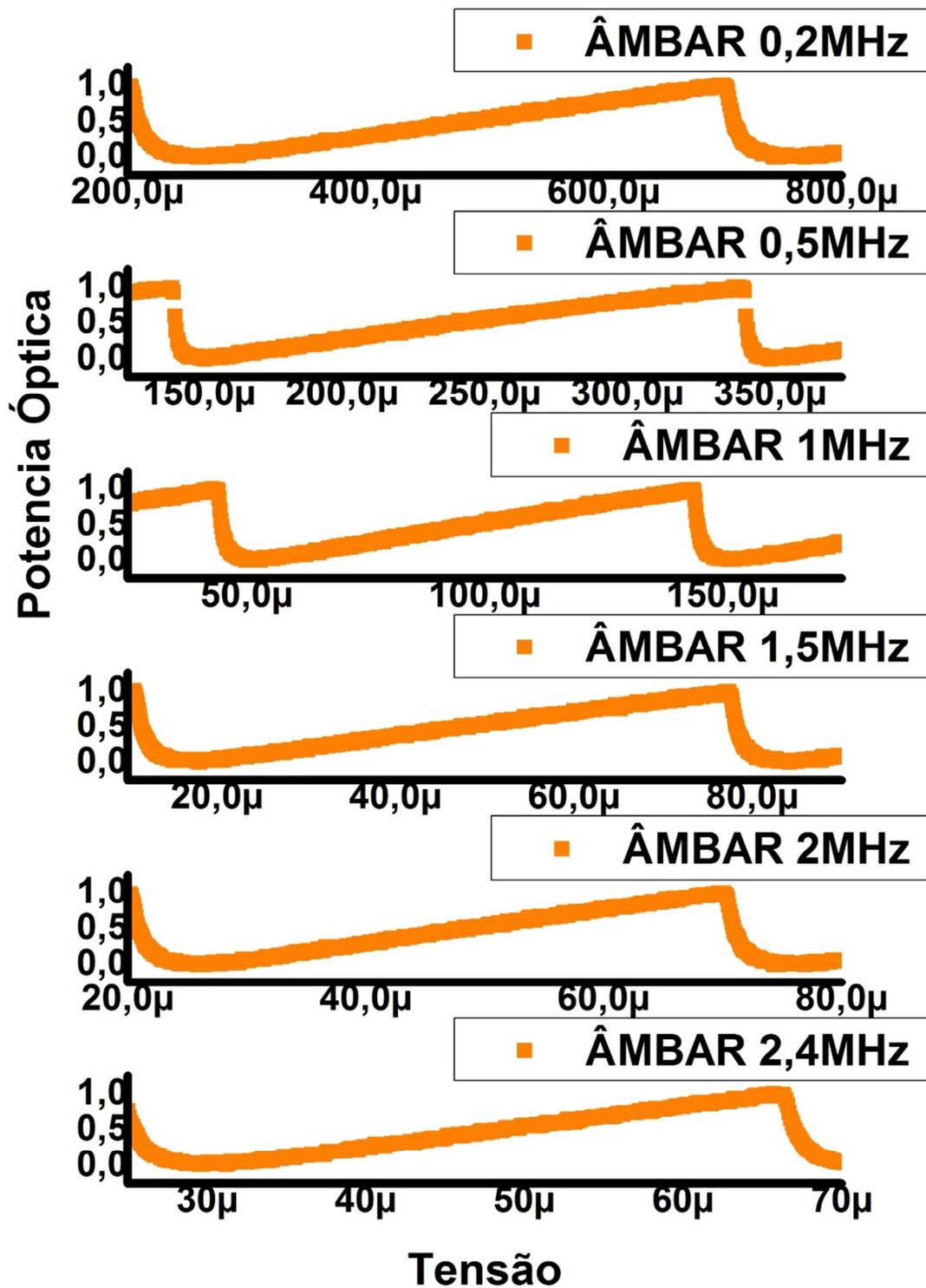


Figura 56: Resposta do LED ÂMBAR com fibra à modulação de onda dente de serra

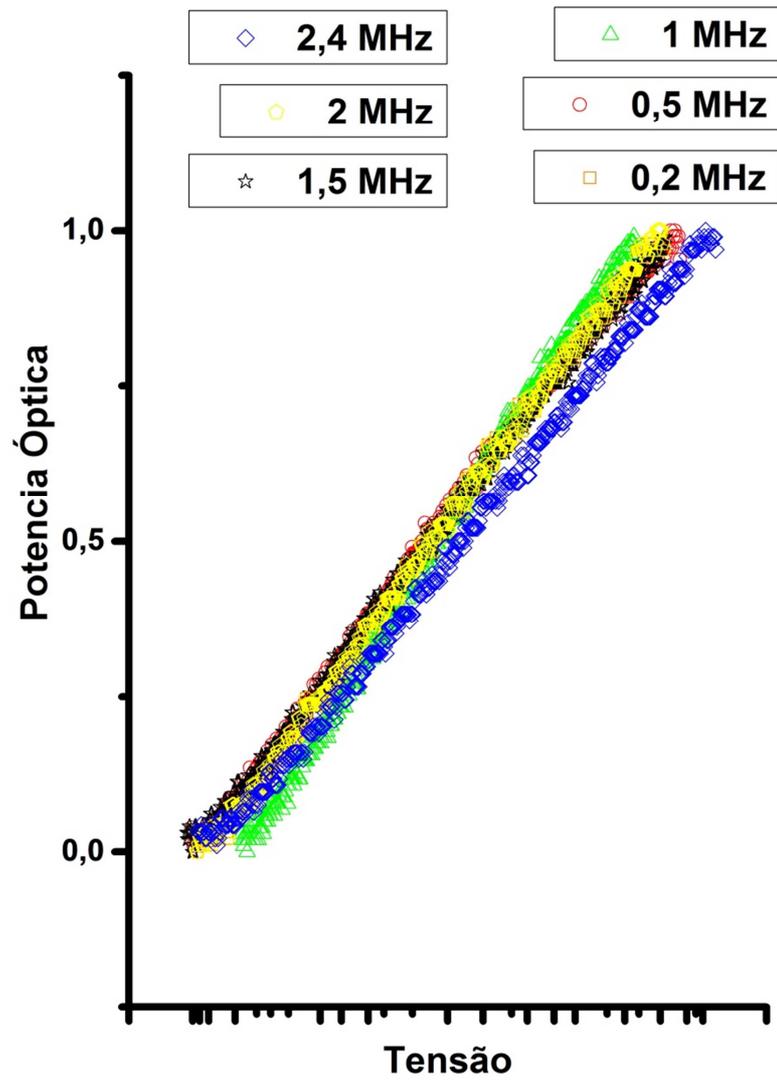


Figura 57: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com fibra

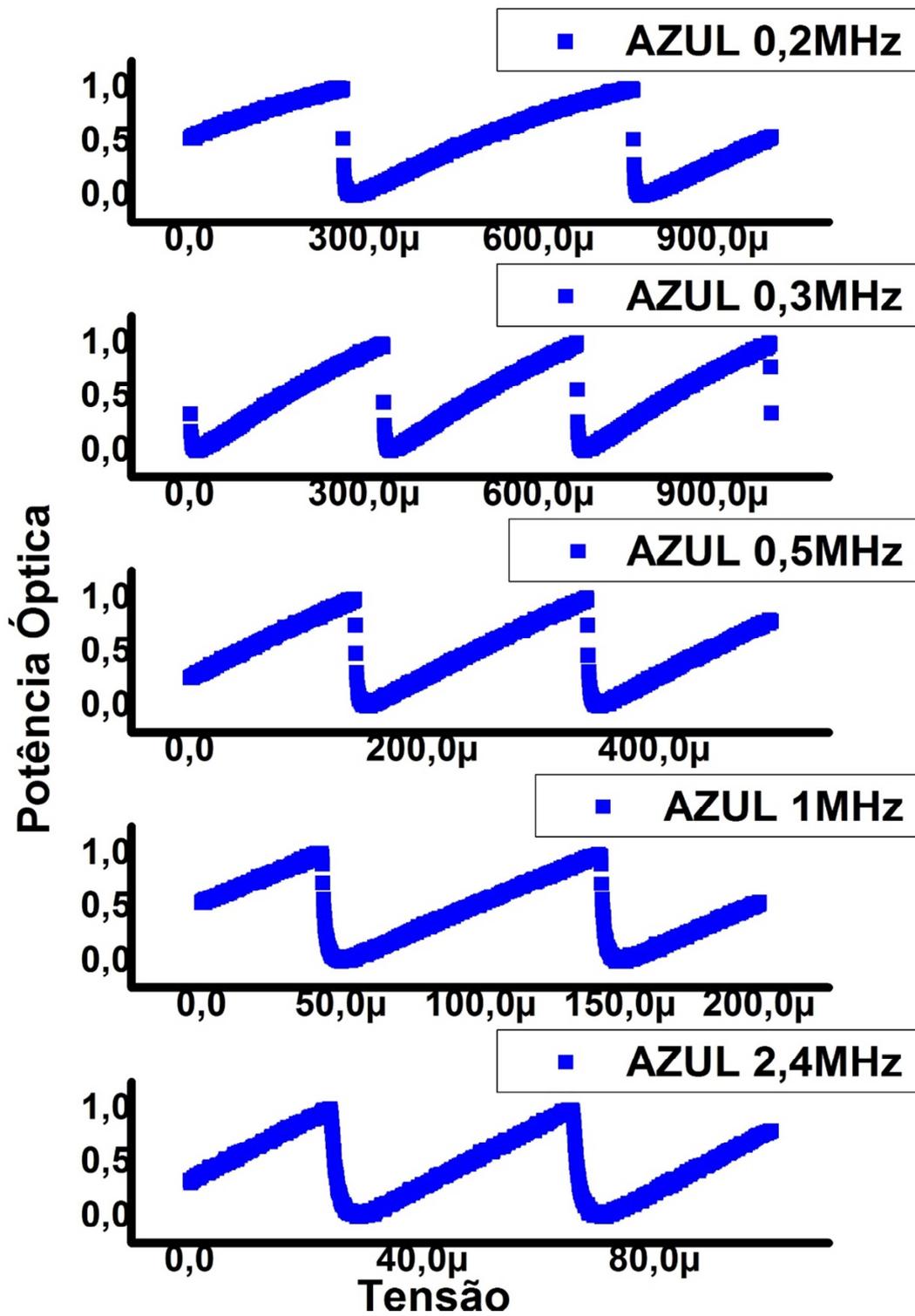


Figura 58: Resposta do LED AZUL com fibra à modulação de onda dente de serra

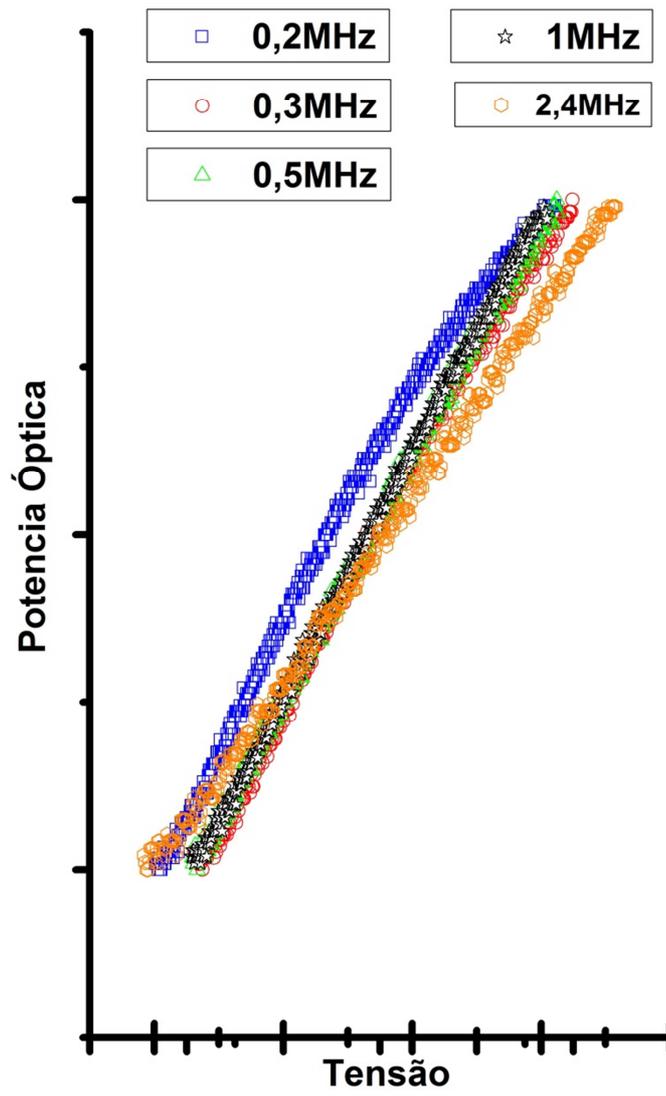


Figura 59: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com fibra

	$f_2(x)$		$f_1(x)$		
	A_2	x_2	t_1	A_1	x_1
AZUL (460nm)	2141,23	-0,569	$6,69 \cdot 10^{-4}$	-3,1	2
VERDE (520nm)	1814,83	-0,486	$4,08 \cdot 10^{-4}$	-3	1,33
ÂMBAR (615nm)	2362,98	-0,648	$-108208 \cdot 10^{-4}$	25568,35	-25569
VERMELHO (650nm)	2133,65	-1,651	$6,616 \cdot 10^{-4}$	-6,75	2

Tabela 5: Parâmetros para LED com fibra

4.2 MISTURADOR DE MODOS (MODE SCRAMBLER)

Quando um sinal luminoso é injetado numa POF, parte dele se propaga guiado sob a forma de milhares de modos (ou raios, quando tratados sobre a visão da óptica geométrica). Toda POF tem um número máximo estabelecido de modos que podem guiá-lo. Existe um número máximo de modos que a POF consegue guiar, proporcional a abertura numérica da fibra.

Nos experimentos, a utilização do misturador de modos se dá para observar o comportamento e caracterização do enlace óptico, visto que tal dispositivo tem considerável implicação na banda passante, atenuação e abertura numérica das POFs.

Este dispositivo é utilizado quando se pretende alcançar a distribuição equilibrada de modos, EMD – *Equilibrium Mode Distribution*. Esta condição estabiliza a banda passante de um enlace com POFs, portanto o uso do *mode scrambler* não

se faz necessário se o comprimento da fibra for suficientemente longo (aproximadamente 50-80m), pois já terá alcançado o equilíbrio.

Visto que nas práticas laboratoriais, utilizou-se uma fibra de PMMA, com comprimento aproximado de 20m, cuja representação das janelas de atenuação da fibra e as cores utilizadas se encontram na Figura 60 a seguir. Além disso, foram utilizados dois tipos de misturadores de modo, corrugado e padrão (modelo inglês e japonês JIS6863, respectivamente) e observado qual seria a diferença dos comportamentos das três configurações [4].

