

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Cláudio Márcio de Freitas da Silva

ANÁLISE DO ACOPLAMENTO MODAL EM FIBRAS ÓPTICAS MULTIMODO  
PELA EQUAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Niterói  
2011

Cláudio Márcio de Freitas da Silva

ANÁLISE DO ACOPLAMENTO MODAL EM FIBRAS ÓPTICAS MULTIMODO  
PELA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

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

Orientador: Prof. Dr. ANDRÉS PABLO LÓPEZ BARBERO

Niterói

2011

CLÁUDIO MÁRCIO DE FREITAS DA SILVA

ANÁLISE DO ACOPLAMENTO MODAL EM FIBRAS ÓPTICAS MULTIMODO  
PELA SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

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

Aprovada em 29 de agosto de 2011.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. ANDRÉS PABLO LÓPEZ BARBERO, D.Sc. - Orientador  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. RICARDO MARQUES RIBEIRO, D.Sc.  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. JOSÉ CAMPOS BRANT, D.Sc.  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

---

Prof. ODAIR DA SILVA XAVIER, M.Sc.  
Universidade Estácio de Sá

Niterói

2011

Dedico a minha amada esposa, por sua dedicação,  
compreensão e companheirismo.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que em sua infinita bondade permitiu-me vencer mais essa etapa em minha vida.

Ao meu orientador Andrés Pablo López Barbero que com sua sabedoria e sinceridade conduziu-me ao êxito na realização desse trabalho.

Ao Professor Ricardo Marques Ribeiro que me incentivou a estudar o assunto.

Aos pesquisadores do LACOP (Laboratório de Comunicações Ópticas da UFF), que deram todo o apoio necessário, em especial Ao Odair que não mediu esforços para colaborar quando solicitado.

Ao Professor Brant, que apoiou o trabalho com seus comentários e observações importantes.

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	Motivação e importância do tema.....	14
1.2	Resumo de estudos anteriores.....	14
1.3	Organização da dissertação.....	16
2	<b>CONCEITOS BÁSICOS</b> .....	18
2.1	Enlace ponto a ponto.....	18
2.2	Redes ópticas de distribuição.....	21
2.3	Fibras monomodo e fibras multimodo.....	23
2.4	Redes ópticas locais e fibras multimodo.....	24
2.5	Perfil do índice de refração das fibras.....	25
2.6	Os modos em fibras ópticas.....	28
2.7	Conceito de frequência normalizada.....	29
2.8	Quantidade de modos de propagação em fibras multimodo.....	30
2.9	Óptica geométrica.....	30
2.10	Atenuação em fibras ópticas multimodo.....	33
2.11	Dispersão óptica.....	34
2.11.1	Dispersão modal.....	36
2.11.2	Dispersão intermodal.....	37
2.11.3	Dispersão material.....	37
2.11.4	Dispersão de guia de onda.....	38
2.12	Fontes de luz.....	38
2.13	Materiais das fibras.....	39
2.13.1	Fibras plásticas.....	39
2.13.2	Fibras de sílica.....	41

3	<b>ACOPLAMENTO MODAL EM FIBRAS ÓPTICAS</b> .....	42
3.1	Modos em fibras índice degrau.....	43
3.2	Fluxo de potência em fibras índice degrau.....	44
3.3	Modelagem do acoplamento modal pela equação do fluxo de potência...	46
3.4	Transição para um modelo modal contínuo.....	46
3.5	Equação do fluxo de potência de Gloge.....	50
3.5.1	O Método das diferenças finitas explícitas.....	50
4.	<b>RESULTADOS</b> .....	53
4.1	Simulações numéricas.....	53
4.2	Análise da obtenção do EMD.....	54
5.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	63
5.1	Acoplamento modal em fibras multimodo.....	64
5.2	Manipulação dos parâmetros de lançamento da luz.....	64
5.3	Proposta para continuidade e desenvolvimento do tema.....	64
	<b>ANEXOS</b> .....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Enlace óptico .....	18
Figura 2	Enlace óptico (simbologia).....	19
Figura 3	Enlace ponto a ponto.....	20
Figura 4	Rede óptica em Topologia BUS.....	21
Figura 5	Rede óptica BUS convencional.....	21
Figura 6	Enlace óptico topologia em Estrela.....	22
Figura 7	Enlace óptico topologia em anel.....	22
Figura 8	Rede óptica mista.....	25
Figura 9	Fibra índice degrau.....	25
Figura 10	Fibra multimodo índice gradual.....	26
Figura 11	Perfil refrativo da fibra óptica.....	27
Figura 12	Perfil de índice de refração multimodo de fibras comerciais.....	28
Figura 13	Interface entre meios com diferentes índices de refração.....	31
Figura 14	Acoplamento da luz na entrada da fibra .....	31
Figura 15	Cone de aceitação.....	33
Figura 16	Interferência intersimbólica .....	35
Figura 17	Fibra multimodo índice degrau.....	36
Figura 18	Dispersão cromática.....	37
Figura 19	Fontes de luz.....	38
Figura 20	Estrutura do PMMA.....	40
Figura 21	Distribuição angular de potência para diferentes ângulos de injeção.....	43

Figura 22	Malha bidimensional.....	50
Figura 23	Sinal de entrada da fibra.....	56
Figura 24	Distribuição angular de potência no ângulo 0° em 1 m,5 m,10 m,30 m. e 50m.....	57
Figura 25	Distribuição angular de potência em 18 m de POF com, ângulos de injeção em 0°, 10°, 15° e 18° .....	57
Figura 26	Modescrambler.....	58
Figura 27	Distribuição angular de potência em 20, 25,30 e 40 m em uma fibra plástica com ângulo de injeção de 0°.....	59
Figura 28	Distribuição angular de potência em 20, 25,30 e 40 m em uma fibra plástica com ângulo de injeção do feixe óptico inicial de 15° .....	60
Figura 29	Distribuição angular de potência em 0°, 4°, 5° e 8° em uma fibra de sílica a 500 m de comprimento.....	61
Figura 30	Distribuição angular de potência em 0°, 4°, 5° e 8° em uma fibra de sílica a 2000 m de comprimento.....	61
Figura 31	Distribuição angular de potência em 0°, 4°, 5° e 8° em uma fibra de sílica a 4300 m de comprimento.....	62
Figura 32	Distribuição angular de potência em 0°, 4°, 5° e 8° em uma fibra de sílica a 8100 m de comprimento.....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre fibras monomodo e multimodo.....	39
Tabela 2 - Comparação de algumas características das POFs e GOFs...	40

## LISTA DE SIGLAS

AN	Abertura numérica
APD	Foto diodo avalanche
BUS	Topologia em barramento
BROADCAST	Difusão simultânea
BACKBONE	Rede de transporte
BxL	Produto largura de banda x comprimento do enlace
C( $\theta$ )	Coeficiente de acoplamento
C	Velocidade da luz no vácuo
CH <sub>2</sub>	Metano
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
DPSO	Diphenyl Sulfoxide
DMSO	Dimetilsulfóxido
EM	Eletromagnético
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
ID	Índice Degrau
IG	Índice Gradual
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LC	<i>Length Coupling</i>
MHz	Mega Hertz
MM	Multimodo
n	Índice de refração
n <sub>c</sub>	Índice de refração da casca
OLT	<i>Optical Networks Units</i>
GeO <sub>2</sub>	Dióxido de germânio
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Pentóxido de fósforo
PMMA	Polimetilmetacrilato
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PIN	Fotodiodo PIN
POF	<i>Plastic Optical Fiber</i>
RDSI	Rede Digital de Serviços Integrados
S <sub>i</sub> O <sub>2</sub>	Dióxido de Silício
SSD	<i>Steady Station Distribution</i>
THz	Tera Hertz
UOR	Unidade Óptica de Rede
V	Frequência Normalizada
WAN	<i>Wide Area Network</i>
$\Delta$ pm	Variação da potência óptica
$\beta$	Constante de propagação
$\lambda$	Comprimento de onda do feixe óptico
$\theta_i$	Ângulo incidente
$\delta_\theta$	Separação angular
$\theta_c$	Ângulo crítico

## RESUMO

As propriedades de transmissão em fibras ópticas multimodo (MM), tais como a atenuação e largura de banda, mostram uma dependência não-linear com o comprimento das fibras, cuja origem é geralmente atribuída ao acoplamento modal. A estabilização de modos (EMD - *Equilibrium Mode Distribution*) é um fator relevante a se considerar. As perturbações intrínsecas em uma fibra causam espalhamento da luz ocasionando transferência de potência entre modos. Este trabalho mostra a solução numérica da equação de fluxo de potência de Gloge, com o objetivo de analisar o acoplamento modal em fibras altamente MM, nas simulações numéricas realizadas utilizou-se fibras com características utilizadas em outros trabalhos com a finalidade de se ter credibilidade dos resultados obtidos. Adotou-se o método das diferenças finitas explícitas para a solução numérica; fez-se uma comparação na obtenção do EMD para fibras plásticas (POFs) e fibras de sílica (GOFs) para avaliar-se as características determinantes para a estabilização dos modos em uma fibra, considerou-se um sinal com distribuição gaussiana injetado nas fibras para as simulações numéricas, as potências ópticas estão normalizadas para facilitar a análise gráfica. Para a análise da distribuição angular de potência, utilizou-se ângulos próximos para que se perceba a sensibilidade em relação ao comportamento do sinal óptico injetado na fibra. Na solução numérica desprezou-se o fator de atenuação modal devido a ser constante nos modos guiados.