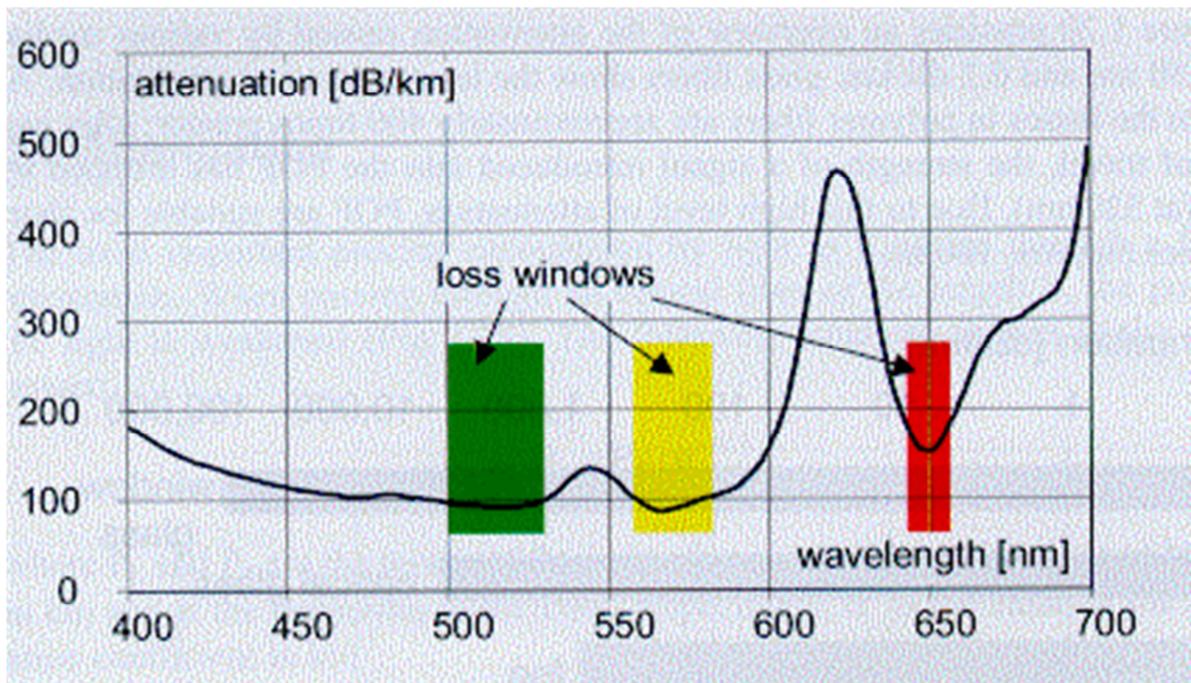


Figura 60: Atenuação espectral da POF SI PMMA padrão

O *mode scrambler* padrão, por questões operacionais, foi utilizado somente no emissor e o corrugado tanto no receptor quanto no emissor.

4.2.1 Banda-passante

O motivo de alocar o dispositivo no emissor é devido à realização de acoplamento modal, já no início da fibra, com isso, o sistema teria um ganho na banda passante, apesar desses modos percorrem todo comprimento do guia, e seus modos começam a dispersar novamente, causando alargamento do tempo de resposta do sinal modulado e por consequência diminuição da banda.

Se for colocado o misturador de modos na outra ponta do enlace, a potência óptica incidente no receptor seria reduzida, por conta da seleção de modos realizada, porém acarretaria num estreitamento do pulso e por consequência um considerável aumento na banda passante do enlace.

A Figura 61 ilustra o comportamento de uma fibra óptica plástica, que tem a variação da sua banda em função do posicionamento do acoplador de modos. Observa-se que, quanto maior for o comprimento da fibra, mais os valores da largura de banda-passante se confundem, pois já estão alcançando a condição de equilíbrio dos seus modos [4].

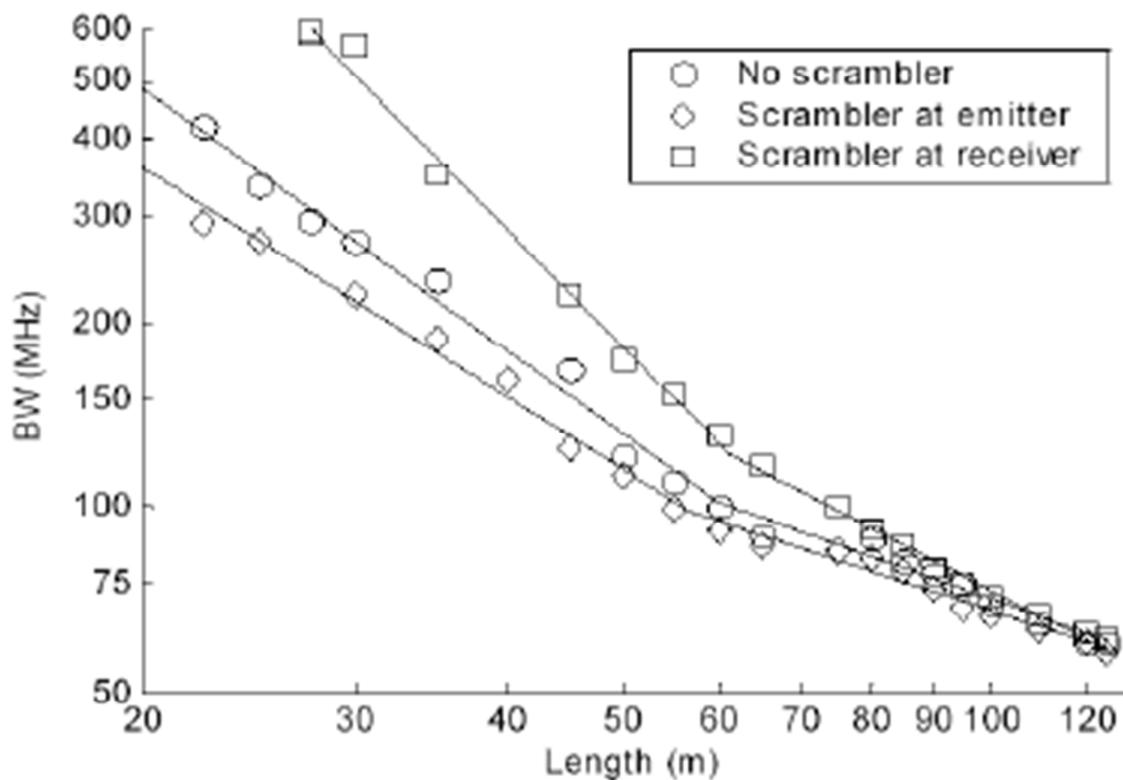


Figura 61: Banda-passante em POF standard com abertura numérica de 0,5 utilizando *mode-scramblers*

A banda-passante em função do comprimento de onda leva em conta implicitamente a linearidade da dispersão.

4.3 ANÁLISE DA DISTORÇÃO DO ENLACE COM MISTURADOR MODAL

Os parâmetros de não-linearidade foram obtidos através da resposta ao estímulo de tensão dado aos LEDs, conforme realizado anteriormente. Porém nesta etapa foram utilizados os *mode scramblers* – MD, Inglês e Japonês, para análise da distorção de um micro enlace óptico no qual se utilizou uma fibra de PMMA, de aproximadamente 20m.

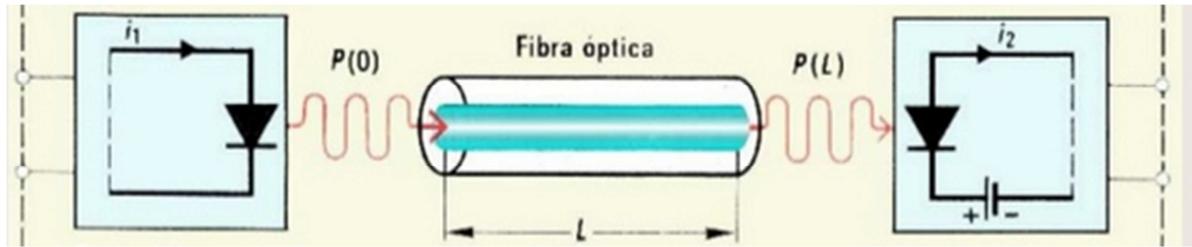


Figura 62: Enlace óptico simplificado

O objetivo aqui foi colocar os dois misturadores de modo nas posições mais diversas, de modo a acompanhar a variação deles no momento quais implicações práticas teríamos na análise da linearidade desses enlaces montados.

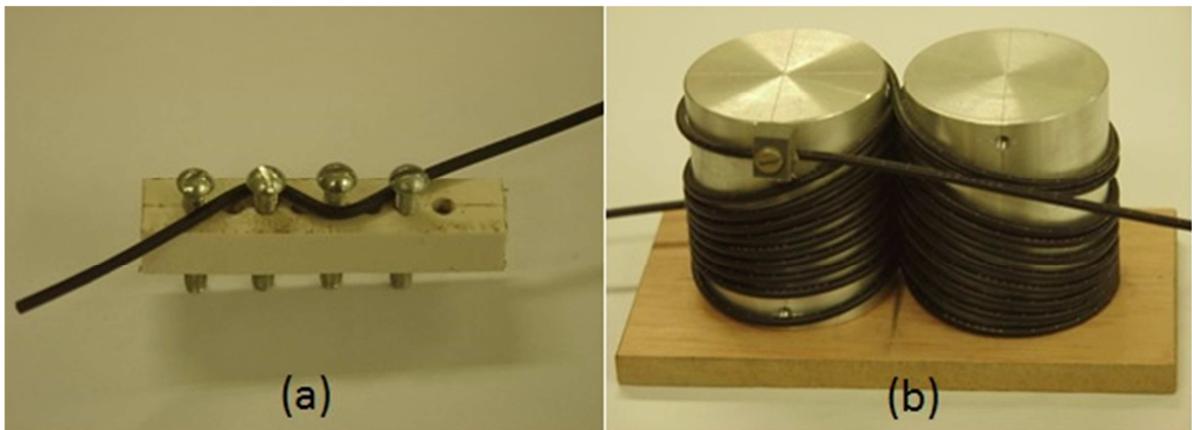


Figura 63: Misturador de modos (*mode scrambler*): (a) corrugado; (b) padrão

O resultado desses experimentos é exibido a seguir.

Porém, por questões de ordens práticas, não foi utilizado o MD padrão no receptor, somente no emissor, pois, apesar de mais bem elaborado, não era possível acoplar a saída de luz ao fotodetector, acarretando uma perda óptica considerável. Logo, somente o corrugado foi utilizado nas duas extremidades da fibra óptica.

Os referidos gráficos se encontram agrupados, primeiramente pelo comprimento de onda do LED utilizado, em seguida pela montagem dos instrumentos.

Ao final de cada gráfico, têm-se a comparação de cada curva, na parte ascendente do dente-de-serra, conforme apresentado em gráficos anteriores. Isso nos permite fazer a análise qualitativa dessas curvas, enquanto a questão analítica do comportamento dessas curvas é feito quantitativamente observando os parâmetros utilizados no ajuste das curvas.

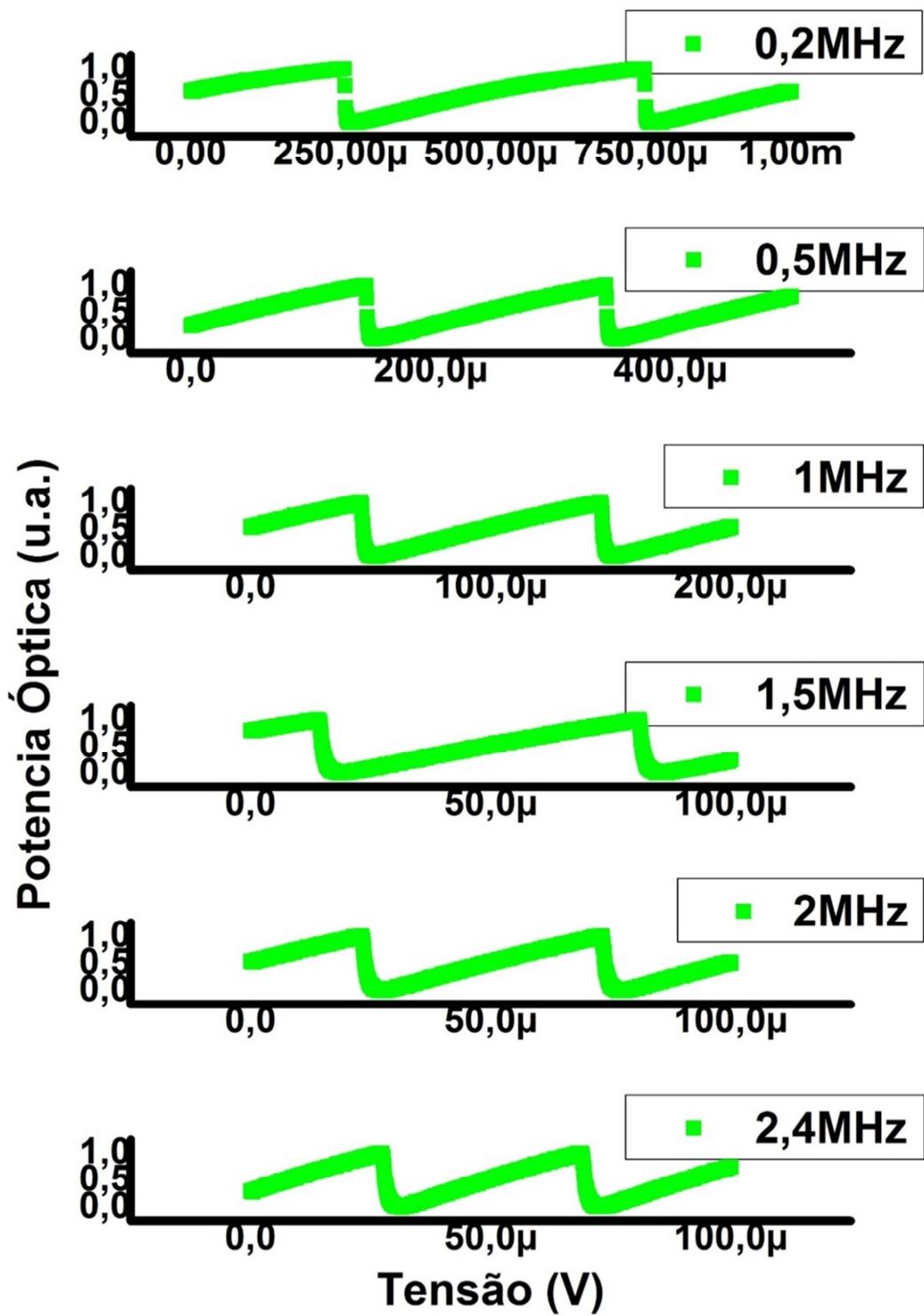


Figura 64: LED VERDE com Mode Scrambler padrão

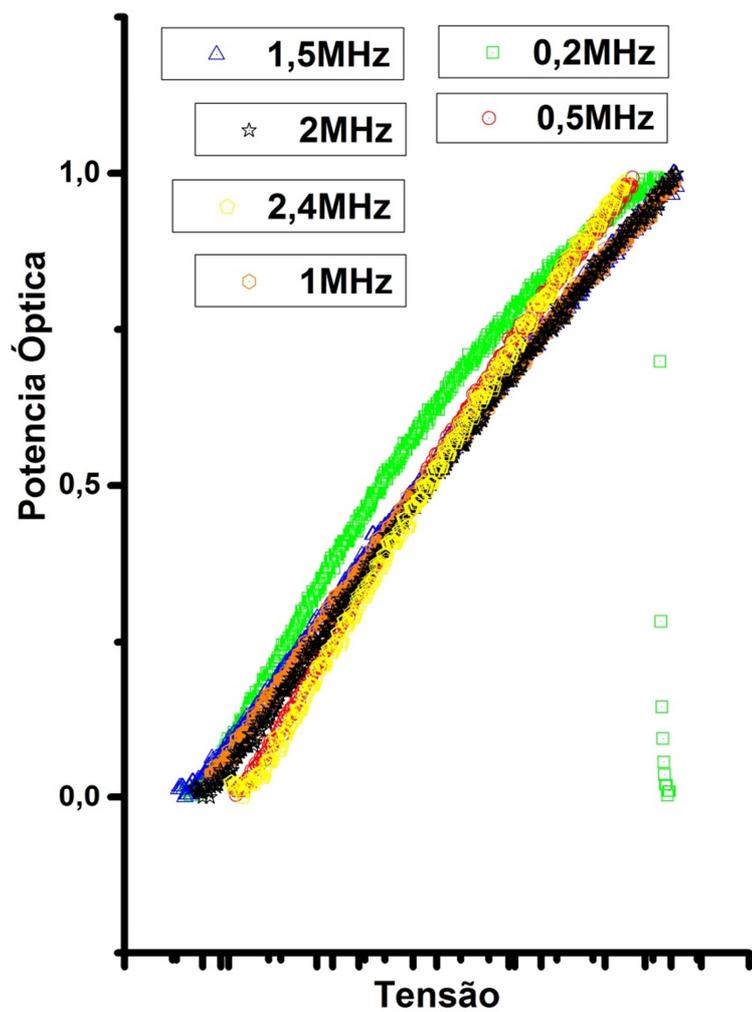


Figura 65: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com Mode Scrambler padrão

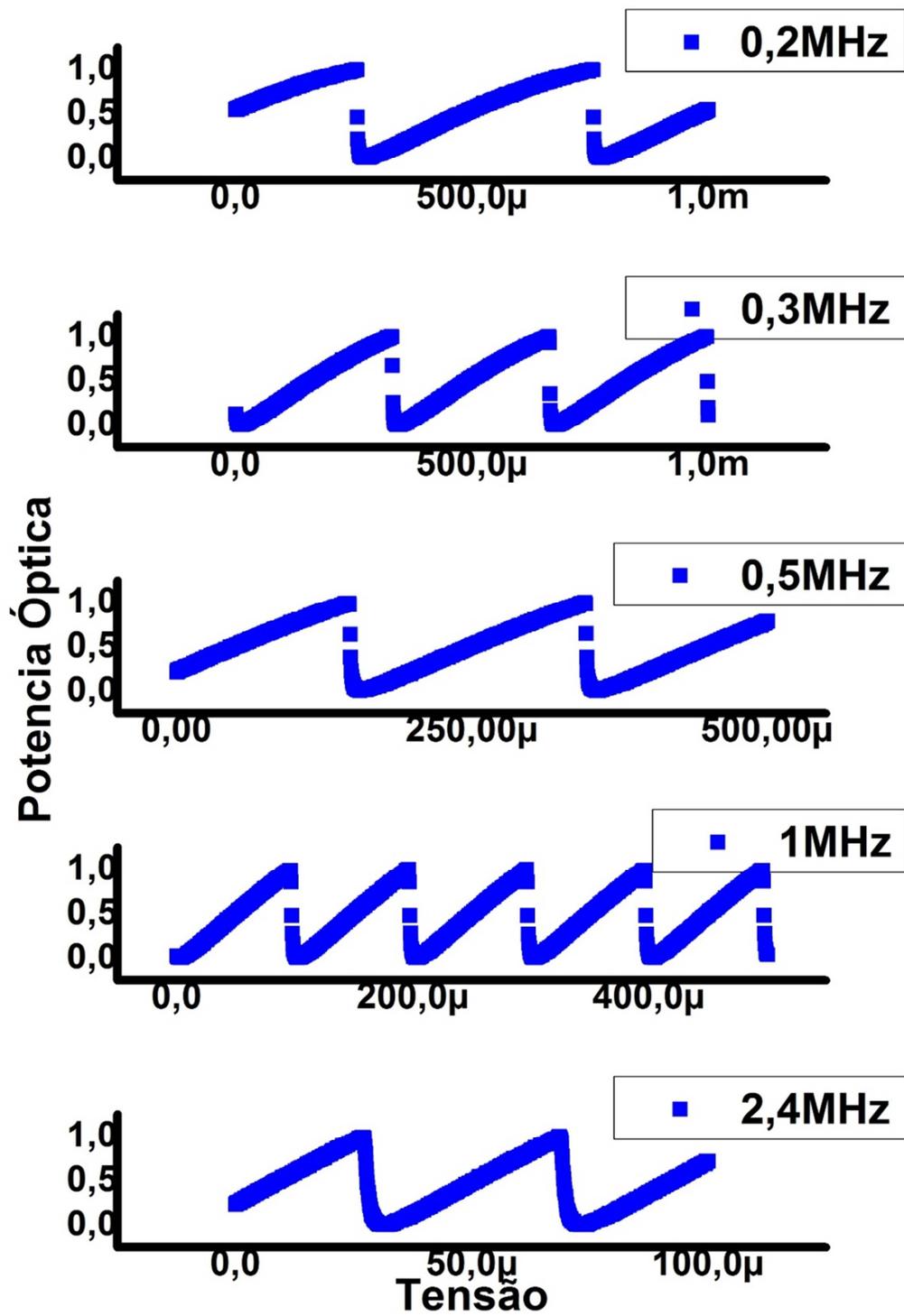


Figura 66: LED AZUL com Mode Scrambler padrão

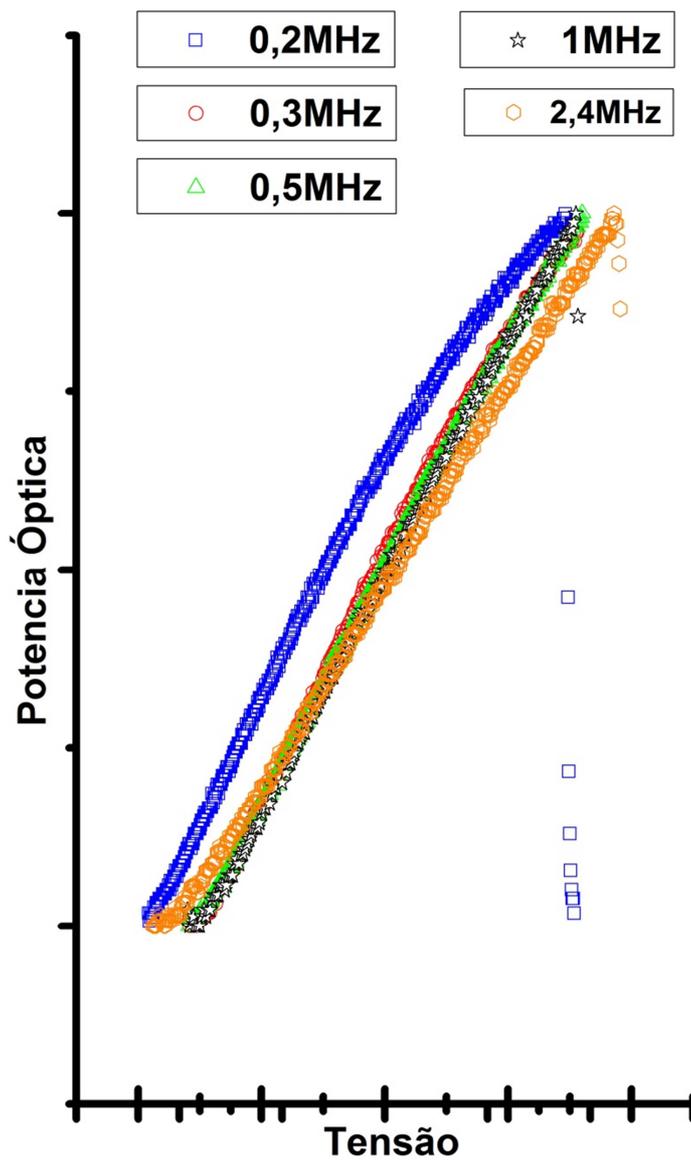


Figura 67: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com Mode Scrambler padrão

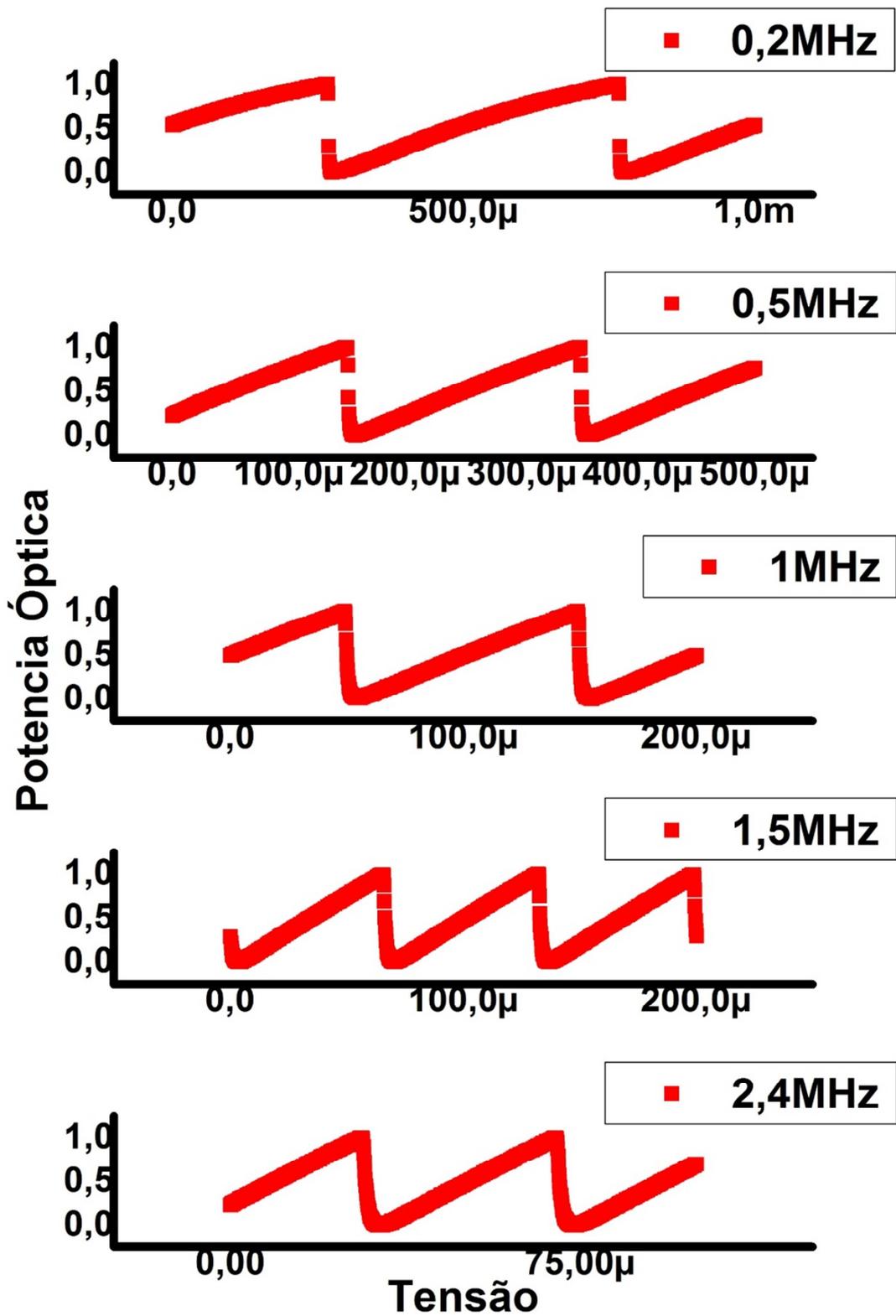


Figura 68: LED VERMELHO com Mode Scrambler padrão

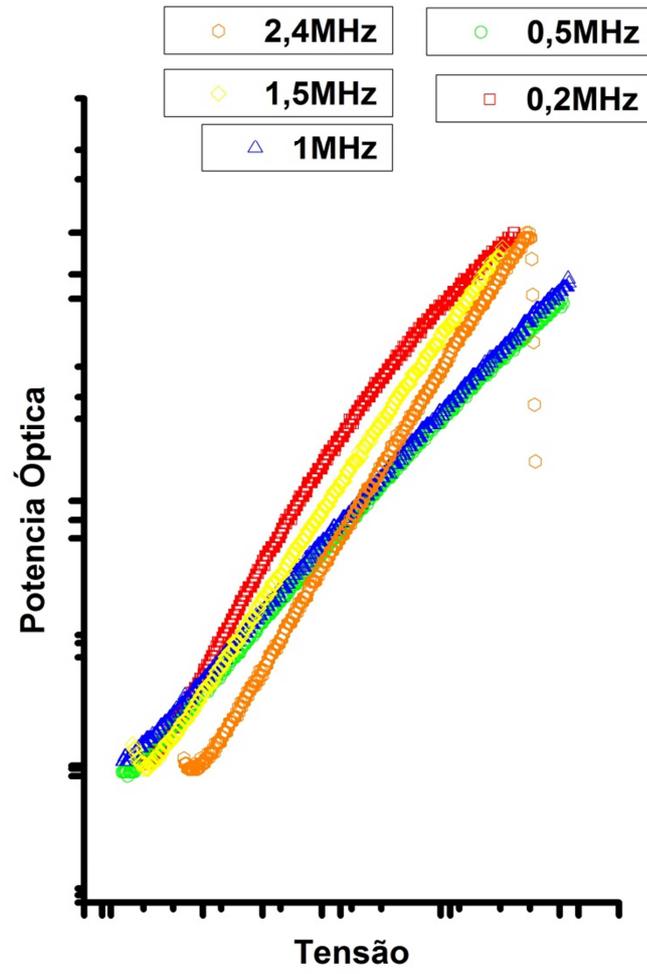


Figura 69: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com Mode Scrambler padrão