Palavras-chave: Acoplamento modal, Multimodo, fibra óptica

## ABSTRACT

The transmission properties of multimode (MM) optical fibers such as attenuation and bandwidth, show a nonlinear dependence with the length of fibers, whose origin is generally due to modal coupling. The stabilization of modes (EMD - Equilibrium Mode Distribution) is a relevant factor to consider, the disturbances inherent in a fiber causing light scattering and then generates power transfer between modes. This paper shows the numerical solution of the Gloge's Power flow equation with the aim of analyzing the modal coupling in highly MM fiber. The power flow equation has been used in many numerical simulations. We adopted the method of finite differences in our numerical solution, We made a comparison of the EMD achieved in plastic fibers (POFs) and silica fibers (GOFs) in order to evaluate the features crucial for the stabilization of the modes in a fiber. We consider a signal with Gaussian distribution launched into the fibers. The optical powers are normalized to facilitate analysis in the graphs. To analyze the angular distribution of power, it was used angles close to  $\theta_0$  in order to show the sensitivity with the launching conditions. In the numerical solution despite the modal attenuation factor due to be constant even in guided modes.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação e importância do tema

A análise do acoplamento modal em fibras multimodo pela equação do fluxo de potência desperta interesse no meio acadêmico, devido a possibilidade de se obter uma banda passante otimizada pelo ajuste de alguns parâmetros do lançamento da luz na fibra que transporta o sinal óptico como por exemplo, o ângulo de injeção do feixe de luz incidente.

Utilizando-se a equação do fluxo de potência definida por Gloge em uma solução numérica pode-se simular o comportamento dos modos guiados em uma fibra multimodo indicando o comportamento da distribuição angular de potência.

Diversos estudos descritos em artigos abordam a questão do acoplamento modal em fibras multimodo, grande parte desses estudos abordam as fibras plásticas que podem ter aplicações em última milha, para sistemas de telecomunicações. Essas fibras possuem menor custo e facilidade de conexão entre outras características em relação às fibras convencionais de sílica. O estudo fez comparação entre o acoplamento modal das fibras plásticas (POF) e as de sílica (GOF), mostrando as diferenças na estabilização de modos (EMD) nos dois tipos de fibra. A análise do fluxo de potência no acoplamento modal é importante para pesquisas com o objetivo de implementar enlaces de curta distância, em última milha utilizando fibras multimodo índice degrau, possibilitando o desenvolvimento de projetos de baixo custo e alta eficiência.

## 1.2 Resumo de estudos anteriores

Em 1972 Gloge escreveu o artigo *Optical Power Flow in Multimode Fibers*[1], esse artigo definiu a equação do fluxo de potência para fibras multimodo, ele associou o acoplamento modal com as irregularidades aleatórias de construção da fibra, como excentricidade e micro curvaturas, e desenvolveu um modelo quantitativo de tais irregularidades. Esse artigo gerou posteriormente diversos estudos a respeito de acoplamento modal em fibras multimodo.

Em 1977 Michel Rousseau e Luc Jeunhomme escreveram o artigo, *Numerical Solution of the Coupled-Power Equation in Step-Index Optical Fibers*[2], onde os aspectos básicos do acoplamento modal para fibras multimodo são abordados. Nesse estudo foi proposto um método numérico para a predição do acoplamento modal. O método se mostrou eficaz, porém os autores verificaram que a aplicação de uma equação dependente do tempo, poderia gerar resultados imprecisos, então sugeriram, como melhoria para os estudos subsequentes, a elaboração de uma solução numérica com equação independente do tempo.

Em 2000, Alexandar Djordjevich e Svetislav Savovic descreveram no artigo: *Investigation of Mode Coupling in Step Index Plastic Optical Fibers Using the Power Flow Equation* [3], o comportamento do acoplamento modal em função dos efeitos das perturbações intrínsecas das fibras ópticas plásticas. Nesse estudo analisou-se o comportamento do sinal óptico ao longo de uma fibra plástica índice degrau em função do ângulo de injeção do feixe óptico inicial modulado utilizando-se uma solução numérica, que utilizava uma equação independente do tempo resolvendo o problema detectado por Michel Rousseau e Luc Jeunhomme em 1977[2], verificou-se que em função da maior quantidade de impurezas na fibra plástica em relação a fibra de sílica ocorre uma maior turbulência do feixe óptico que leva a uma antecipação do EMD comparativamente as fibras de sílica, esse estudo foi importante para os projetos de LAN utilizando fibras plásticas, onde foram analisados enlaces ópticos em substituição aos tradicionais cabos de rede.

Em 2002 Wenping Ge, Zongmin Yin, Zhonghui Li e Zhengli Zhou, escreveram o artigo *Research on mode coupling in plastic optical fiber* [4], o objetivo era analisar o acoplamento modal e a atenuação induzida em fibras plásticas multimodo de índice degrau em diferentes condições de injeção do feixe óptico na fibra, eles resolveram a equação do fluxo de potência proposto por Gloge , adotando o coeficiente de acoplamento proposto na experiência de Garito[5]<sup>1</sup>, onde se considerava o feixe incidente com uma forma gaussiana em relação ao eixo da fibra, também investigaram a atenuação do sinal óptico em função da variação da largura do feixe óptico gaussiano injetado na fibra.

Concluiu-se que o acoplamento de modal não depende só da fibra óptica mais também da condição inicial do feixe incidente, e também que o acoplamento modal provoca atenuação nesse mesmo feixe incidente. Estes resultados foram importante para o desenvolvimento das aplicações de fibra óptica de plástico em sistemas de curta distância.

Em 2004, Alexandar Djordjevich e Svetislav Savovic escreveram um novo artigo intitulado, *Numerical solution of the Power flow equation in step-index plastic optical fibers*[6], dessa vez utilizando-se uma solução numérica mais completa, onde se considerava atenuação nas fibras plásticas, obtendo-se resultados mais consistentes, nesse estudo analisou-se a obtenção de comprimento de acoplamento (LC) para algumas fibras encontradas no mercado. Esse estudo foi particularmente importante para o desenvolvimento de sensores utilizando-se fibras plásticas

$$1 D = 5,62 * 10^{-4} rad^2/m$$

e para se observar o comportamento da potência sob forte atenuação inerente das fibras plásticas.

Em 2006 ,Javier Mateo, M. Angeles Losada e Ignacio Garcés escreveram o artigo, *Global characterization of optical Power propagation in step-index plastic optical fibers* [7], onde se estimou a difusão e atenuação do feixe óptico injetado na fibra em função do ângulo de propagação do feixe no interior da fibra analisando-se o campo distante (FFP), definido como a difração da luz observada em um ponto distante da fonte de luz, com o auxílio de CCD(*Charge-Coupled Device*) Este trabalho foi importante, pois se comparou o campo o FFP com as previsões numéricas realizadas.

Em 2009, Alexandar Djordjevich e Svetislav Savovic novamente escreveram um artigo a respeito do tema denominado *Calculation of the coupling coefficient in step index glass optical fibers* [8].Abordando-se as fibras de sílica, analisou-se o LC e o comprimento onde se alcança o estado estacionário de distribuição de modos para fibras ópticas.(SSD-Steady Station Distribution) Aplicou-se uma solução numérica para analisar o comportamento dos modos até o equilíbrio modal em fibras de sílica. Todos esses artigos tinham como objetivo de melhorar a eficiência do acoplamento modal quando se utilizava as fibras multimodo índice degrau.Baseado nesses estudos foi desenvolvido um método de simulação numérica para avaliação do acoplamento modal em função de diferentes ângulos de injeção do feixe óptico e diferentes comprimentos da fibra. A maioria desses estudos tem como objetivo a melhoria da relação BxL (banda passante x comprimento do enlace óptico) para fibras multimodo de plástico ou sílica.

### **1.3 Organização da dissertação**

O capítulo 1 relata a importância do tema , bem como um resumo de alguns estudos realizados anteriormente, aborda também os conceitos básicos para uma compreensão do acoplamento modal em fibras multimodo e seu comportamento ao longo da fibra, cita desde a diferença entre os tipos de fibra utilizados como referência nas simulações numéricas até as características que podem influenciar no acoplamento modal.

No capítulo 2 discutiu-se o aspecto teórico do acoplamento modal em fibras ópticas, analisando os principais conceitos envolvidos.

No capítulo 3, discutiu-se a equação do fluxo de potência analisando a origem de suas variáveis e também aplicação do método de diferenças finitas.

O capítulo 4 apresenta resultados de simulações realizadas com o método numérico aplicado no *software* matemático *Matlab*, fez-se comparações entre diferentes tipos de fibras,

analisando o comportamento do sinal óptico ao longo das fibras; para as simulações foram utilizados dados de fibras utilizados em outros trabalhos aqui citados, os resultados foram comparados com os estudos anteriores e foi observado coerência nos resultados obtidos.

No Capítulo 5 são relatadas as conclusões obtidas embasadas nas simulações dos métodos numéricos e também proposições de continuidade do estudo, agregando conhecimentos de filtragem espectral, em fibras poliméricas ,o que teoricamente resultará em um estudo bastante abrangente sobre acoplamento modal, sendo considerado a real faixa de comprimento de onda emitida pela fonte de luz geradora do pulso óptico incidente, que sofre os efeitos da filtragem espectral.

## 2 CONCEITOS BÁSICOS

A faixa de frequência da portadora é o grande diferencial entre os sistemas de comunicação ópticos e os sistemas de comunicação em radiofrequência. A frequência de uma portadora óptica, em torno de 300 THz, é muito superior, por exemplo, à frequência de uma portadora em microondas. Então, dessa forma, a quantidade de informações possíveis que são transmitidas nos sistemas ópticos é muito superior que outros sistemas como os de microondas.

A superioridade da fibra se reflete na largura de banda da portadora modulada, Se a largura de banda do sinal modulado estiver limitada a 1% da frequência máxima disponível, a dos sistemas em microondas é de centenas de MHz e a dos sistemas ópticos de milhares de MHz. Essa grande superioridade de capacidade de transmissão é o que motiva o desenvolvimento das tecnologias de comunicação ópticas, daí surge a motivação para se explorar as características dos sistemas ópticos utilizando transmissão multimodo, uma vez que se pode ganhar capacidade de transmissão manipulando-se os parâmetros envolvidos no lançamento do sinal óptico na fibra.

Os enlaces de transmissão ópticos são classificados em três grandes categorias: enlaces ponto-a-ponto, redes de distribuição (*broadcast*) e redes locais. Em todos esses pode-se ter o emprego de fibras multimodo, tanto fibras de sílica, como a fibras plásticas, porém as aplicações para as fibras multimodo ficam limitadas pela distância, pois o efeito da dispersão modal compromete os enlaces de longa distância.

### 2.1 Enlace ponto a ponto

Os enlaces de comunicação óptico ponto-a-ponto são compostos, em suma por um transmissor de luz, em geral LED (*Light Emitting Diode*) ou LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), uma fibra óptica e um fotodetector, além de amplificadores e regeneradores ópticos. Na figura 01 tem-se um diagrama em blocos representado os elementos básicos de um enlace ponto a ponto.



Figura 01 – Enlace óptico representado por diagrama em blocos

Na figura 02 tem-se um enlace com a simbologia básica utilizada.

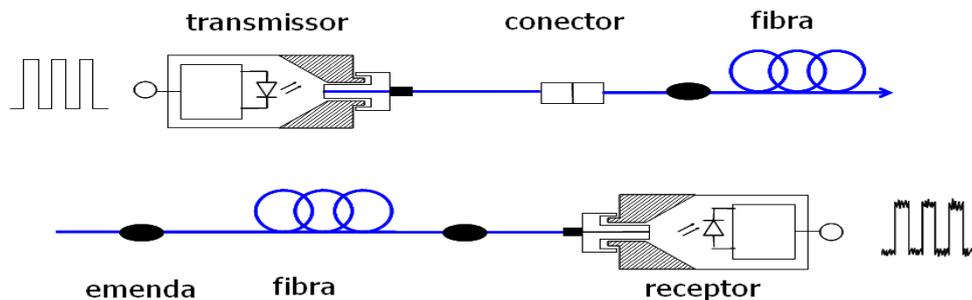


Figura 02 – Enlace óptico representado por simbologia básica

Para as fibras monomodo, em geral, utiliza-se um LASER com fino ajuste espectral, para que se minimizem os efeitos da dispersão. Nas fibras plásticas pode-se utilizar os LEDs, esses por sua vez espalham mais a luz, fato que é compensado devido ao grande diâmetro do núcleo da POF como também uma grande abertura numérica.

Nos receptores, empregam-se fotodetectores PIN (*Positive-Intrinsic-Negative*) ou APD (*Avalanche Photo-Diode*) como receptores do sinal óptico que convertem o sinal óptico em elétrico. Os amplificadores e regeneradores são os dispositivos utilizados para amplificação e regeneração do sinal óptico transmitido ao longo do enlace.

Os enlaces ópticos de curta distância e de longa distância, podem ser classificados como: MAN (*Metropolitan Area Network*), LAN (*Local Area Network*) e WAN (*Wide Area Network*). Os enlaces de longa distância operam na comunicação entre cidades, WAN com distâncias geralmente superiores a 50 km, utilizando fibras de alta capacidade que unem o tráfego oriundo de outras fibras. Devido à longa distância, eventualmente o sinal óptico necessita de amplificação ou de regeneração.

Os enlaces dentro de uma mesma cidade, MAN, trabalham normalmente com taxas de transmissão menores que os de longa distância. As LAN, são utilizadas para a interconexão de computadores ou servidores dentro de um mesmo prédio ou entre dois prédios vizinhos por exemplo. Nas LANs os enlaces de dados têm uma distância considerada relativamente curta de transmissão (< 10 km). Nesses enlaces têm-se baixas perdas e grande largura de banda, as fibras são também utilizadas nesses enlaces devido a outras vantagens, como a imunidade à interferência eletromagnética.

Os enlaces de comunicação intercontinental envolvem distâncias de vários milhares de quilômetros, neste caso, a baixa perda e a grande largura de banda das fibras monomodo justificam sua utilização na transmissão de dados através de cabos ópticos submarinos. De

acordo com a distância entre transmissor e receptor, o comprimento de onda de operação do enlace, pode-se haver a necessidade de se compensar a atenuação para que o sinal óptico tenha um nível mínimo para detecção com precisão. Esta compensação é realizada com a utilização de amplificadores e ou regeneradores ópticos.

Um regenerador óptico é composto de um transmissor e um receptor que detecta o sinal óptico, recupera o formato de bits no domínio elétrico e os converte novamente em sinal óptico. Os amplificadores ópticos amplificam diretamente o sinal, sem a necessidade de conversão para o domínio elétrico. Os enlaces de longa distância são em geral limitados pela dispersão modal e pouco por perdas na fibra. Os amplificadores ópticos devem ter limitação em ligações em cascata, pois podem amplificar também a dispersão, já os regeneradores não sofrem esse tipo de problema, pois regeneram os bits para o seu formato original e compensam a perda na fibra.

A Figura 03 mostra um enlace ponto-a-ponto empregando regeneradores e amplificadores ópticos.

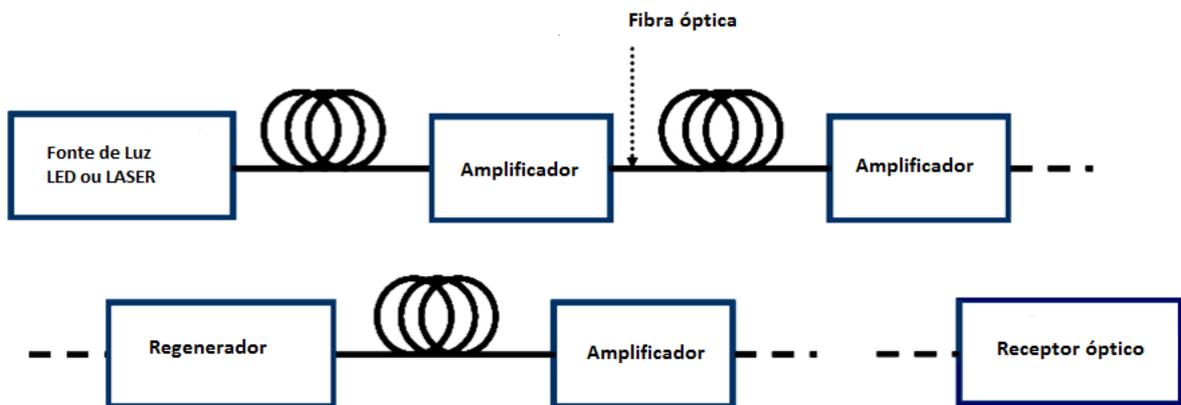


Figura 03- Enlace óptico ponto a ponto com regeneradores e amplificadores

O fator determinante para a utilização de fibras multimodo nesse tipo de ligação é à distância, pois deverá ser analisada a dispersão em função da distância do enlace e posteriormente a distância entre os regeneradores ou amplificadores, pois quanto maior for essa distância menor será o custo final do enlace. Essa relação deve ser bem definida em projeto para que o produto da taxa de *bits* pelo produto  $B \times L$  esteja de acordo com as necessidades da aplicação exigida. O produto  $B \times L$  é geralmente usado para mensurar o desempenho de um enlace ponto-a-ponto. O produto  $B \times L$  também é função do comprimento de onda utilizado, pois a perda e a dispersão na fibra dependem desse parâmetro.

## 2.2 Redes ópticas de distribuição

A maioria das aplicações de redes ópticas necessitam que a informação seja transportada e também distribuída para um grupo de usuários, como por exemplo, redes de TV a cabo e redes digitais de serviços integrados (RDSI), que são projetadas para distribuir vários serviços, como telefonia, fax, dados e imagem. Grande parte das redes ópticas tem distâncias de transmissão abaixo de 50 km. As taxas de transmissão podem ser da ordem de 10 Gbps [8].

As fibras multimodo podem ser utilizadas na chamada última milha, ou seja, no enlace final de interligação dos equipamentos, geralmente com distâncias inferiores a 1km. As Figuras 04 mostra a topologia BUS em uma rede PON(*Passive Optical Network*).

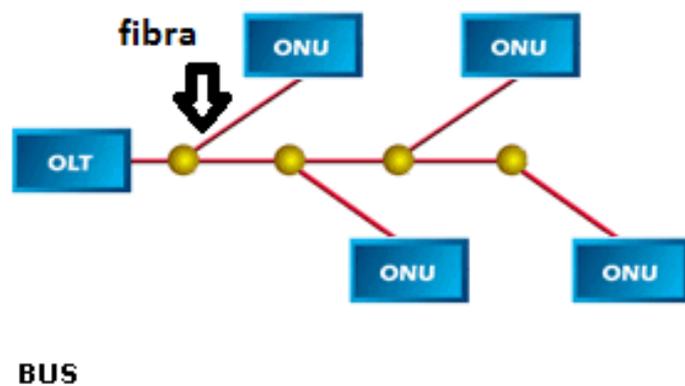


Figura 04 - Rede óptica PON com topologia em Barramento (BUS)

Na figura 05 tem-se um enlace óptico na topologia BUS.

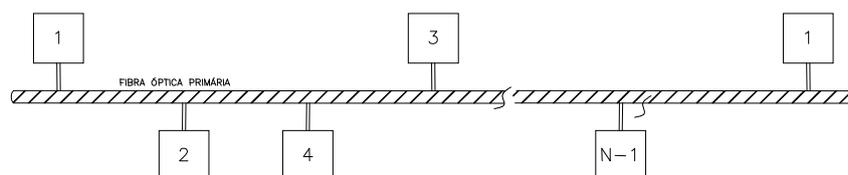


Figura 05- Rede óptica topologia BUS convencional

Na figura 06 tem-se um enlace óptico com topologia em estrela.