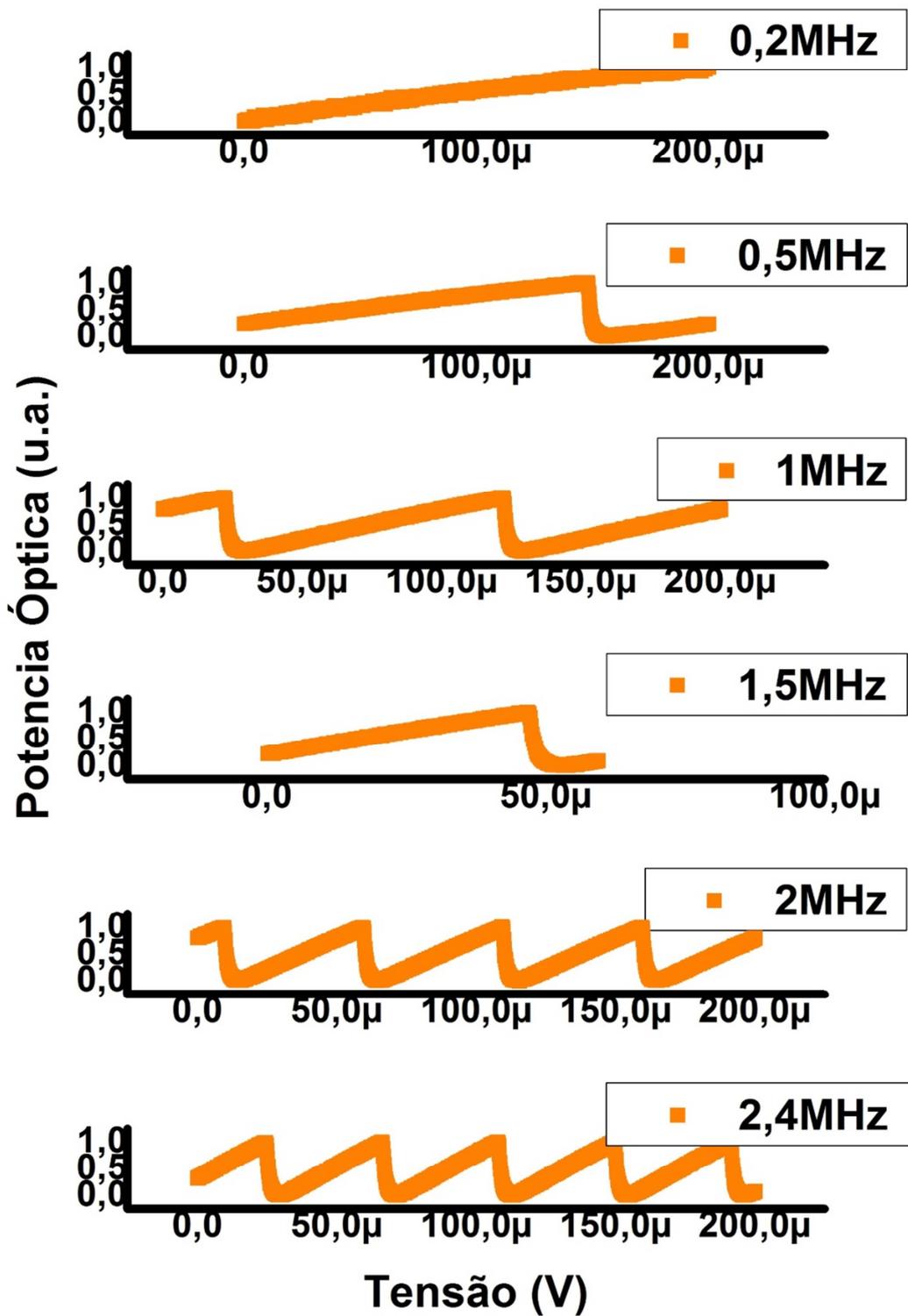


Figura 70: LED ÂMBAR com Mode Scrambler padrão

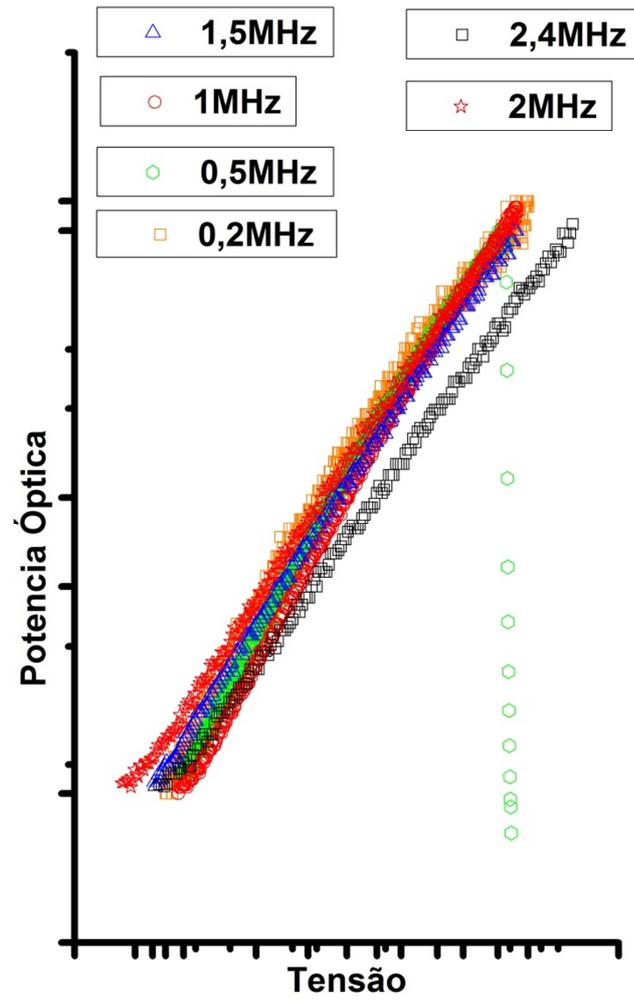


Figura 71: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com Mode Scrambler padrão

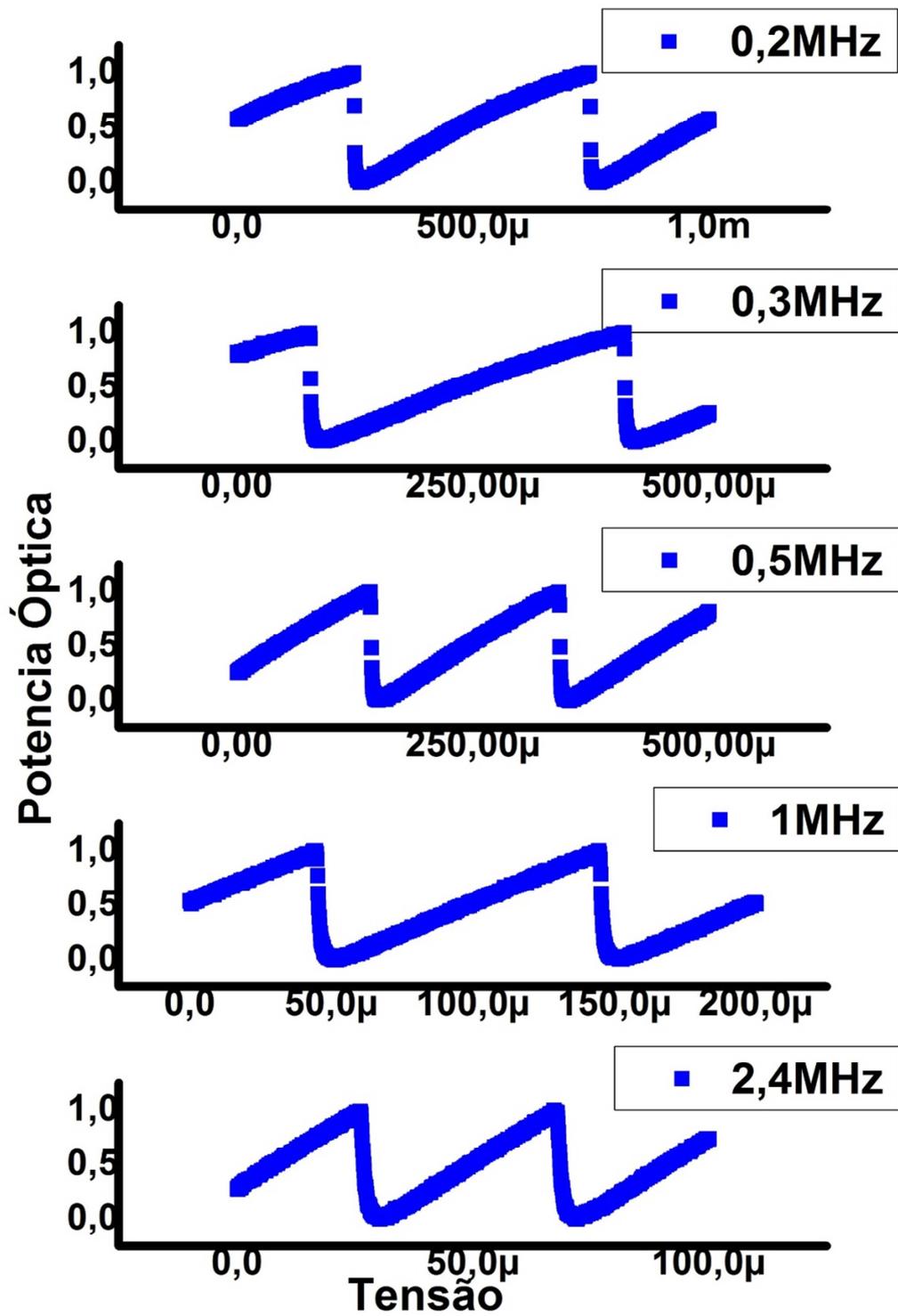


Figura 72: LED AZUL com Mode Scrambler Corrugado no receptor

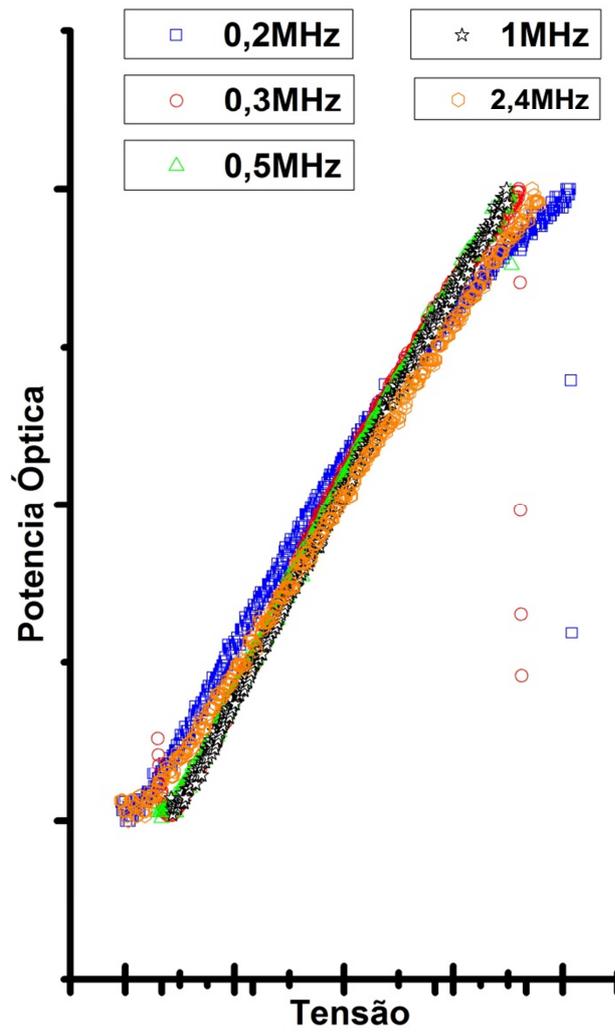


Figura 73: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com Mode Scrambler corrugado no receptor

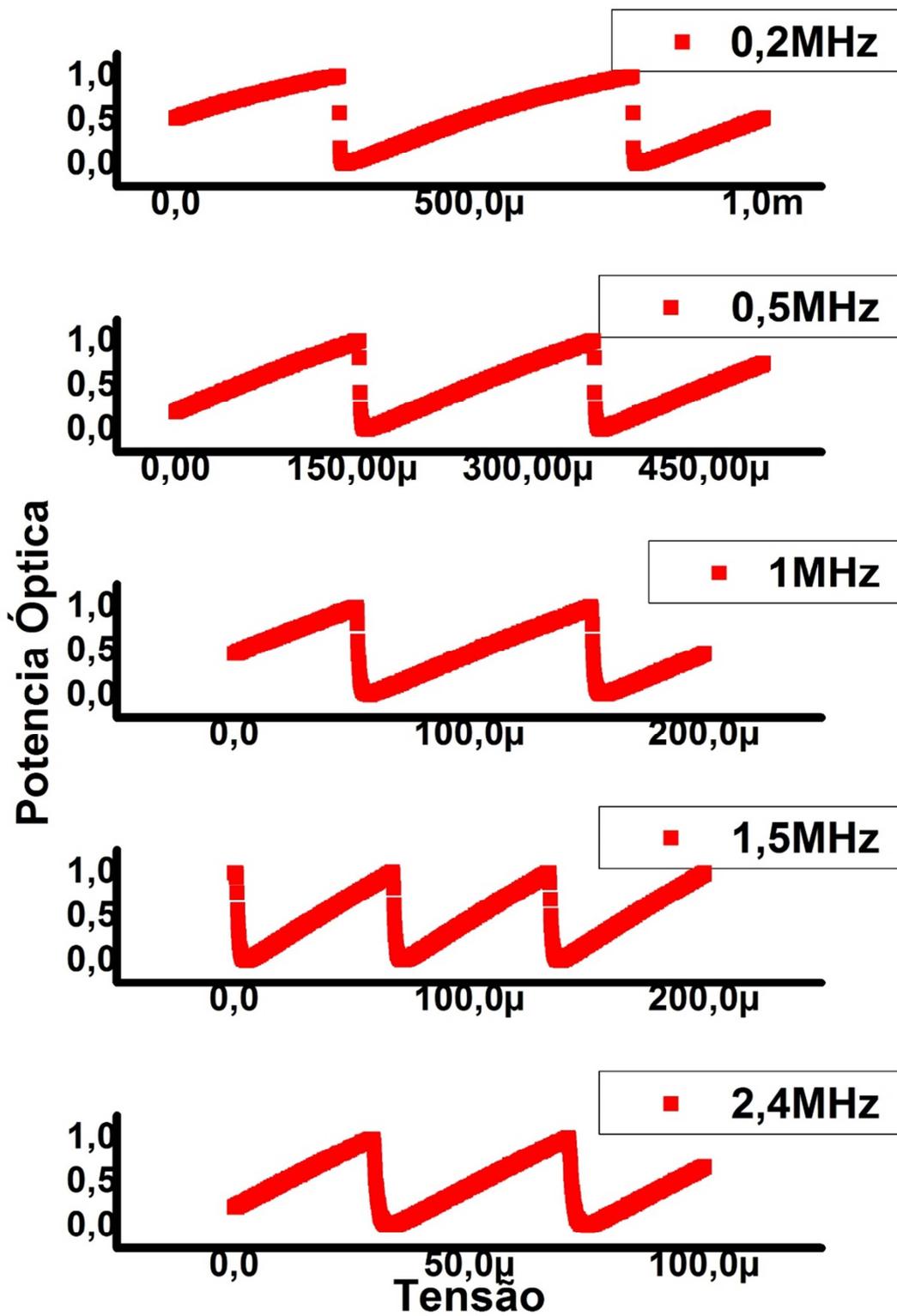


Figura 74: LED VERMELHO com Mode Scrambler Corrugado no receptor

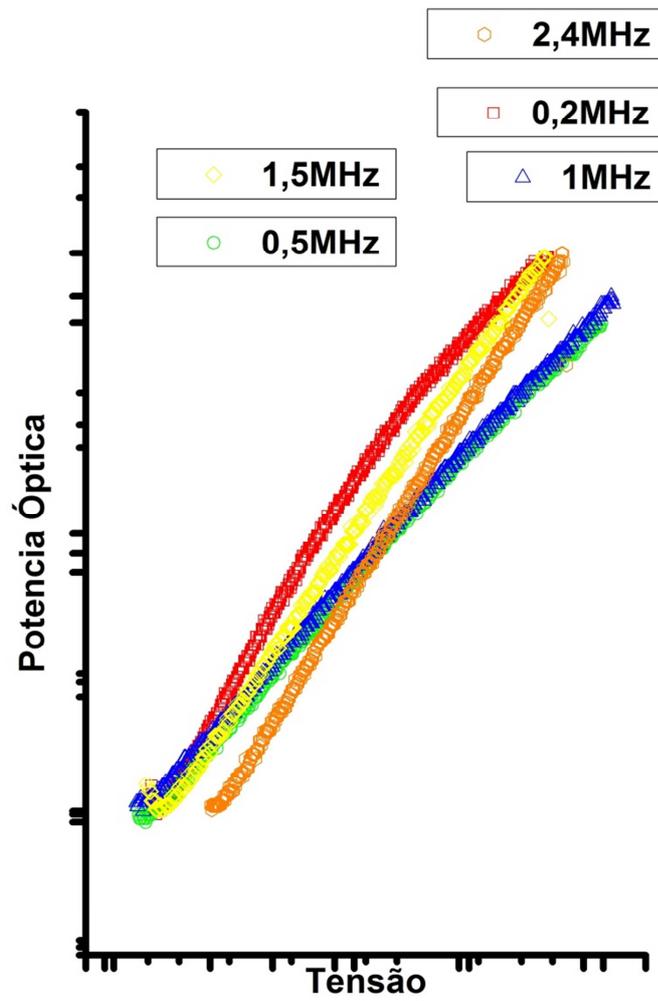


Figura 75: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com Mode Scrambler corrugado no receptor

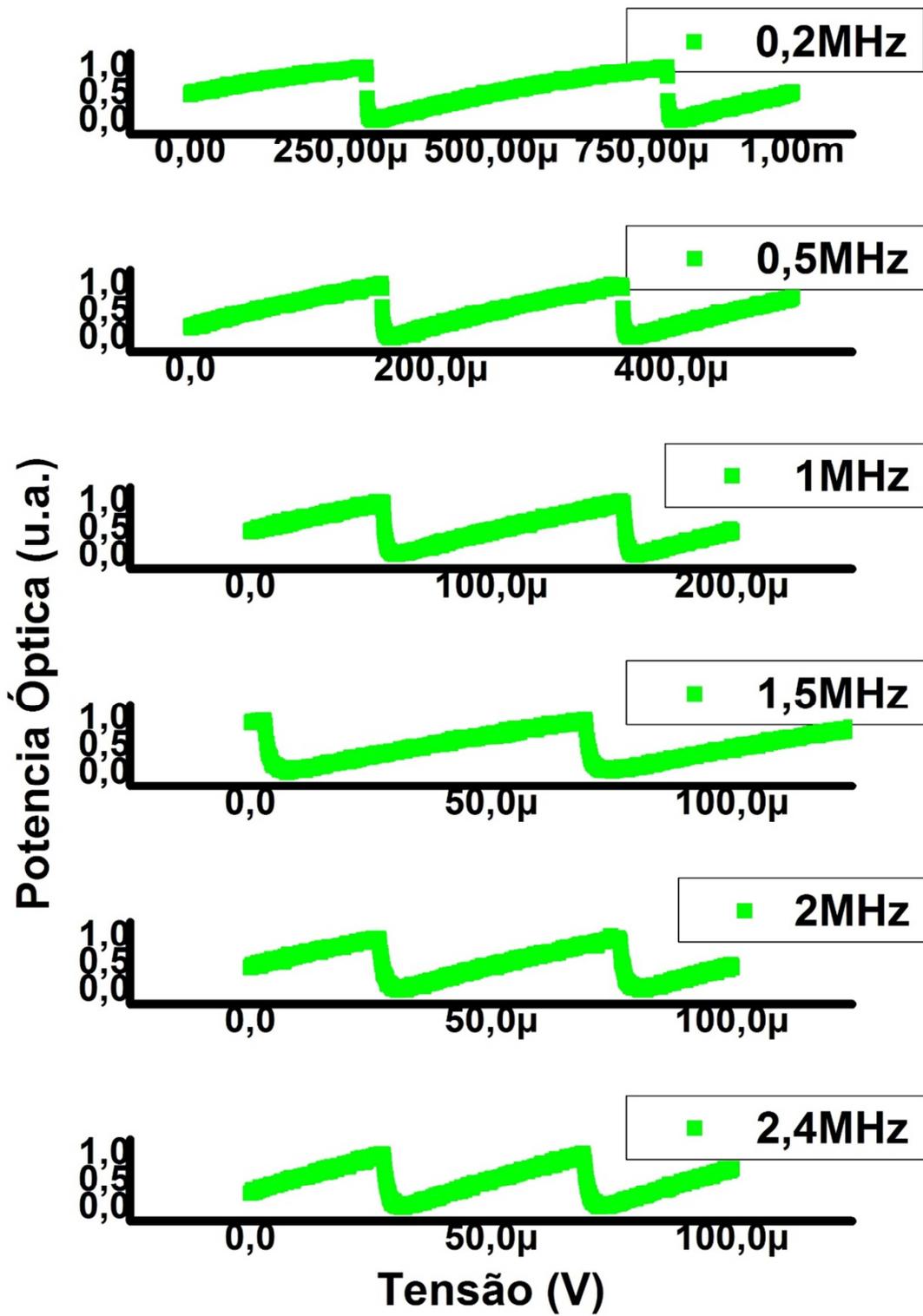


Figura 76: LED VERDE com Mode Scrambler Corrugado no receptor

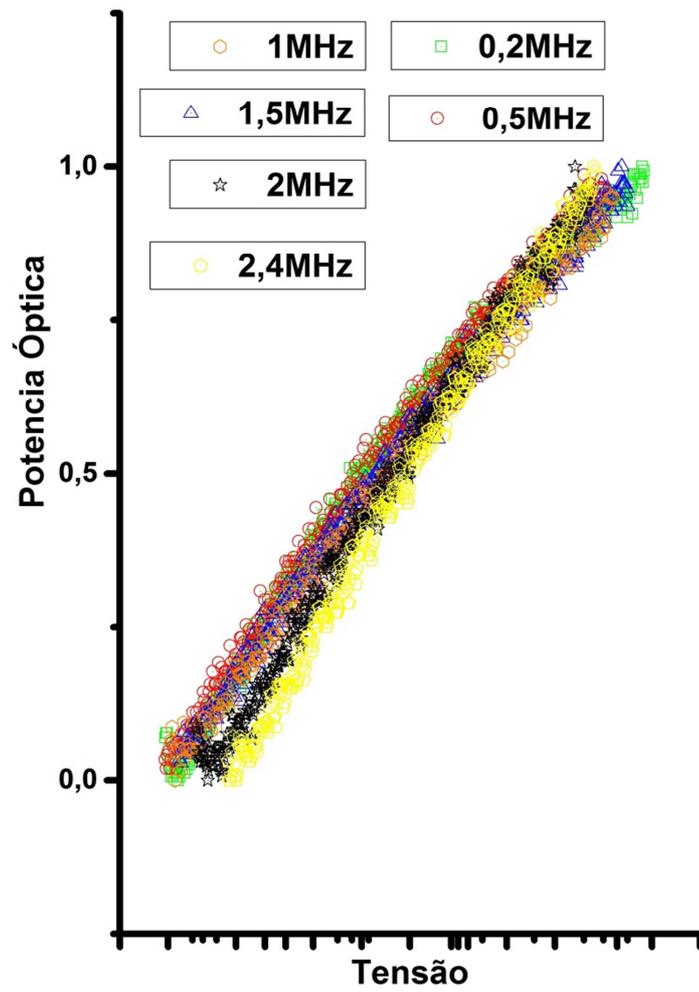


Figura 77: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com Mode Scrambler corrugado no receptor

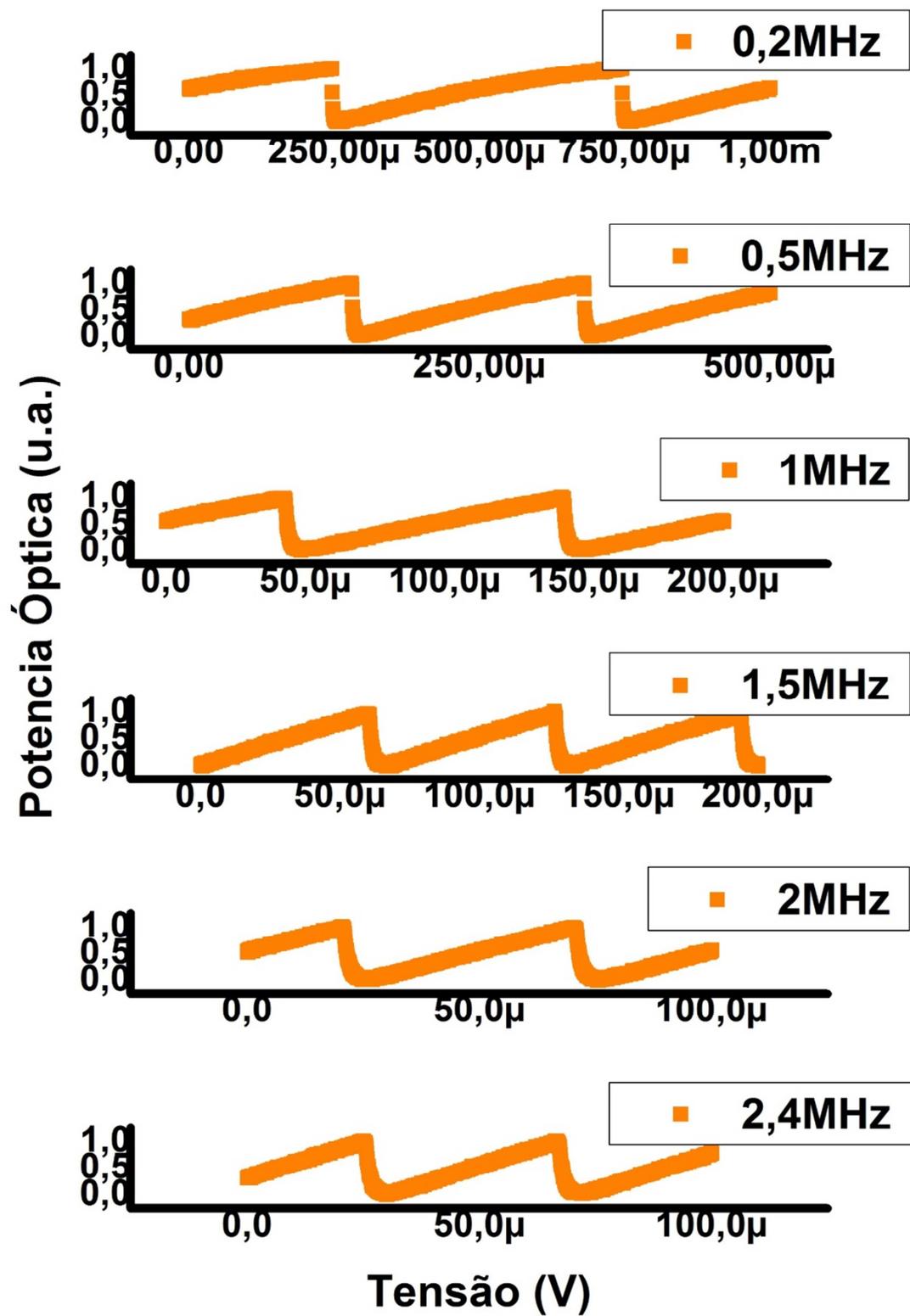


Figura 78: LED ÂMBAR com Mode Scrambler Corrugado no receptor

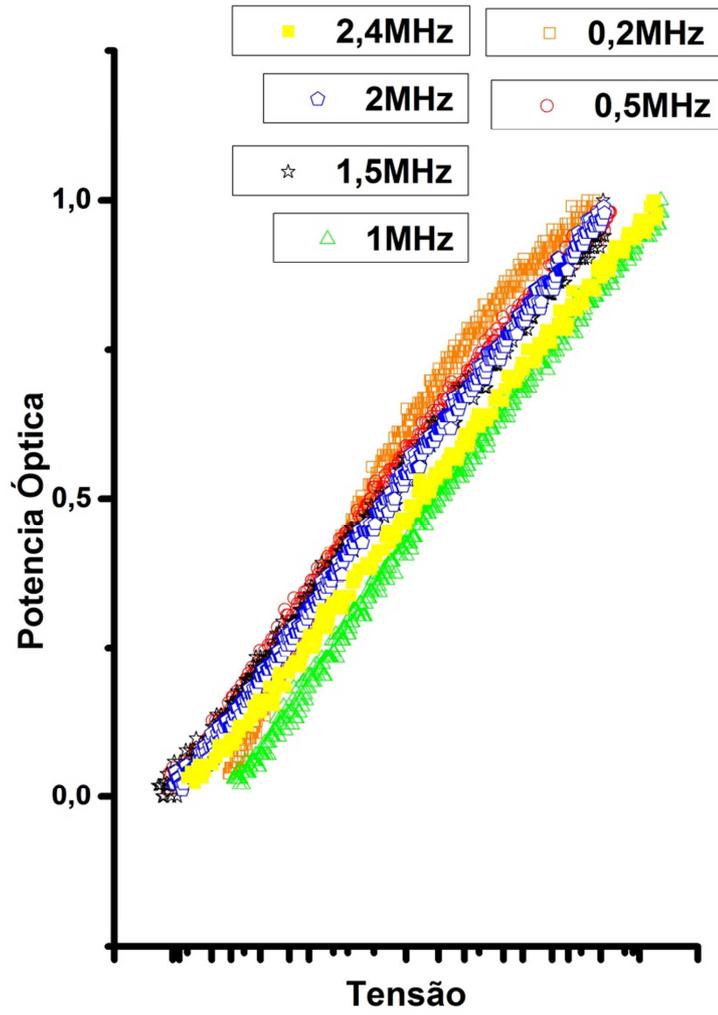


Figura 79: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com Mode Scrambler corrugado no receptor

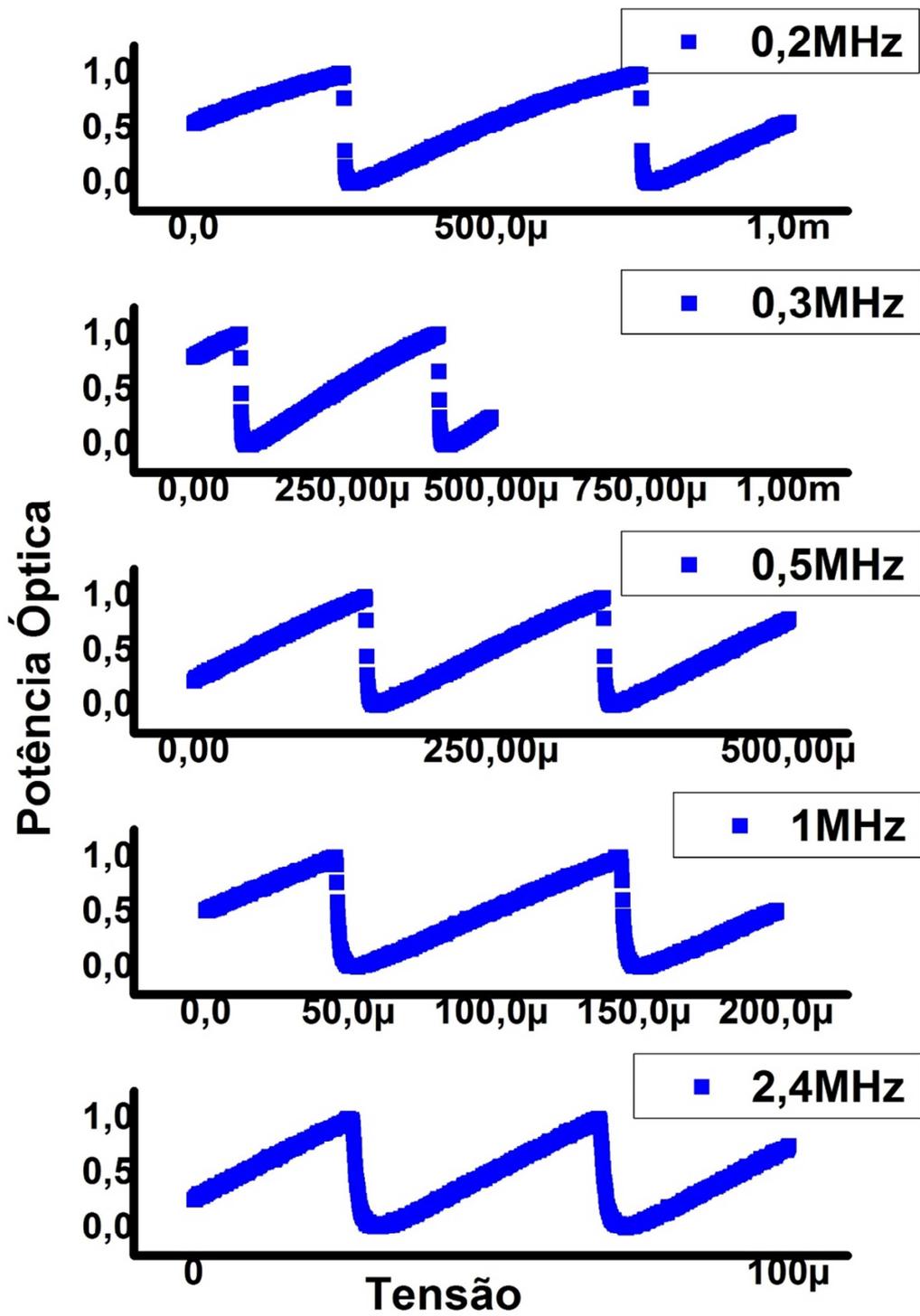


Figura 80: LED AZUL com Mode Scrambler Corrugado no emissor

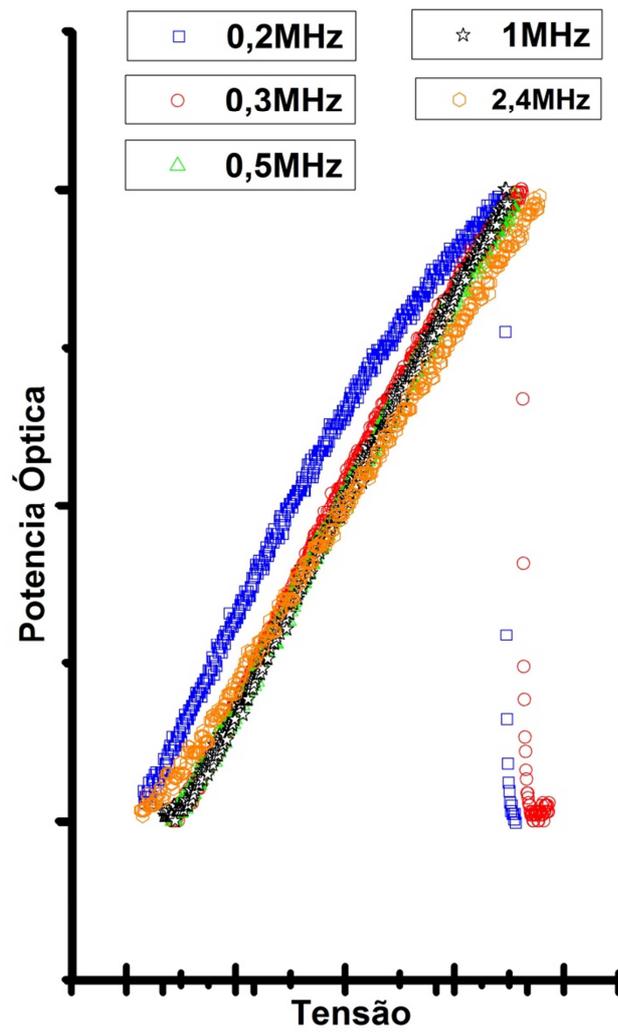


Figura 81: Comparação entre as frequências de modulação do LED azul com Mode Scrambler corrugado no emissor