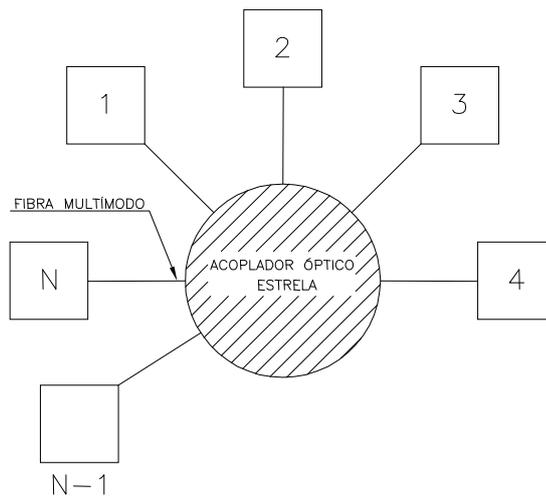


Figura 06- Enlace óptico topologia em estrela

A figura 07 mostra um enlace óptico com topologia em anel.

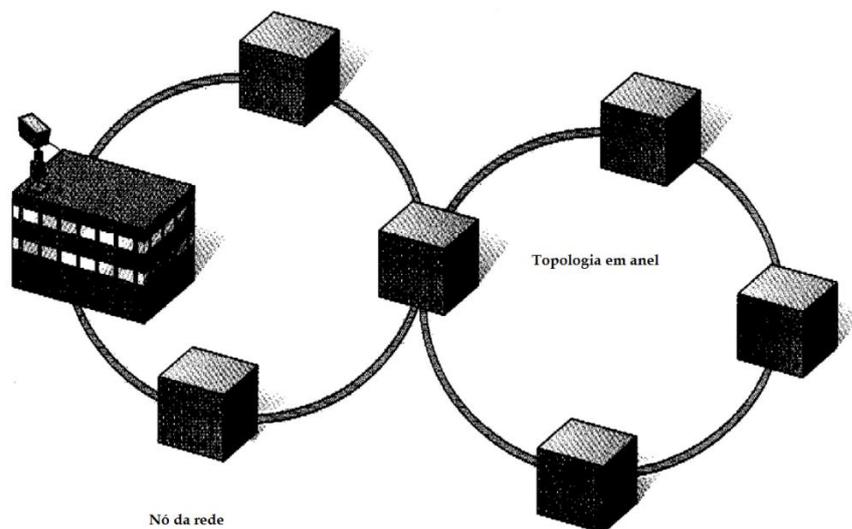


Figura 07 – Topologia de Rede em Anel

Com a solução proposta nesse trabalho pode-se realizar simulações para se avaliar a eficácia do enlace óptico, observando-se o comportamento do sinal ao longo da fibra. A distribuição do sinal óptico é realizada através de acopladores ópticos, que retiram uma pequena fração da potência óptica para cada ponto da rede.

Na topologia Hub o emprego das fibras multimodo é mais comum, pois interligam os nós da rede com distâncias mais curtas, geralmente dentro de um mesmo prédio, o uso desse

tipo de fibra torna o projeto final mais barato do que se utilizarmos fibras monomodo, e com uma eficiência superior aos cabos coaxiais, pois as fibras tem uma capacidade de banda muito superior. Nas aplicações com topologia estrela as fibras multimodo são utilizados com os acopladores ópticos em estrela, figura 6. Na topologia de rede em anel normalmente utiliza-se fibras monomodo. A aplicação de fibras multimodo nessa topologia dependerá da avaliação da relação  $B \times L$ .

### **2.3 Fibras monomodo e fibras multimodo**

As fibras monomodo e multimodo obtiveram seus nomes em função da forma como elas transmitem a luz. As fibras são projetadas para sistemas de moderada a longa distância como, por exemplo, redes metropolitanas, as fibras monomodo tem um núcleo muito pequeno ( $<10 \mu\text{m}$ ) que permite apenas um modo ou raio de luz ser transmitido pelo seu núcleo. Este pequeno núcleo necessita de um alinhamento de precisão para que a luz seja injetada, o que aumenta significativamente os custos do transceptor. Comparativamente as fibras multimodo possuem núcleos maiores que podem aceitar muitos modos simultaneamente; com um núcleo maior torna-se muito mais fácil a captação da luz na fibra. Em função do núcleo maior, permite-se utilizar fontes de luz de menor custo, pois possuem maior largura espectral, fator esse que contribui diretamente no custo. Da mesma forma, os conectores multimodo custam menos do que os monomodo, devido aos requisitos mais rigorosos de alinhamento exigidos na fibra monomodo [16].

Nas fibras monomodo as conexões requerem mais cuidado e habilidade para manipulá-las, por essa razão os componentes são muitas vezes pré-terminados nas fábricas, por outro lado, as conexões multimodo podem ser facilmente realizadas em campo, oferecendo flexibilidade de instalação, menores custos de instalação.

As fibras multimodo são indicadas para aplicações de até 2 km; Os Ambientes corporativos apresentam desafios particulares, incluindo espaços limitados e curvas apertadas, conexões de alta densidade e componentes que são manuseados com frequência, o que indica a utilização de fibras multimodo. Dentro desses ambientes as distâncias dos enlaces na sua maior parte estão abaixo dos 2 km, Em enlaces com distância superior a 2 km, Utiliza-se normalmente as fibras monomodo.

## 2.4 Redes ópticas locais e fibras multimodo

O emprego das fibras multimodo em redes locais é motivado principalmente pelo menor custo dos elementos envolvidos, as distâncias entre os enlaces, na maioria das vezes estão abaixo de 2 km. Essas redes são denominadas de redes locais. Em situações específicas as LANs podem ter enlaces ópticos de até 10 km, nesse caso as perdas na fibra são desprezíveis quando se trata de fibras de sílica monomodo, já para se utilizar as fibras multimodo nessa distância, passa-se a ter o problema da dispersão modal. Em função do menor custo das fibras multimodo, pesquisas buscam otimizar o produto BxL.

Atualmente as LANs que utilizam o padrão *Gigabit Ethernet* dominam grande parte desse tipo de rede, esse padrão é normatizado pela IEEE 802.3z e opera na faixa de 1 GB/s (um gigabit por segundo), em par trançado ou fibra óptica. Com o desenvolvimento de tecnologias para a utilização de POFs índice de grau [09][10] e [11], motivou-se o desenvolvimento de tecnologias para a utilização de POFs em redes *Ethernet*, essa motivação veio da possibilidade de se utilizar fontes de luz de baixo custo em detrimento aos LASERs de custo consideravelmente superior.

Com a utilização de LEDs ultra-brilhantes como fonte de luz, as POFs começaram a ser usadas em redes de alta velocidade. As POFs passaram a competir com cabos metálicos, fibras ópticas de sílica, e redes sem fio. As proporcionam uma grande largura de banda, menor custo de instalação, alta tolerância à interferência eletromagnética, fácil conectorização, e baixo peso. Redes Ethernet utilizando fibras multimodo de sílica são aplicações comuns em redes de computadores, já as POFs são ainda utilizadas em larga escala, daí abre-se a possibilidade de desenvolvimento de novas tecnologias empregando-se as POFs.

As especificações e normativas internacionais, tais como a ISO/IEC 11801, classificam as fibras multimodo de sílica como:

- OM1: Fibras com largura de banda de 200/500 MHz-Km em 850/1300 nm, fibra tipo 62,5/125  $\mu\text{m}$
- OM2: Fibras com largura de banda de 500/500 MHz-Km em 850/1300 nm, fibra tipo 62,5/125  $\mu\text{m}$
- OM3: Fibra 50/125  $\mu\text{m}$  otimizadas para laser com largura de banda efetiva de 2000MHz-Km em 850 nm, para aplicações em 10 Gb/s.
- OM4: Garante o atendimento às redes de alta velocidade de 40 a 100 Gb/s, foram desenvolvida para atender uma largura de banda mínima de 4700 MHz-Km em 850 nm com taxas de até 100 Gb/s.

A figura 08 mostra uma aplicação onde tem-se os dois tipos de fibra, monomodo e multimodo. No exemplo tem-se o prédio principal onde esta localizado o servidor da rede. No extremo da fibra monomodo ligada ao servidor do prédio, tem-se a UOR (Unidade Óptica de Rede), que realiza a interligação entre os dois tipos de fibra, e entre a U.O.R e os usuários finais aplica-se as fibras multimodo POF ou GOF na última milha.

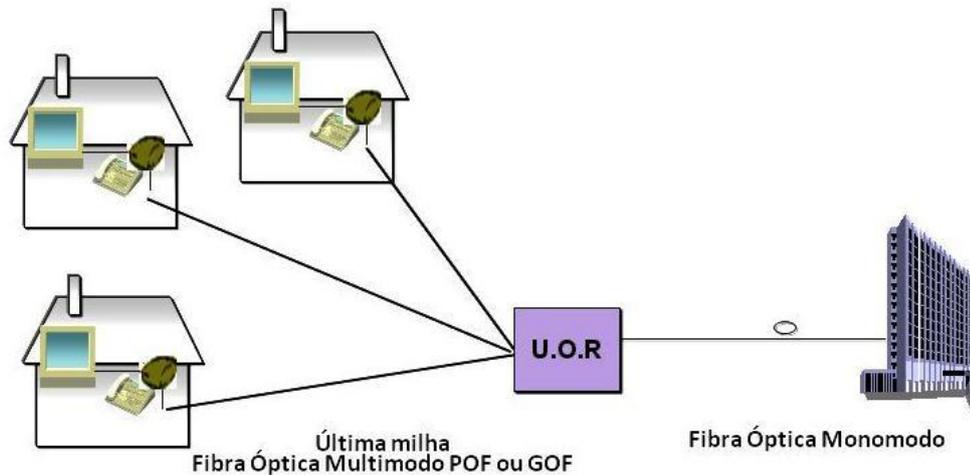


Figura 08 – Rede óptica mista com GOF e POF

## 2.5 Perfil do índice de refração das fibras

O perfil do índice de refração é definido pela diferença do índice de refração do núcleo em relação ao índice de refração da casca. Entre as fibras multimodo podemos ter dois tipos de perfil de índice de refração, o índice degrau (ID) e o índice gradual (IG). Nas fibras (ID) a luz é totalmente refletida na interface núcleo-casca, tomando uma trajetória em zigue-zague conforme a figura 09.

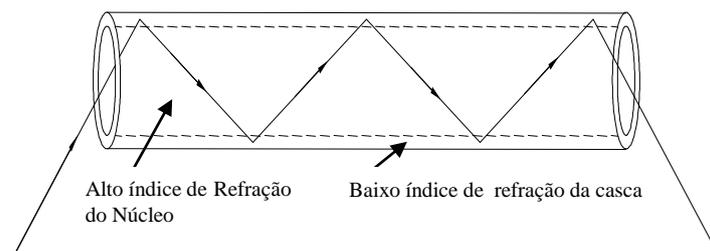


Figura 09- Fibra multimodo índice degrau

As fibras índice gradual apresentam menor atenuação e maior largura de banda, essas fibras possuem índice de refração variável no núcleo, vai diminuindo do eixo central em direção a casca, então a luz não é conduzida por reflexões totais, ela é refratada para o centro da fibra, formando um perfil parabólico. A figura 10 ilustra a trajetória dos modos numa fibra índice gradual.

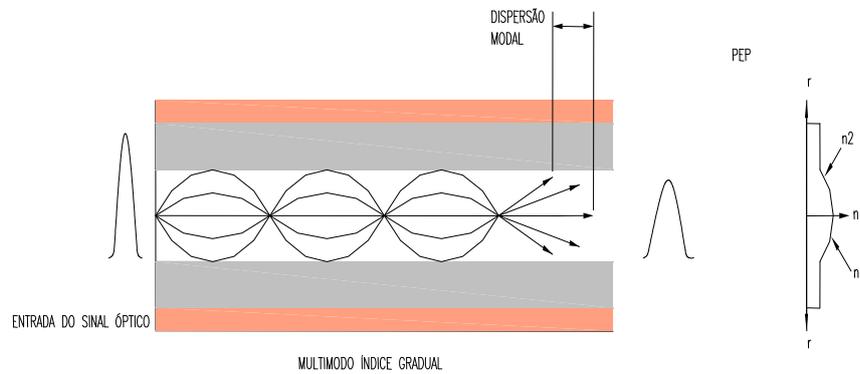


Figura 10- Fibra multimodo índice gradual

Para se obter diferentes índices de refração em uma fibra, pode-se fazê-lo de duas formas, através da utilização de materiais dielétricos distintos e através de dopagem do material[12]. Para as fibras de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) é comum a utilização de dopantes de materiais semicondutores (óxidos de não-metais ou semi-metais) como o óxido de Germânio ( $\text{GeO}_2$ ), o óxido de Fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e o óxido de Boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Para as fibras de plástico, os dopantes mais utilizados são monômeros tais como o Benzyl n-Butil Phtalate BBP ( $n=1,540$ ), o Benzyl Benzoate BEM ( $n=1,568$ ), o Diphenyl Sulfide DPS ( $n=1,633$ ), o Triphenyl Phosphate TPP ( $n=1,563$ ), o Diphenyl Sulfoxide DPSO ( $n=1,606$ ) e o Dimethyl Sulfoxide DMSO ( $n=1,479$ ).

Em projetos de enlaces ópticos devemos considerar o perfil do índice de refração para os dois tipos de fibra, POF e GOF, Nas POFs, o índice de refração do núcleo varia com a distância radial, definindo desta forma o perfil refrativo da fibra, que pode ser expresso por:

Para  $r \leq a$ :

$$n(r) = n(0) \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \left(\frac{r}{a'}\right)^g} = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta \left(\frac{r}{a'}\right)^g} \quad (01)$$

Para  $r > a$ :

$$n(r) = n(0) \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta} = n_1 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot \Delta} = n_2 \quad (02)$$

$r$  distância radial no núcleo a partir do eixo de simetria da fibra

$a$  raio da fibra

$n(r)$  variação do índice de refração na direção radial

$n(0)$  índice de refração no eixo de simetria da fibra (centro)

$\Delta$  Expressa a diferença de índice de refração entre núcleo e casca da fibra

$n_1$  índice de refração no núcleo

$n_2$  índice de refração da casca

$a$  raio do núcleo da fibra

$g$  expoente do perfil da fibra

O fator  $g$  é denominado expoente do perfil da fibra óptica, que determina o perfil de índice de refração da fibra, esses diferentes perfis estão relacionados a diferentes valores para este expoente. Três valores usuais para  $g$  são normalmente utilizados:  $g = \infty$  (ID perfil degrau),  $g = 1$  (IG perfil triangular);  $g = 2$  (IG perfil parabólico). O ponto ótimo de operação para o fator  $g$  situa-se próximo do valor 2, pois essa condição minimiza os fenômenos da dispersão modal e como resultado possibilita uma maior largura de banda.

A Figura 11 ilustra os vários perfis refrativos de acordo com o parâmetro  $g$ .

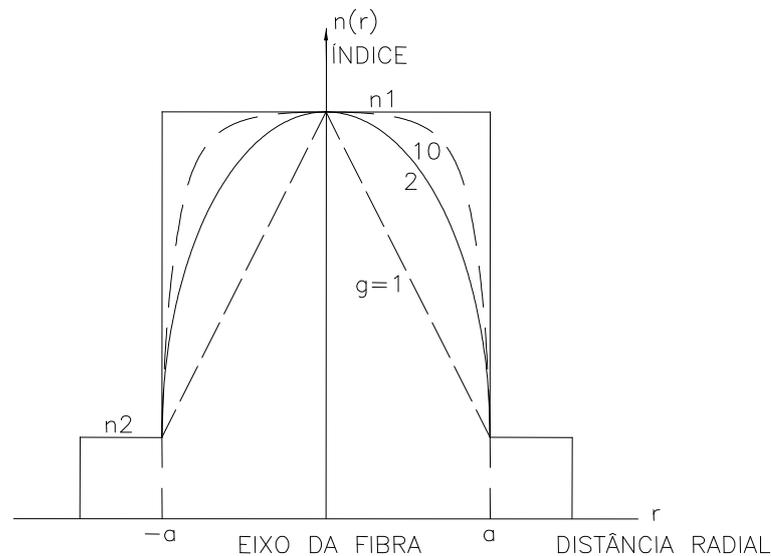


Figura 11- Perfil Refrativo da fibra óptica definido pelo expoente  $g$

Comercialmente tem-se diversas opções em relação ao índice de refração, a figura 12 mostra um gráfico com alguns índices refrativos de algumas fibras comerciais.

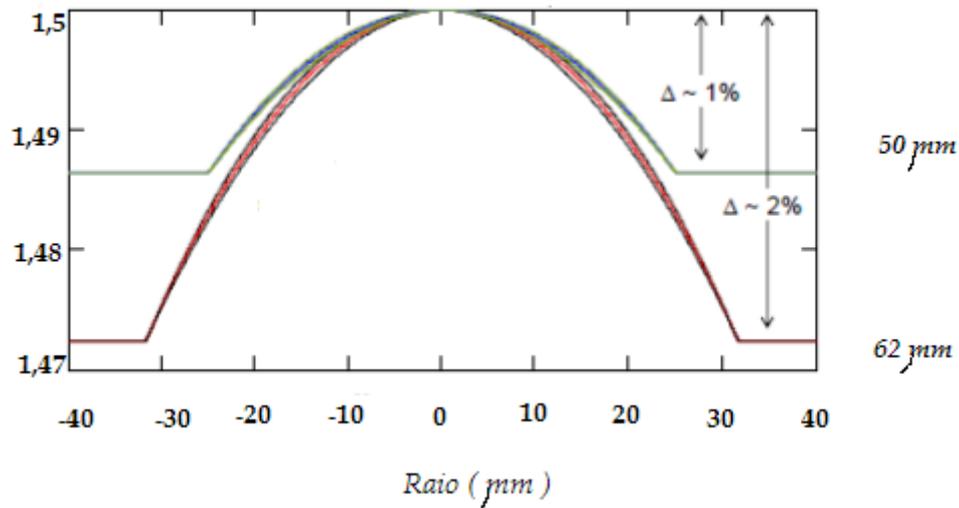


Figura12 – Perfil de índice de refração típicos de fibras multimodo para aplicações em LANs e SANs

O fator  $\Delta$  é calculado pela seguinte expressão:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \quad (03)$$

Quando a diferença relativa for muito menor do que 1, ( $\Delta \ll 1$ ) pode-se utilizar a seguinte aproximação:

$$(\Delta \ll 1) = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \quad (04)$$

## 2.6 Os modos em fibras ópticas

A luz que viaja através da fibra óptica é um grupo de ondas eletromagnéticas (EM) que abrangem um pequeno grupo de frequências dentro do espectro eletromagnético, para simplificar pode-se considerá-lo um raio de luz. Essa teoria foi apresentada no artigo *Ray theory and Random mode Coupling in an Optical fibre Waveguide.I* [11]. Essa teoria é útil para analisar-se o comportamento do feixe luminoso na fibra.

A luz, portanto propaga-se como uma onda eletromagnética ao longo da fibra. existem duas componentes nessa onda, o campo elétrico e o campo magnético.,existem também os padrões de forma do campo magnético através da fibra.Esses padrões são chamados modos de transmissão.

Os modos têm duas formas de transmissão, multimodo e monomodo. Uma fibra óptica que transporta mais de um modo é denominada multimodo (MM). O número de modos é sempre um número inteiro. Em uma determinada seção de fibra, há apenas um número definido de modos possíveis, cada modo é um padrão de campos elétricos e magnéticos. A dimensão do núcleo determina quantos modos ou padrões podem existir no núcleo, quanto maior o núcleo mais modos podem trafegar por ele[13].

Não se pode ter modos incompletos, ou seja não se têm campos incompletos, podemos fazer uma analogia com veículos trafegando em vias expressas, não se pode ter uma fração de carro percorrendo uma via, dessa maneira o novo modo só é estabelecido quando o campo é completo.