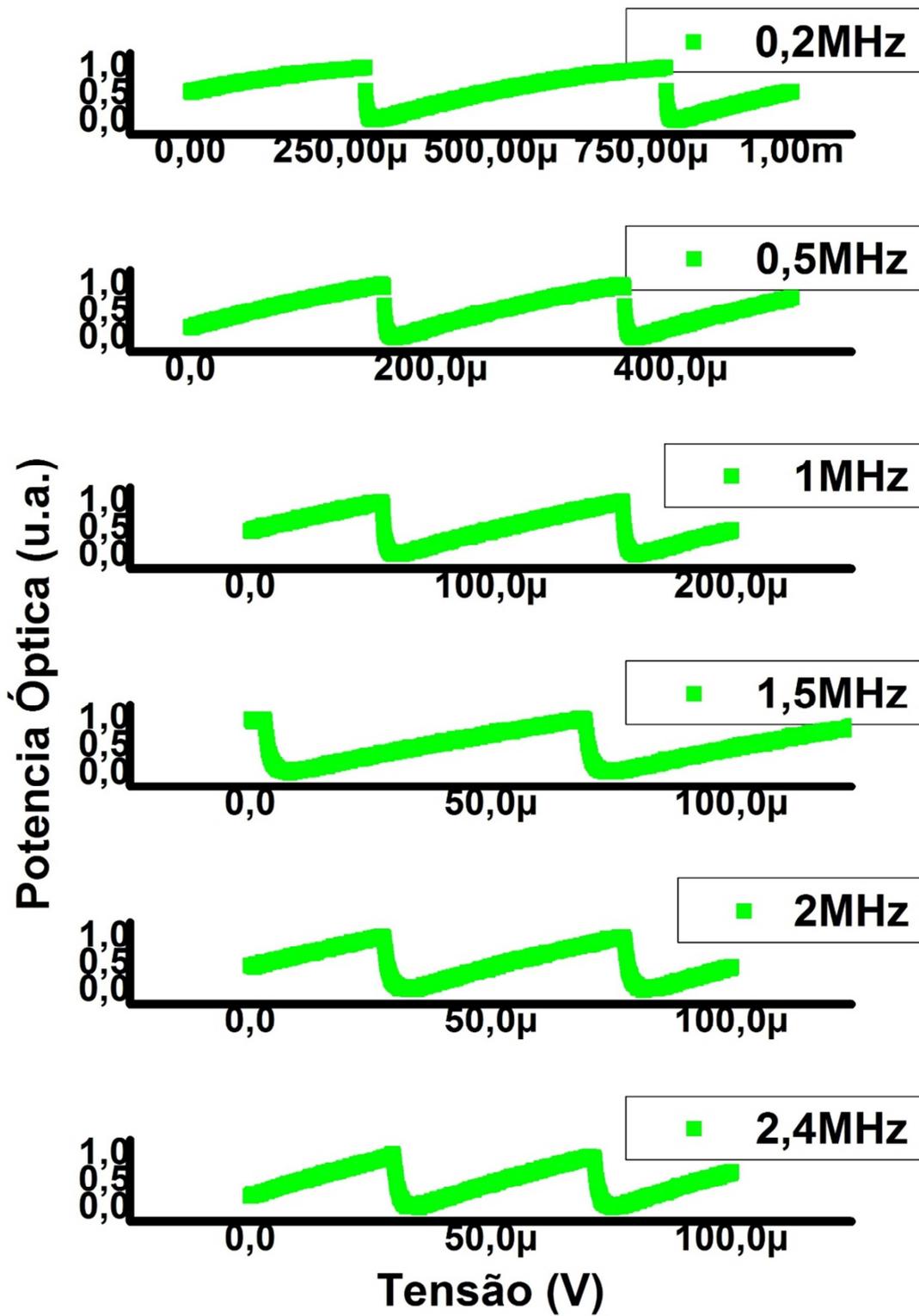


Figura 82: LED VERDE com Mode Scrambler Corrugado no emissor

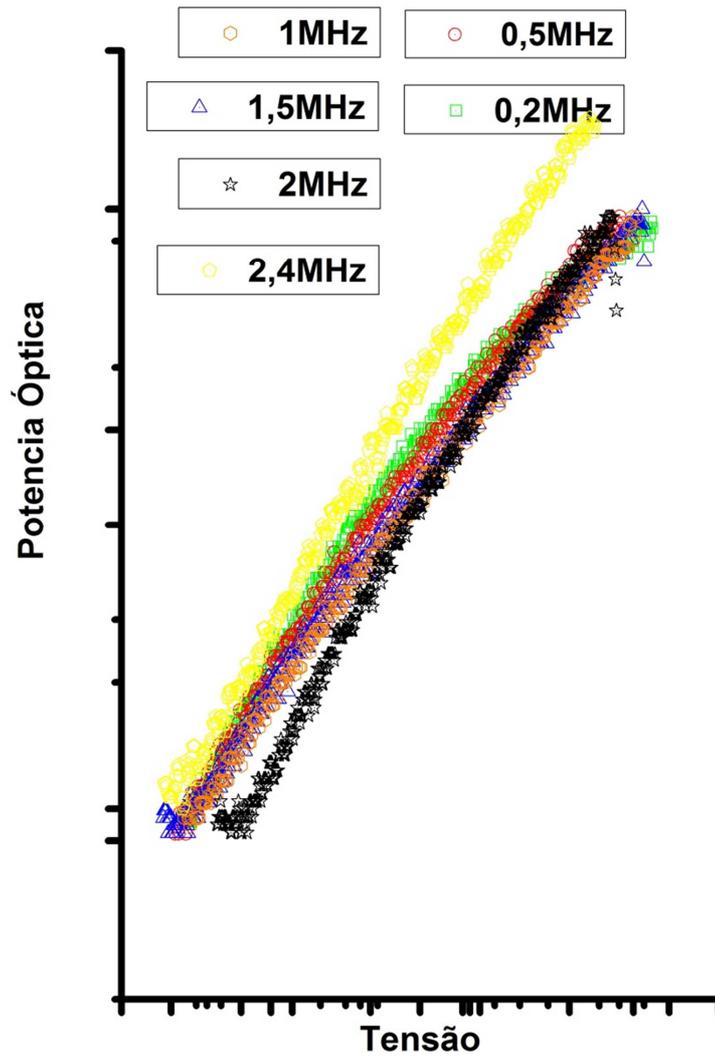


Figura 83: Comparação entre as frequências de modulação do LED verde com Mode Scrambler corrugado no emissor

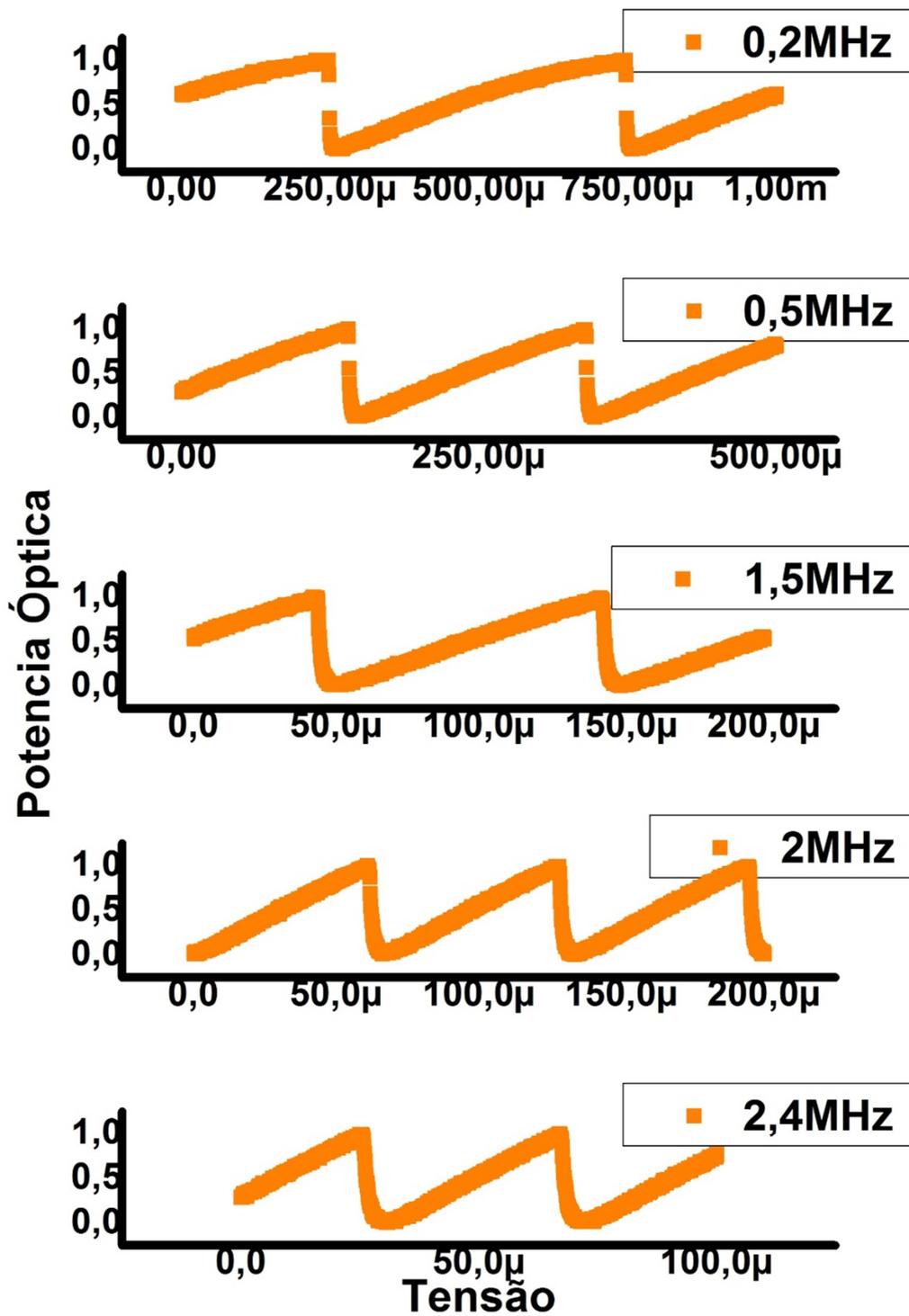


Figura 84: LED ÂMBAR com Mode Scrambler Corrugado no emissor

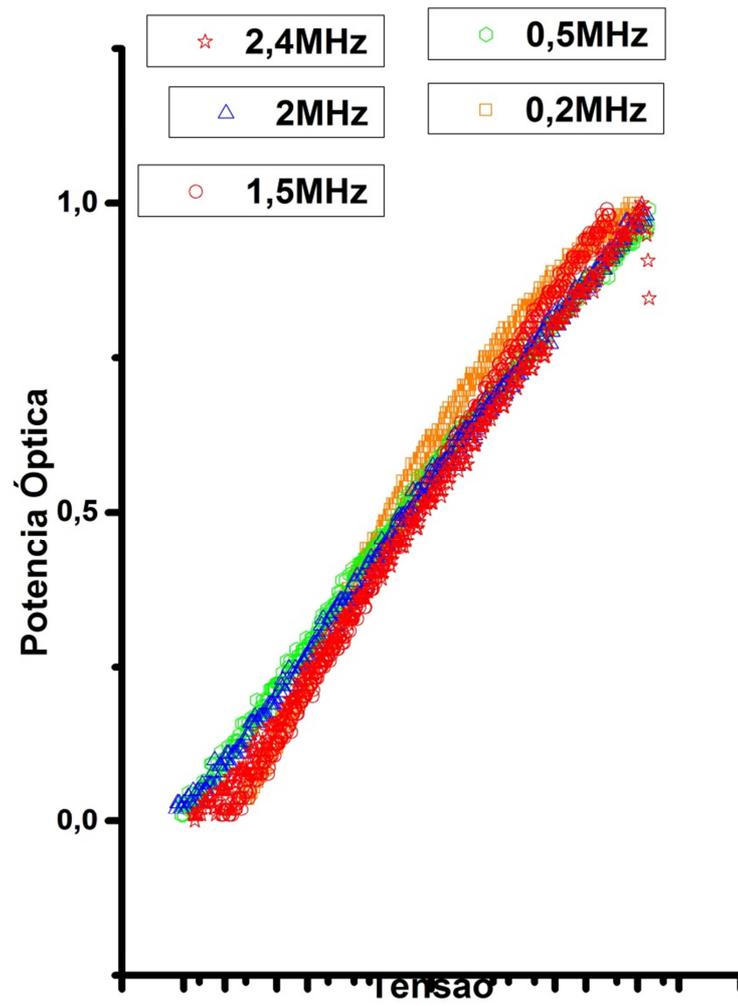


Figura 85: Comparação entre as frequências de modulação do LED âmbar com Mode Scrambler corrugado no emissor