## 2.7 Conceito de frequência normalizada

A frequência normalizada é um parâmetro característico da fibra, que permite determinar o número de modos de propagação definida pelo parâmetro V, que é definido pela equação 5:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \leq 2,405 \quad (05)$$

Onde:

V frequência normalizada

$\lambda_0$  Comprimento de onda

a Raio da fibra

$n_1$  índice de refração do núcleo

$n_2$  índice de refração da casca

Segundo a equação 05, conclui-se que numa fibra monomodo operando num comprimento de onda  $\lambda$ , se reduzindo-se o índice de refração relativo, pode-se aumentar o diâmetro do núcleo mantendo a propagação em modo único. Observa-se também que o caráter da propagação monomodo não é só uma propriedade intrínseca da fibra, mas depende também do comprimento de onda de operação.

As fibras monomodo são construídas com dimensões do diâmetro do núcleo de forma a admitir apenas alguns comprimentos de onda (geralmente 8 nm a 12 nm) para ter pequenas diferenças do índice de refração entre o núcleo e a casca.

Na equação 5 com  $V = 2,4$ , pode-se ver que a propagação de um modo único é possível, e que existem variações bastante grande nos valores das características físicas do núcleo e o índice de refração dos principais matérias utilizados na casca[19].

Em projetos práticos de fibras monomodo, a diferença entre o índice de refração do núcleo e da casca varia entre 0,1 e 0,2 por cento. O diâmetro do núcleo deve ser escolhido de forma a ser próximo a região de corte dos modos mais elevados de primeira ordem[18], isto é, para valores de  $V$  ligeiramente inferiores a 2,4. Por exemplo, uma fibra monomodo típica pode ter um raio do núcleo de 3  $\mu\text{m}$  e uma abertura numérica de 0,1 em comprimento de onda de 800 nm gera um  $V = 2,356$ .

## 2.8 Quantidade de modos de propagação em fibras multimodo

A frequência normalizada é utilizada também para determinar a quantidade de modos em uma fibra multimodo, quando for considerada grande ( $V \gg 1$ ). Nesta condição, um cálculo estimado do total de modos é definido pela equação:

$$M \approx \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} \right)^2 \cdot (n_1^2 - n_2^2) = \frac{V^2}{2} \quad (06)$$

## 2.9 Óptica geométrica

Para se analisar a propagação da luz em fibras, pode-se ter um entendimento simplificado usando a teoria dos raios ou óptica geométrica. Essa teoria é válida quando o núcleo da fibra é ligeiramente maior que o comprimento de onda do feixe de luz que trafega pela fibra. Fibras com essas características são denominadas de multimodo, as primeiras fibras multimodo tinham o raio do núcleo entre 25  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  e operam na faixa de 850 nm. Na análise por óptica geométrica, a luz pode ser considerada como um feixe de "raios" que se propagam em reflexões contínuas no interior da fibra, sofrendo reflexão e ou refração na *interface* entre núcleo e casca. A figura 13 mostra a *interface* entre dois meios com índices de refração  $n_1$  e  $n_2$ . Um raio de luz do meio 1 incide na *interface* entre os meios 1 e 2. O ângulo de incidência  $\theta_1$  é o ângulo entre o raio incidente e a normal à *interface* núcleo casca. Parte da energia é refletida para o meio 1, como raio refletido, e a energia restante passa para o meio 2, a parcela que vai para o meio 2 é o raio refratado. A lei de Snell mostra que  $\theta_1 r = \theta_1$  e que os ângulos do raio incidente e refratado aumentam proporcionalmente, ou seja, à medida que

o ângulo de incidência aumenta o ângulo refratado aumenta na mesma proporção, isso quando temos  $n_1 > n_2$ .

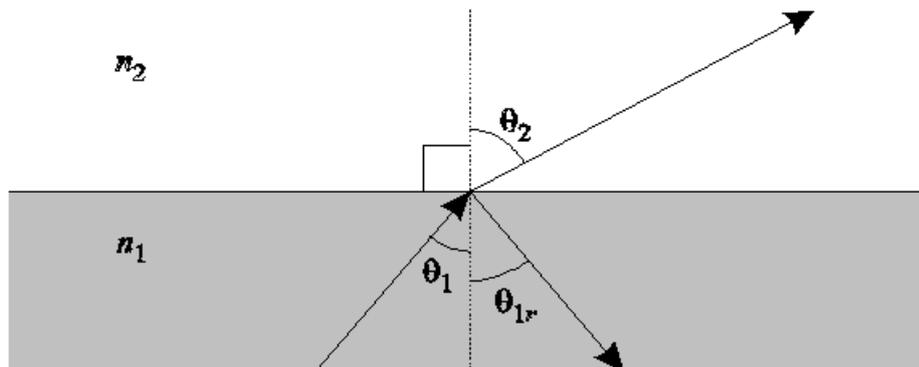


Figura 13 – Interface entre meios com diferentes índices de refração

Quando  $\theta_1 > \theta_c$  os raios são totalmente refletidos no núcleo da fibra, fenômeno da reflexão interna total. Dessa forma a luz na fibra se propaga em função de uma série de reflexões internas totais na *interface* núcleo-casca. Na figura 14 pode-se observar o acoplamento da luz na entrada da fibra, verifica-se que somente os raios que incidem em determinado ângulo são coletados pela fibra e sofrem reflexão interna total na *interface* núcleo-casca e então propagados ao longo da fibra. Na figura 14, 1 é o detalhe do raio coletado pela fibra, e 2 é o raio não coletado pelo núcleo da fibra, ou seja o raio refratado.

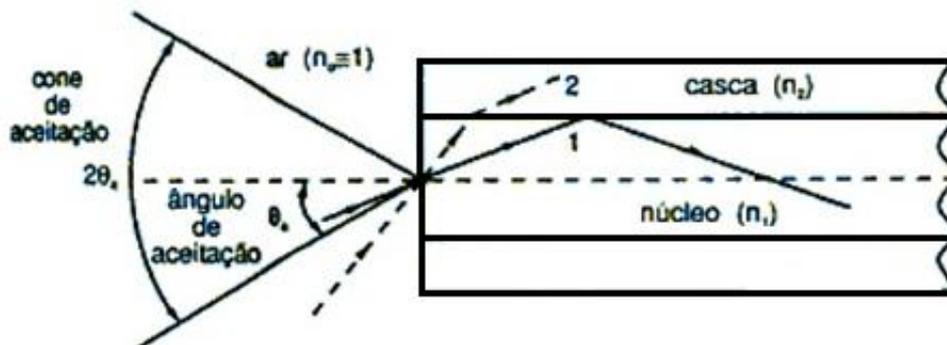


Figura 14 – Ângulo de acoplamento de luz na entrada da fibra

Os raios coletados são chamados de raios guiados e os ângulos de incidência são dados pela equação 7:

$$\theta_0 < \theta_{0max} = \text{sen}^{-1} \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}} \quad (07)$$

O produto  $n_0 \cdot \text{sen}\theta_0$  é definido como abertura numérica da fibra (NA), a Abertura numérica define o ângulo de aceitação da luz na fibra, ou seja o ângulo máximo incidente na entrada da fibra para que ocorra a reflexão interna total. Quanto maior a abertura numérica, maior é sua capacidade de absorver a energia luminosa. A abertura numérica é definida a partir do conceito de ângulo de aceitação ou cone de aceitação. Observar-se que todo raio incidente na fibra dentro do ângulo de aceitação, são modos guiados, ou seja são refletidos ao longo da fibra. Porém os raios com ângulo de incidência maior que o ângulo de aceitação não são refletidos totalmente, ocasionando perda de potência óptica gerada pela fonte de luz. A abertura numérica tem uma relação de dependência com os índices de refração do núcleo e da casca da fibra. Quanto menor a abertura, maior é a taxa de transmissão, pois se reduz a dispersão modal. Isso ocorre na fibra monomodo, pois essa tem uma AN muito pequena de forma a permitir um único modo guiado. Já as fibras multimodo ID tem a AN maior, evidenciando sua baixa taxa de transmissão. A diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca são normalmente pequenas e sua diferença relativa é definida por  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2 \cdot n_1^2} \quad (08)$$

Toma-se como exemplo uma fibra que tenha um  $\Delta=0,01$ , que é um valor típico para fibra multimodo, e  $n_1= 1,5$  um valor típico para a sílica, considerando um acoplamento a partir do ar, obtém-se  $AN \cong 0,212$  e um  $\theta_{max} \cong 12^\circ$ .

As relações matemáticas definidas pela óptica geométrica são:

\* O ângulo de aceitação pode ser definido com a condição de ângulo máximo aceitável na fibra, ou seja, o ângulo crítico definido na equações 09 e 10.

$$\text{sen}\theta_{aceitação} = n_1 \cdot \text{sen}\theta_{crítico} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (09)$$

Ou ainda:

$$\theta_{aceitação} = \text{arsen } AN \quad (10)$$

\* A abertura numérica, equação 11:

$$AN = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (11)$$

onde:

$n_1$  é o índice de refração do núcleo

$n_2$  é o índice de refração da casca

A abertura numérica (ou AN) também é dada em função de  $n_1$  e  $\Delta$ , equação 12:

$$AN = n_1 \cdot \sqrt{2\Delta} \quad (12)$$

Um valor grande da abertura numérica (AN) indica uma maior capacidade de captação da luz, facilitando o acoplamento (alinhamento) da fibra à fonte optoeletrônica. A AN típica de uma fibra plástica, por exemplo, em geral é em torno de 0,5, esse valor é muito grande quando comparada às das fibras de sílica com AN tipicamente próximo a 0,14 cujo ângulo de aceitação é aproximadamente  $16^\circ$ . Porém uma AN grande acarreta a ocorrência da dispersão modal devido ao grande número de modos de propagação. A figura 15 ilustra o cone de aceitação formado pelo ângulo de aceitação da fibra.