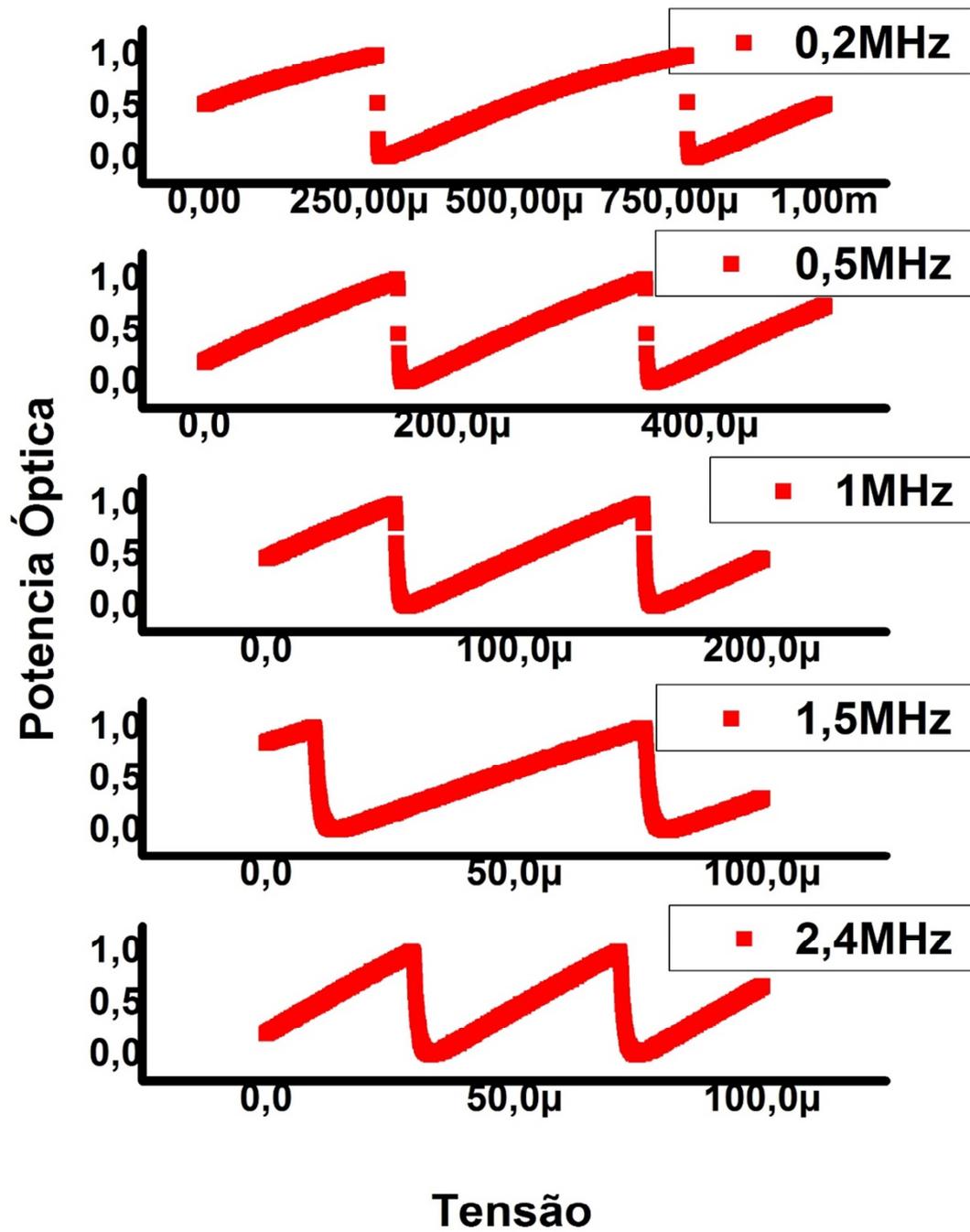


Figura 86: LED VERMELHO com Mode Scrambler Corrugado no emissor

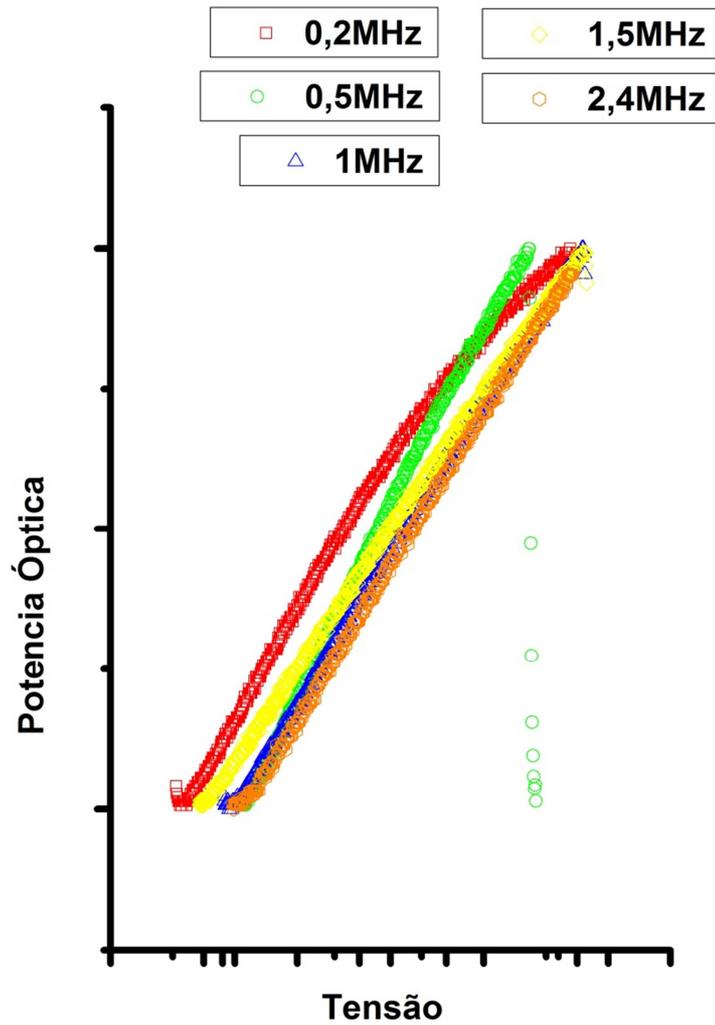


Figura 87: Comparação entre as frequências de modulação do LED vermelho com Mode Scrambler corrugado no emissor

4.3.1 Ajuste de curva de não-linearidade dos LEDs

Como é possível observar, a exemplo do que aconteceu na primeira etapa dos experimentos, na medida em que se modulava o LED com frequências mais altas, a resposta tornava-se cada vez mais linear, o que motivou a analisar matematicamente somente a curva para a modulação de 0,2MHz, onde a distorção é mais significativa.

Para as três curvas apresentadas, decorrentes dos três sets ups de montagem com misturador de modos, equacionaram-se as curva, conforme feito inicialmente. As funções utilizadas para equacionar essas curvas foram as mesmas utilizadas anteriormente, ocorrerá somente a variação dos parâmetros utilizados. Portanto, utilizou-se também a função expressa na Equação 43, para representar essa inclinação.

A Tabela 6 a seguir informa quais foram os parâmetros utilizados para ajustar matematicamente as curva expostas nas figuras anteriormente apresentadas, para frequência de 0,2 MHz.

LED	ÂMBAR			AZUL			VERDE			VERMELHO		
	T ₁ (10 ⁻⁴)	A ₁	X ₀	T ₁ (10 ⁻⁴)	A ₁	X ₀	T ₁ (10 ⁻⁴)	A ₁	X ₀	T ₁ (10 ⁻⁴)	A ₁	X ₀
MD INGLES NO RECEPTOR	4,86	-2,76	1,6	6,47	-3,1	2	4,71	-2,95	1,6	6,22	-3	1,86
MD INGLES NO EMISSOR	4,89	-2,76	1,6	6,58	-3,1	2	4,95	-2,95	1,6	6,19	-3	1,86
MD JAPONES NO EMISSOR	3,16	-2,09	2,09	6,62	-3,1	2	4,71	-2,95	1,6	6,08	-3	1,86

Tabela 6: Parâmetros para ajuste da curva com acoplador de modos

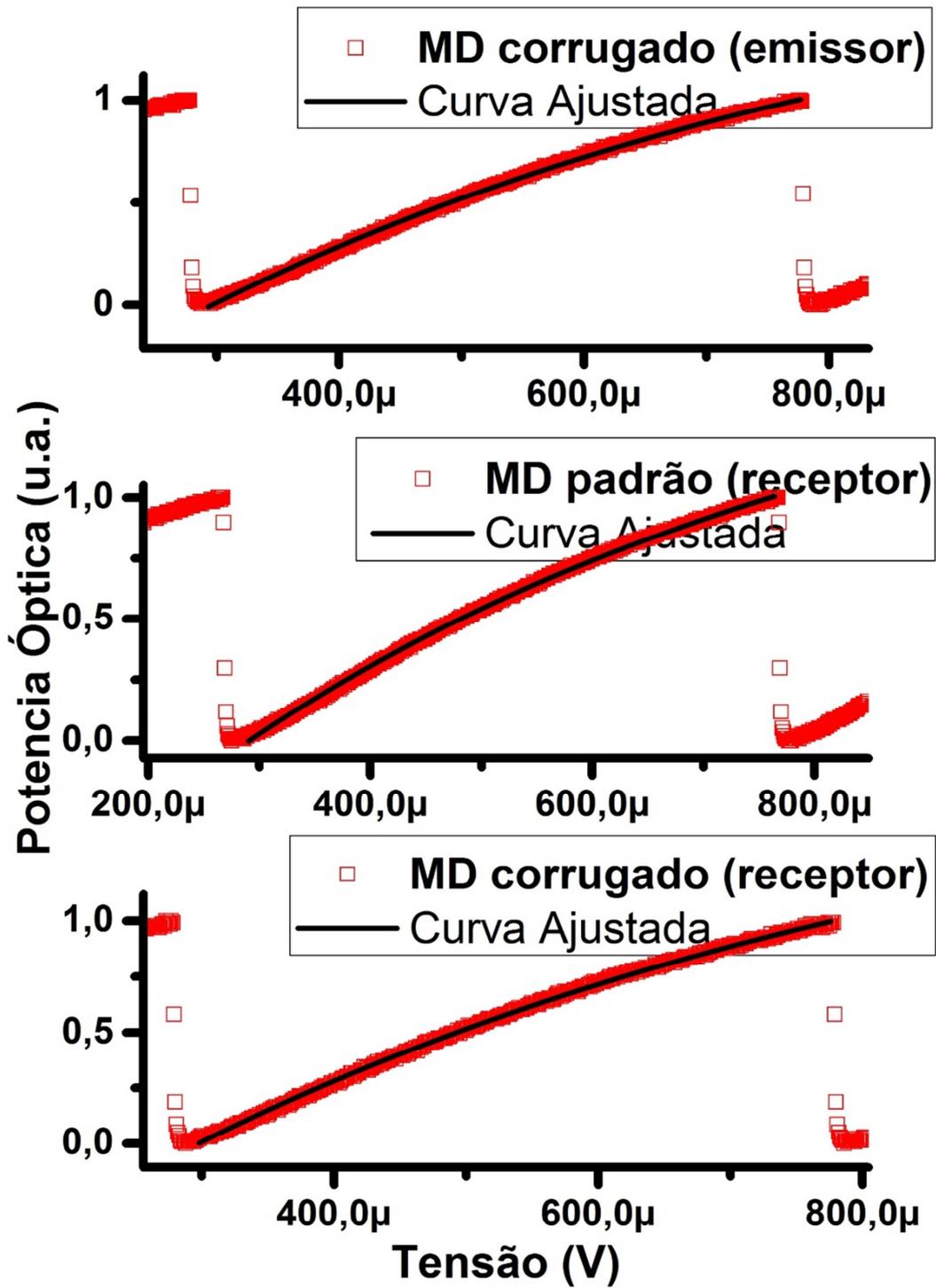


Figura 88: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED VERMELHO, com *mode scrambler*

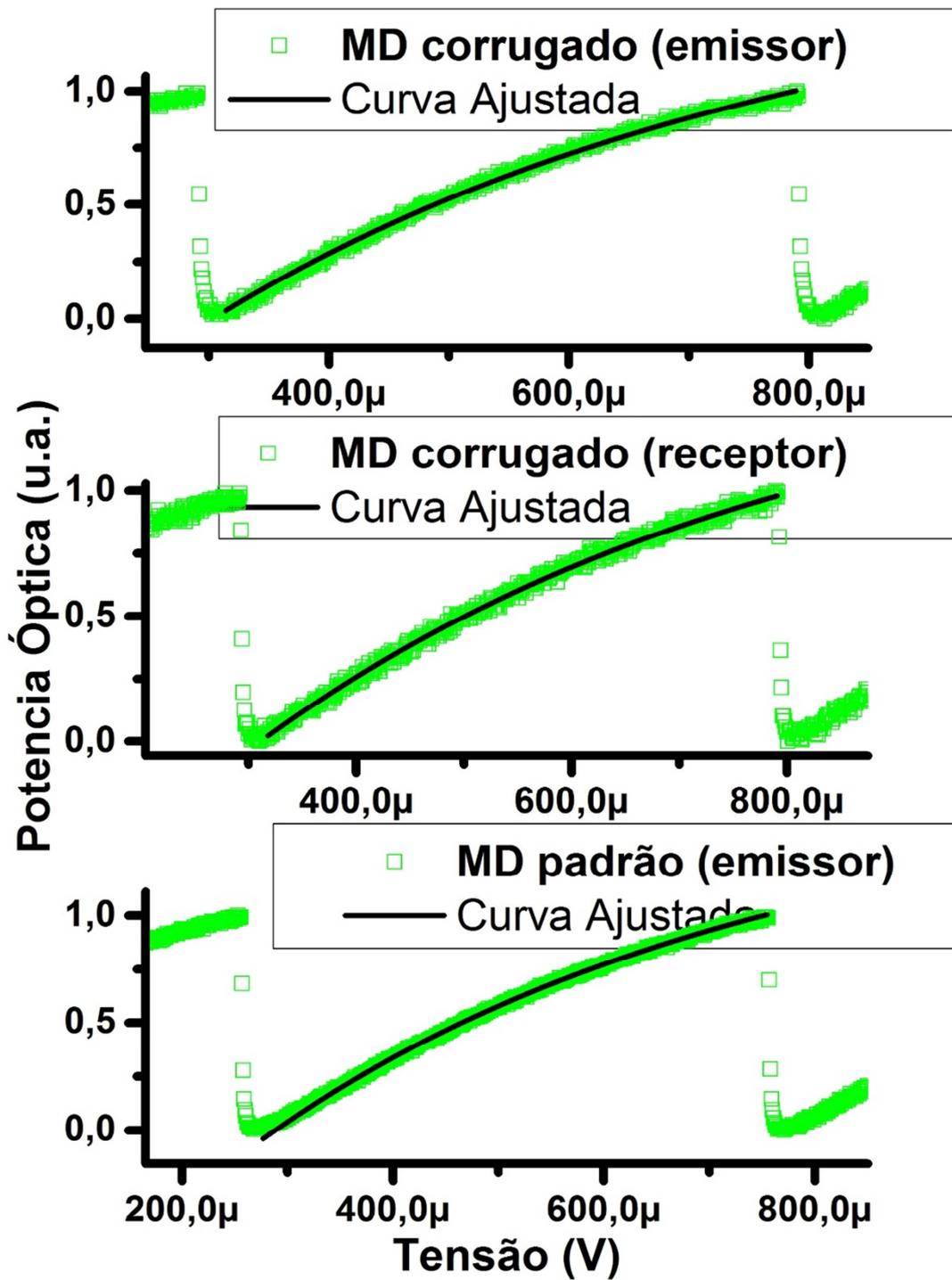


Figura 89: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED VERDE, com *mode scrambler*

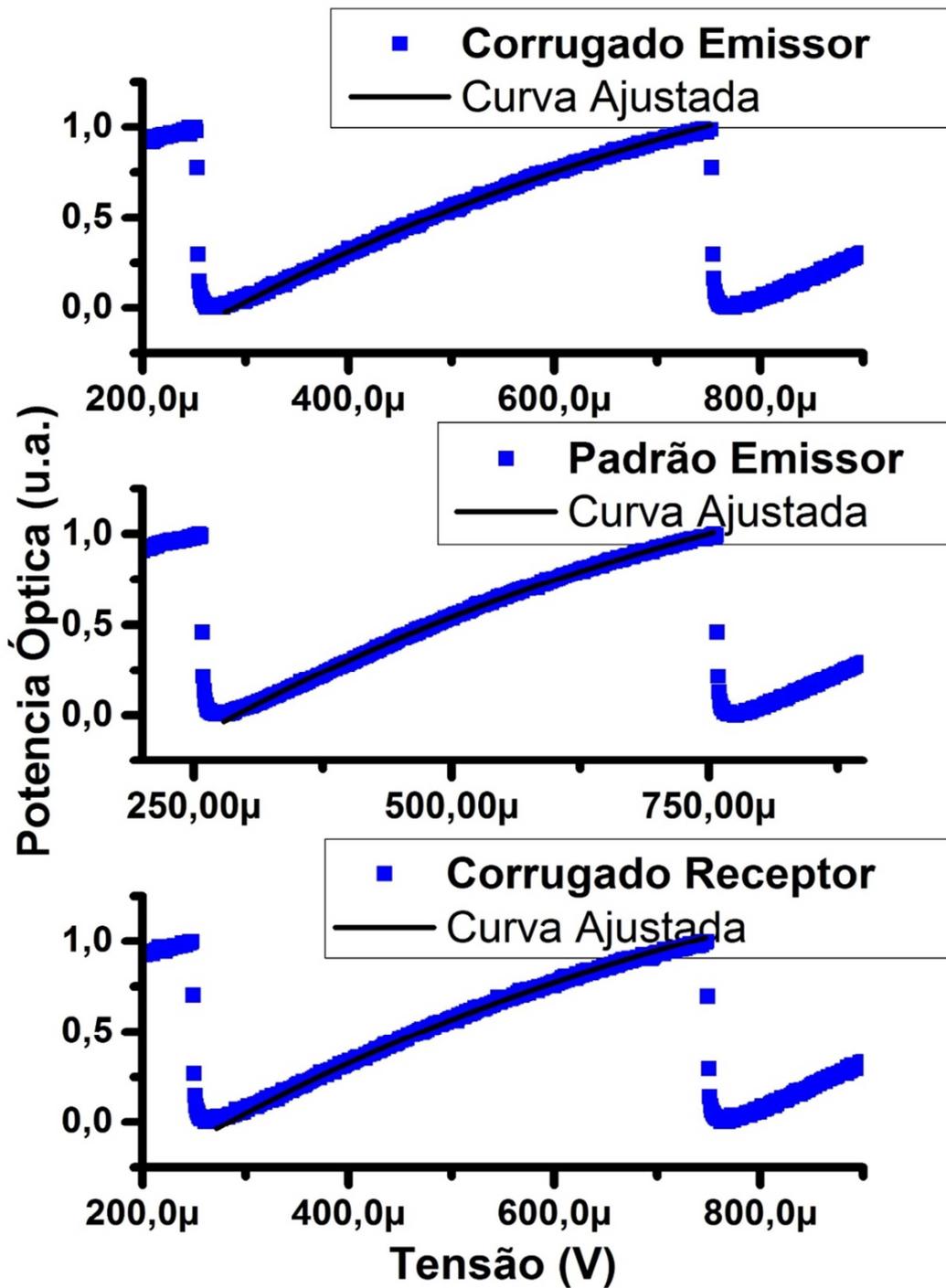


Figura 90: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED AZUL, com *mode scrambler*