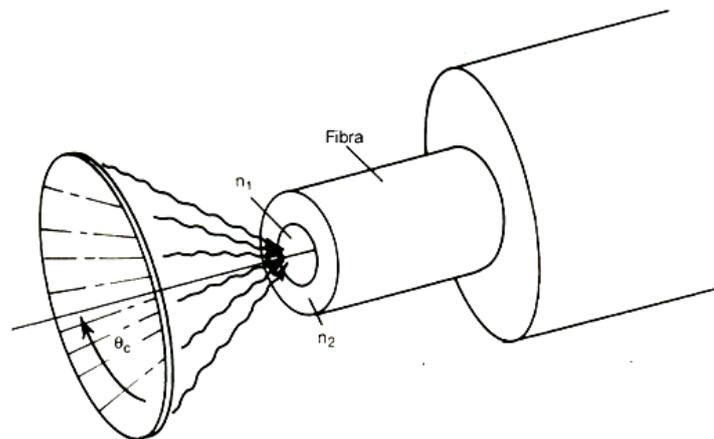


Figura 15- Cone de aceitação da fibra multimodo.

## 2.10 Atenuação em fibras ópticas multimodo

Em comunicações ópticas, a atenuação do sinal óptico representa a redução da intensidade do sinal durante a transmissão[20]. O sinal luminoso pode ser atenuado em sua intensidade na superfície que reflete ou no meio que atravessa, resultando na degradação da informação a ser transmitida, essa degradação tem um limite máximo aceitável, ou seja o limite para não ocorrência da interferência intersimbólica (ISI), limite esse determinado pela capacidade de interpretação correta da informação transmitida ao chegar no seu destino final.

A atenuação ocorre pelos fenômenos intrínsecos da fibra como absorção, espalhamento e irradiação. Cada fenômeno contribui de forma independente para a atenuação total da fibra. Esta atenuação total varia com o comprimento de onda e, portanto, sua medida é feita em função de  $\lambda$ . A atenuação da fibra é expressa pelo coeficiente de atenuação ( $\alpha$ ) que indica o valor da atenuação em função do comprimento L em uma fibra esticada de modo que não haja atenuações por curvaturas, o coeficiente ( $\alpha$ ) é o somatório das parcelas de atenuação em função da absorção ( $\alpha_a$ ), espalhamento ( $\alpha_e$ ) e irradiação ( $\alpha_i$ ), definido pela equação 13.

$$(\alpha) = (\alpha_a) + (\alpha_e) + (\alpha_i) \quad (13)$$

Para análise da atenuação Considera-se z como o eixo de propagação ao longo do guia, este coeficiente expressa a relação entre o ponto inicial da fibra ( $z = 0$ ) e o ponto de referência utilizado para a medida de atenuação da fibra. Esta relação é dada em dB/m ou dB/km, e pode ser calculada conforme a equação 14:

$$\alpha = -\frac{1}{z} \cdot 10 \log_{10} \frac{P(z)}{P(0)} \text{ ou ainda } P(z) = P(0) \cdot 10^{-\alpha \cdot z} \quad (14)$$

Onde  $P(0)$  é a potência luminosa do feixe óptico injetado na entrada da fibra ( $z = 0$ ) e  $P(z)$  é a potência luminosa do feixe óptico em um determinado comprimento z da fibra.

Então, a potência decresce exponencialmente com o aumento da distância z.

A avaliação da atenuação em função da distância percorrida pelo sinal óptico é normalmente utilizada nas curvas elaboradas pelos fabricantes, sendo uma medida de referência. No caso das fibras de sílica (GOF), a unidade normalmente utilizada é o dB/km e no caso das fibras de plástico utiliza-se normalmente o dB/m

## 2.11 Dispersão óptica

Os modos que viajam no núcleo de uma fibra sofrem o efeito do alargamento temporal, chamado de dispersão temporal ou simplesmente dispersão. Isto ocorre devido as diferentes atrasos de propagação dos modos, que ocorrem em função das diferentes componentes espectrais do pulso propagante, que ao percorrerem a fibra tem velocidades diferentes. Os vários modos que chegam ao ponto final da fibra constituem o feixe óptico injetado. A dispersão limita a capacidade de transmissão da fibra, por isso nos projetos de enlace esse parâmetro deve ser considerado.

A dispersão afeta as comunicações analógicas provocando a redução da banda passante, em transmissões digitais ela pode causar a interferência intersimbólica (ISI–Inter Symbol Interference); na figura 16 tem-se um sinal afetado pela ISI, o pulso representado em amarelo se mistura com o pulso em azul, isso ocorre devido ao alargamento temporal, criando uma região de indecisão representada pela área em verde, nesse ponto o equipamento de recepção não consegue distinguir qual o *bit* correspondente transmitido, o que ocasiona um erro em relação a informação original.

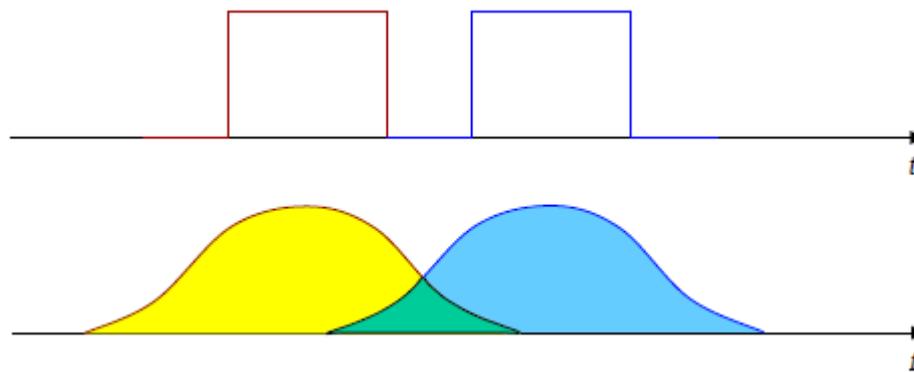


FIGURA 16- Interferência intersimbólica

As formas de dispersão são identificadas como: intramodal ou modal, intermodal e não-linear, sendo que a dispersão modal subdivide-se em duas categorias, dispersão material e dispersão de guia de onda.

O tipo de dispersão na fibra dependerá do tipo que estará sendo utilizada. As fibras ID, são afetadas em maior parte pela dispersão modal, já as fibras IG, são afetadas pela dispersão modal e material, esse tipo de fibra foi concebido com o objetivo de minimizar os efeitos da dispersão das fibras ID.

### 2.11.1 Dispersão modal

Para o caso específico das fibras multimodo temos o efeito da dispersão modal que é o principal ofensor, que é ocasionado devido aos inúmeros modos que percorrem trajetórias diferentes e chegam em tempos diferentes no fim da fibra. Logo, os modos de alta ordem (que percorrem caminhos mais longos) demoram mais tempo para sair da fibra do que os modos de baixa ordem, o que ocasiona um alargamento temporal do pulso óptico injetado, a figura 17 ilustra esse efeito.

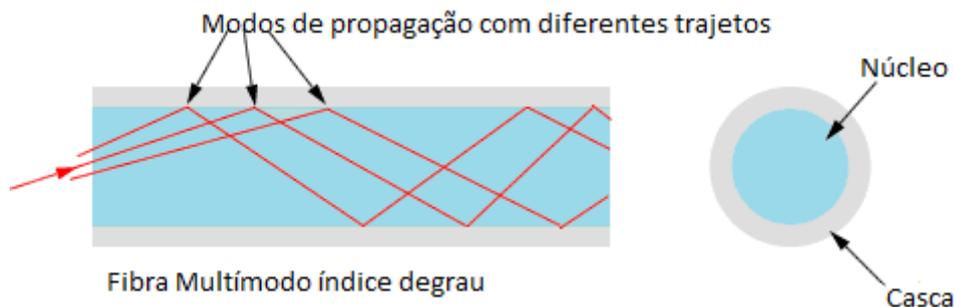


Figura 17- Fibra multimodo índice degrau

A diferença entre os tempos de chegada é dado por  $\tau = \Delta t_1$ , onde:  $t_1$  é o tempo de propagação do modo de menor ordem e  $\Delta$  é a diferença percentual de índices de refração entre o núcleo e a casca dada pela equação 15:

$$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (15)$$

Os raios viajam em percursos diferentes, dispersando-se temporalmente na saída da fibra, pois esses viajam com mesma velocidade. A dispersão modal afeta particularmente as fibras multimodo. Pode-se estimar o alargamento temporal, equação 16, levando-se em conta os percursos mais curtos e os percursos mais longos (ângulo crítico).

- Percurso mais curto: comprimento  $L$
- Percurso mais longo: Comprimento  $L/\text{Sen}\theta_c = L n_1/n_2$
- A velocidade de propagação é dada por  $v=c/n_1$

O alargamento temporal  $\Delta_t$  é dado por:

$$\Delta_t = \frac{n_1}{c_1} \cdot \left[ \frac{L}{\text{Sen}\theta_c} - L \right] = L \cdot \frac{n_1}{c} \cdot \left[ \frac{n_1}{n_2} - 1 \right] \quad (16)$$

A dispersão modal limita as fibras multimodo a aplicações de curta distância, normalmente até 2 km.

### 2.11.2 Dispersão intermodal

Em fibras monomodo não há a dispersão modal, pois toda a informação é transportada pelo modo fundamental  $HE_{11}$  [13], ainda assim, observa-se um alargamento temporal dos pulsos que resulta, principalmente da dependência da velocidade de grupo (envelope) associada ao modo fundamental e a frequência:  $v_g(\omega)$ . Esse tipo de dispersão é dependente do comprimento de onda, também é conhecida como dispersão cromática, ela é resultante da dependência da velocidade de grupo de propagação, e divide-se em dois tipos: dispersão material e dispersão de guia de onda. A dispersão intermodal ou cromática é também denominada GVD (*Group Velocity Dispersion*).

Os efeitos na distorção do sinal transmitido aumentam com a largura espectral da fonte luminosa, então é muito importante a avaliação da fonte de luz a ser utilizada em cada projeto.

Cada componente espectral do pulso viaja ao longo da fibra com uma velocidade de grupo específica, a figura 18 mostra esse efeito considerando um pulso retangular na entrada da fibra, na saída da fibra observa-se o alargamento causado pela dispersão cromática.