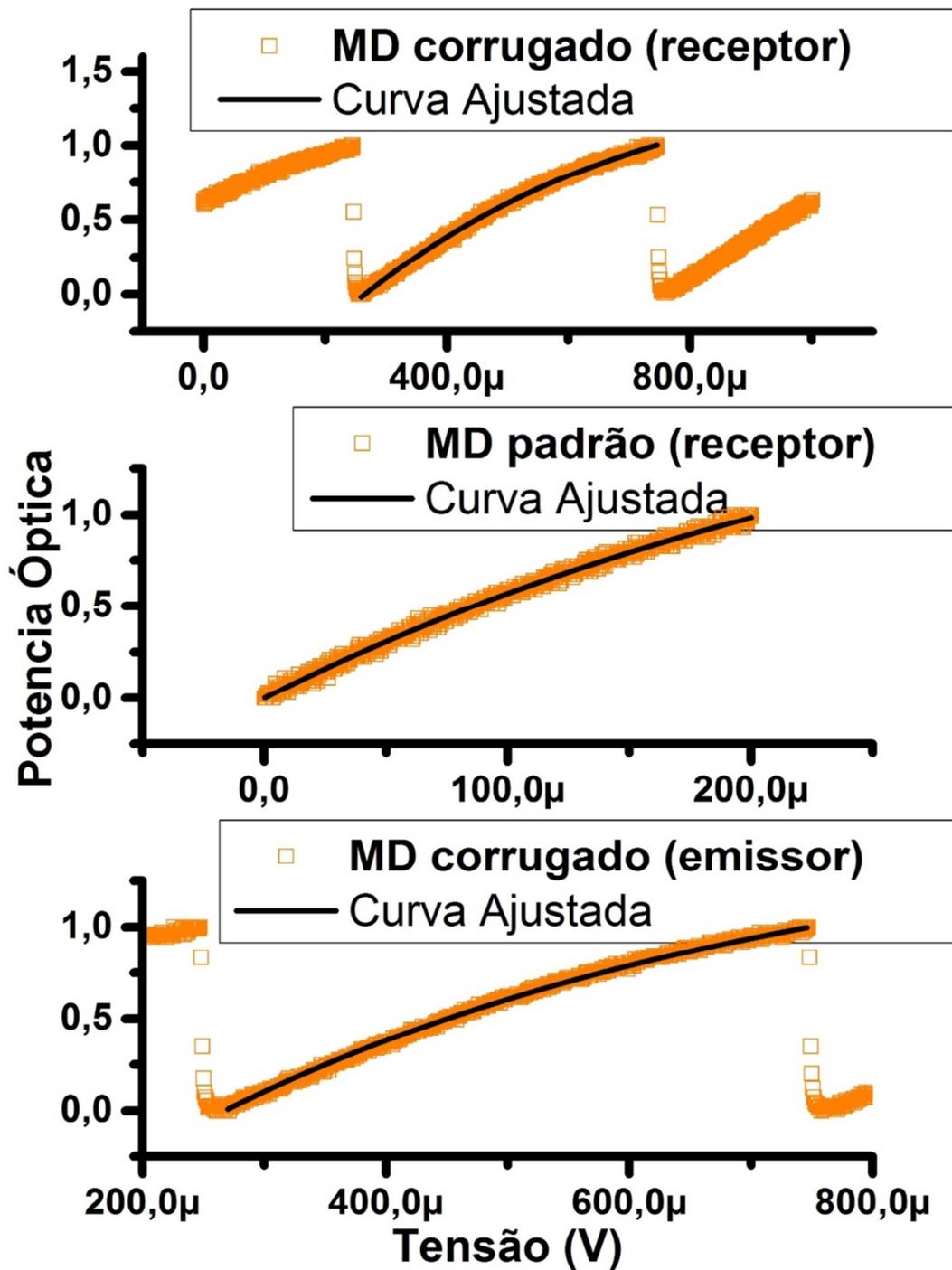


Figura 91: Ajuste da curva na frequência de 0,2MHz do LED LARANJA, com *mode scrambler*

É possível observar que modulando os LEDs, independente do comprimento de onda, com frequências mais elevadas - a partir de 0,2 MHz - o comportamento da curva de resposta óptica se demonstrou linear independente da configuração em que os experimentos estavam dispostos. Especula-se que a partir desta frequência o efeito memória começa a ser significativo.

Por isso a parametrização da curva foi feita somente para os LEDs operando em frequência de 0,2 MHz. Na tabela a seguir é exibida a consolidação de todos os parâmetros, correspondentes as suas respectivas configurações exibidas durante o presente trabalho, que facilita a comparação dos comportamentos dos LEDs.

A tabela 7, a seguir exhibe resultados que podem ser discutidos em trabalhos futuros, bem como em fórum técnicos. A mais significativa é a alteração dos parâmetros da curva de ajuste, quando incluí fibra na montagem para todos os comprimentos de onda, com exceção do LED azul.

No LED em questão não há variação significativa dos parâmetros das equações. O que indica uma manutenção das características do comportamento não linear do LED, mesmo configurando-se um enlace, dotados, ou não, de misturadores de modos.

LED		PARÂMETROS		
		$T_1 (10^{-4})$	A_1	X_0
AMBAR	LED PURO	4,21	1,45	-2,77
	SEM MODE SCRAMBLER (MD)	-108208	25568,35	-25569
	MD INGLES NO RECEPTOR	4,86	-2,76	1,6
	MD INGLES NO EMISSOR	4,89	-2,76	1,6
	MD JAPONES NO EMISSOR	3,16	-2,09	2,09
AZUL	LED PURO	6,69	-3,1	2
	SEM MODE SCRAMBLER (MD)	6,69	-3,1	2
	MD INGLES NO RECEPTOR	6,47	-3,1	2
	MD INGLES NO EMISSOR	6,58	-3,1	2
	MD JAPONES NO EMISSOR	6,62	-3,1	2
VERDE	LED PURO	4,08	-3	1,33
	SEM MODE SCRAMBLER (MD)	4,08	-3	1,33
	MD INGLES NO RECEPTOR	4,71	-2,95	1,6
	MD INGLES NO EMISSOR	4,95	-2,95	1,6
	MD JAPONES NO EMISSOR	4,71	-2,95	1,6
VERMELHO	LED PURO	6,615	-6,75	2
	SEM MODE SCRAMBLER (MD)	6,616	-6,75	2
	MD INGLES NO RECEPTOR	6,22	-3	1,86
	MD INGLES NO EMISSOR	6,19	-3	1,86
	MD JAPONES NO EMISSOR	6,08	-3	1,86

Tabela 7: Comparação dos valores dos parâmetros

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

Conforme exposto, durante todo o trabalho, o objetivo do experimento foi caracterizar e analisar as distorções ocorridas, quando modulado um LED visível.

Sendo a modulação de onda dente de serra, como é sabido, este formato é gerado a partir de um somatório de senóides, com decaimento da amplitude. Mesmo utilizando-se uma frequência baixa de repetição (quando comparado à banda-passante do sistema), para chegar ao formato dente de serra, múltiplos dessa frequência formam o somatório. Portanto, se necessário for, extrapolar até um valor de 50 modos, por exemplo, o LED será modulado com a referida frequência de repetição, além de seus 50 harmônicos, mesmo que sua amplitude seja dividida pelo mesmo fator.

O que ocorreu para as frequências mais altas, além de 0,2MHz, foi que os seus harmônicos tinham uma contribuição muito significativa na modulação do LED, o que contribuiu fortemente para o efeito de memória. Ou seja, a partir de frequências mais altas, os primeiros fatores do somatório, que ainda têm suas contribuições significativamente alta, comparada às amplitudes originais na modulação do LED. O que não modula o LED, somente o alimenta, suficientemente para emitir na tensão de bias aplicada. Ou seja, o tempo de resposta de

recombinação de seus fótons é tão maior, que ele o LED não acompanha o estímulo a ele aplicado.

Portanto, a melhor contribuição deste trabalho foi de analisar as modulações com frequências mais baixas, visto que para as frequências de 0,2MHz o quinquagésimo fator do somatório de senóides, não utilizaria a modulação de uma frequência acima da banda-passante, caracterizada anteriormente. Fato que guia ao entendimento de que não há efeito de memória para esses casos.

Como conclusão das análises destas distorções, foi possível equacionar as curvas de respostas dos sistemas estudados, e, comparativamente, utilizando a reta de derivada contínua, que mais se aproximava a elas, mensurar a não-linearidade do sistema.

Realizando a operação de divisão da função de saída do sistema, pela função de entrada, a qual modula o emissor, é possível ter uma leitura da função de transferência do sistema. E, caso haja interesse, analisar as contribuições dos ruídos de intermodulação e distorções harmônicas, para a não-linearidade dessa transferência.

Para os *setups* onde contemplam os misturadores de modo, é possível analisar que alterando a banda passante do enlace e acoplando os modos, tanto na entrada quanto na saída, das fibras ópticas não há uma alteração significativa quanto a constante de decaimento, ou seja, a exceção do LED laranja, os decaimentos se mantiveram na mesma ordem.

Este LED apresentou um grau elevado de linearidade, portanto quando realizado o enlace com os misturadores, foi detectada a não-linearidade no sistema.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

A sugestão de trabalhos futuros é para que a partir da função inversa daquela exibida anteriormente, se desenvolva matematicamente um modelo capaz de basear o desenvolvimento de pré-amplificadores capazes de compensar a distorção apresentada. A partir daí, utilizando dispositivos opto eletrônicos montar sistemas cada vez mais lineares e robustos para a comunicação digital de dados.

Bem como estudar a relação entre a banda passante de um enlace óptico, em função do comprimento da fibra, com a não-linearidade desse enlace, a fim de modelar o sistema observando a dependência da não-linearidade. E obter um maior entendimento da função de transferência de enlaces desse formato.

Os experimentos aqui mostrados estão restritos a aplicação de sinais de voltagens para modular LEDs em combinação com a aplicação de uma voltagem V_{bias} ou corrente I_{bias} de operação (bias). Pode-se também utilizar um circuito eletrônico de driver de corrente entre a fonte original e o LED, de forma que uma extensão natural deste trabalho é refazê-lo para contemplar as curvas potência X corrente ($P \times I$) estáticas e dinâmicas.

Bibliografia

- [1] S. S. Oliveira Jr., R. M. Ribeiro, V. P. R. Magri, V. N. H. Silva e L. A. Neto, "Investigação de Não-linearidades Optoeletrônicas em LEDs Visíveis Visando Aplicações em Enlaces Ópticos de Curta Distância," *MOMAG*, 28-31 08 2014.
- [2] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, New York, USA: John Wiley & Sons, 2002.
- [3] L. Anet Neto, R. M. Ribeiro, A. P. L. Barbero, J. A. L. Silva e M. Segatto, "Optical Orthogonal frequency division multiplexing through 20m and 100m step-index polymer optical fiber using red, green and blue light emitting diodes," *MOMAG*, 31 Agosto 2010.
- [4] J. Krauser, O. Ziemann, P. E. Zamzow e W. Daum, *POF Handbook*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2008.
- [5] G. Walter, C. H. Wu, H. W. Then, M. Fengand e N. Holonyak Jr., "Tilted-Charge high speed (7GHz) light emitting diode," *Appl. Phys. Lett*, vol. 94, pp. 231125-231127, 2009.
- [6] R. M. Ribeiro, A. P. L. Barbero, O. S. Xavier, J. A. M. Souza e M. M. Mosso, "Optimisation of a device for pick-up of low-frequency radio signals and transmission over polymer optical fibres," *Ann. of Telecommun.*, vol. 68, n. 1-2, pp. 81-93, 2013.
- [7] Emcore, Março 2003. [Online]. Available: www.scribd.com/.../Microwave-Design-Guide.
- [8] Siemens, "www.siemens.com," 13 Janeiro 2010. [Online]. Available: <http://www.siemens.com/press/en/presspicture/?press=/en/presspicture/innovationnews/2010/in20100103-02.htm>.
- [9] R. M. Hagem, D. V. Thiel, S. G. O' Keefe e T. Fickenscher, "Optical wireless communication for real time swimmers feedback," *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2012.
- [10] D. Anguita, D. Brizzolara e G. Parodi, "Building an Underwater Wireless Sensor Network Based on Optical: Communication: Research Challenges and Current Results," *Sensor Technologies and Applications. SENSORCOMM '09*, pp. 476-479, 18-23 Junho 2009.

- [11] T. Kamalakis, J. Walewski, G. Ntogari e G. Mileounis, "Empirical Volterra-series modeling of commercial light-emitting diodes," *J. of Light Techn.*, vol. 29, n. 14, pp. 2146-2155, 2011.
- [12] S. Camatel, A. Nespola, D. C adrenas, S. Abrate e R. Gaudino, "LED non-linearity characterization and compensation," *Intern Conf. on Plastic Opt. Fibers*, 12 10 2007.
- [13] Diemount, "DieMount GmbH Wernigerode - Herzlich Willkommen," Diemount, [Online]. Available: www.diemount.com.
- [14] J. C. Palais, *Fiber Optic Communications*, Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [15] E. D, A. A, B. M, S. D e E. J, "Power and efficiency limits in single-mirror light-emitting diodes with enhanced intensity," *Electronics Lett.*, vol. 21, n. 69, p. 28, 1992.
- [16] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes*, Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [17] Toyoda Gosei Corporation, *LED product catalogue*, Inazawa, 2000.
- [18] C. H. C. III, *Analog Optical Links Theory and Praticce*, Cambridge University Press, 2004.
- [19] J. Mateo, M. A. Losada, J. J. Martinez-Muro, I. Garc es e J. Zubia, "Bandwith measurement in POF based on general purpose equipment," em *14th International Conference on Plastic Optic Fibers and Application*, Hong Kong, 2005.
- [20] J. A. M. Souza, R. M. Ribeiro, A. P. L. Barbero e O. S. Xavier, *Sonda Optoeletr onica para 60-80 MHz com LED Ultra-Brilhante Verde e Enlace de Fibra  ptica Pl stica de PMMA*, Niter oi, RJ, 2009.