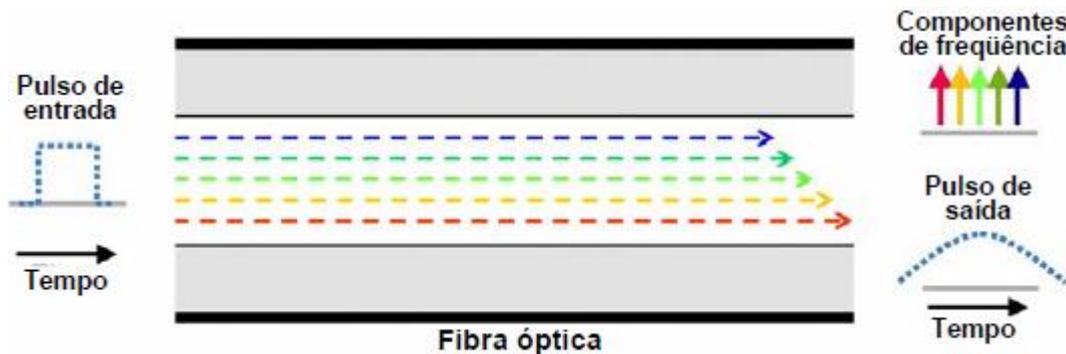


Figura 18- Dispersão cromática

### 2.11.3 Dispersão material

A dispersão material resulta da variação do índice de refração do material com a frequência ou comprimento de onda da luz. O índice de refração do núcleo e da casca dependem do comprimento de onda e também da largura espectral ( $\Delta\lambda$ ) da fonte de luz utilizada. O fato das fontes luminosas não serem ideais, ou seja, possuem uma largura espectral finita ( $\Delta\lambda$ ), tem-se que cada comprimento de onda é submetido a um valor diferente de índice de refração num determinado ponto, então cada comprimento de onda viaja no núcleo com velocidade diferente, o que gera uma diferença de tempo de percurso,

causando a dispersão do impulso luminoso injetado no ponto inicial da fibra. Uma fonte com menor largura espectral minimiza os efeitos da dispersão material.

No caso de fibras multimodo, as dispersões que mais influenciam são a dispersão modal e a dispersão material, nesse estudo realizado não foi considerada a dispersão material, mas como proposição para complementar a solução numérica apresentada, sugere-se associar esse fenômeno à solução proposta. Na fibra monomodo, por outro lado, leva-se em conta a dispersão material e a dispersão do guia de onda.

#### 2.11.4 Dispersão de guia de onda

Esse tipo de dispersão ocorre devido a variações nas dimensões do núcleo e variações no perfil de índice de refração ao longo da fibra óptica. Essa dispersão só é percebida em fibras monomodo que tem dispersão material reduzida.

### 2.12 Fontes de luz

Uma fonte baseada em LASER tem custo relativamente maior que fontes baseadas em LED. Os LEDs possuem maior largura espectral, pois não são fontes de luz monocromáticas, já o LASER possui um único comprimento de onda, ou seja é uma fonte de luz monocromática. A figura 19 mostra a comparação da emissão de luz pelos dois componentes. Observa-se que o LASER possui um único comprimento de onda, o que significa que toda a potência óptica se concentra nesse comprimento de onda. A fibra plástica possui um grande diâmetro de núcleo, conseqüentemente temos uma abertura numérica grande o suficiente para captar boa parte da luz gerada por um LED; A utilização de LEDs e POFs tem sido motivação para vários estudos com o objetivo de se obter um conjunto de baixo custo e razoável desempenho.

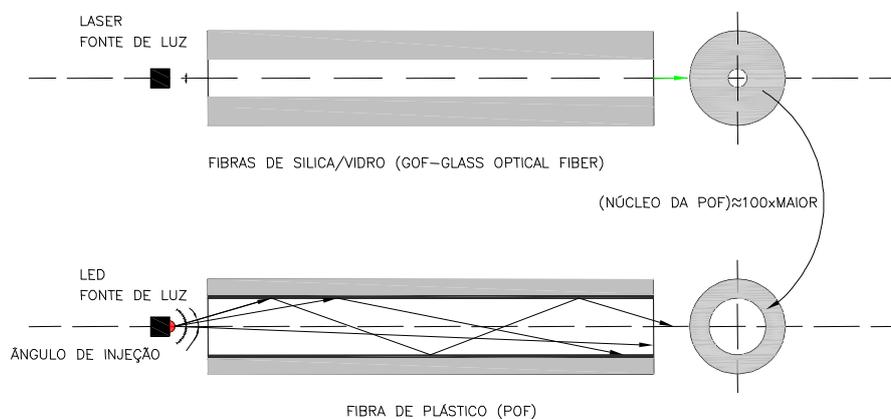


Figura 19- Fontes de luz em fibras de sílica(monomodo) e POF(multimodo)

Na tabela 1 tem-se um comparativo das fibras multimodo e monomodo.

Tipo de Fibra	Multimodo	Monomodo
Comprimento de onda da transmissão	850 a 1300 nm	1260 a 1640 nm
Fonte de luz	LED (baixo custo)	LASER (alto custo)
Largura de banda	Limitada	Praticamente infinita
Distância	Até 2 km	Até 200 km
instalação	Simples/baixo custo	Complexa/alto custo
Manutenção	Flexível/fácil	Sensível/alto custo
Aplicação	LANs ( <i>data centers</i> e redes corporativas)	Redes de acesso, MANs

Tabela 1 – Comparação entre fibras monomodo e multimodo

## 2.13 Materiais das fibras

### 2.13.1 Fibras plásticas

As fibras plásticas são construídas utilizando-se o polimetilmetacrilato (PMMA) que é obtido através da polimerização do metacrilato, em alguns casos especiais são adicionados outros materiais como poliestireno (PS) e policarbonato (PC), que são usados como núcleo do material para aplicações especiais. O poliestireno é muito frágil e, portanto, apesar de sua atenuação muito baixa em comparação a outros materiais, raramente é utilizado[13]. Devido a sua alta resistência à temperatura, O policarbonato é particularmente adequado para aplicações sujeitas a altas temperaturas (por exemplo, em veículos), mas ele tem uma atenuação maior do que o PMMA, no entanto o PC tem resistência significativamente maior à flexões alternadas em raios de curvatura pequeno. A busca por novos materiais adequados para a fibra óptica plástica está concentrada em minimizar a atenuação óptica e, por outro lado, nos materiais que são resistentes a altas temperaturas, bem como oferecendo baixa atenuação óptica. Experimentos em laboratório com PMMA, no qual os átomos de hidrogênio são substituídos por átomos de deutério ou flúor, indicaram uma redução significativa da atenuação óptica das fibras. Teoricamente uma atenuação de 9,1 dB / km no comprimento de onda de 680 nm se torna viável usando deutério. Isto tem sido investigado com grandes detalhes como parte do trabalho de desenvolvimento na fabricação de fibras de plástico de

índice gradual. Assim, foi possível medir uma atenuação óptica de menos de 50 dB / km na banda de frequências 500-1300 nm em uma fibra fluoretada de plástico de índice gradual, isso representa uma atenuação baixa em se tratando de POF nesse comprimento de onda. Fibras plásticas com perfil fluoretado tem atenuação na casa de 25 dB/km , com possibilidade de se chegar a 10 dB/km na faixa de comprimento de onda de 650 nm a 1300 nm. A figura 20 mostra a estrutura molecular do PMMA.

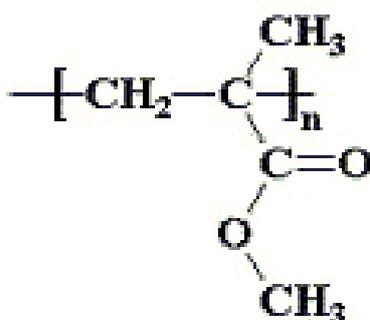


Figura 20- Estrutura do PMMA

A tabela 2 mostra algumas características das POFs comparadas as GOFs.

Características	POF	GOF (sílica)
Limite elástico	Amplio	Muito reduzido
Propriedades mecânicas	Resistente	Muito frágil
Facilidade de Instalação	Limitada	Praticamente infinita
instalação	Simples/baixo custo	Complexa/alto custo
Manutenção	Flexível/fácil	Sensível/alto custo

Tabela 2 –Comparação de algumas características das POFs e GOFs

### 2.13.2 Fibras de sílica

O material utilizada na fabricação de fibras de sílica, que resulta em baixas perdas é composto de  $\text{SiO}_2$  fundido. A diferença de índice de refração entre o núcleo e o revestimento é obtida pelo uso seletivo de dopantes durante o processo fabricação. Dopantes, como  $\text{GeO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  aumentam o índice de refração da sílica pura e são adequados para o núcleo, No revestimento são utilizados boro e flúor, esses elementos tem a propriedade de diminuir o índice de refração da sílica. Dopantes adicionais são utilizados dependendo aplicações específicas. Como exemplo, para a fabricação de amplificadores de fibra e LASER, o núcleo de fibras de sílica são codopados com íons terras-raras usando dopantes, como  $\text{ErCl}_3$  e  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ .

### 3 ACOPLAMENTO MODAL EM FIBRAS ÓPTICAS

As fibras ópticas multimodo são projetadas para transportar vários comprimentos de onda correspondente a múltiplos modos, cada um com um ângulo de reflexão com pequena diferença dentro do núcleo da fibra óptica. A transmissão em fibra óptica multimodo é usada para distâncias curtas, porque os modos tendem a se dispersar mais em comprimentos mais longos ,pelo efeito da dispersão modal. Para distâncias maiores, normalmente utiliza-se as fibras monomodo. O acoplamento modal em uma fibra óptica é causado pelas imperfeições na composição da fibra [21] , pela geometria ou por fatores externos tais como micro curvaturas e emendas, sendo responsáveis pelo incremento de atenuação nos modos de ordem mais alta assim como pela redução na dispersão intermodal na fibra. Ocorre então a transferência de energia entre os modos de alta e baixa ordem após um determinado comprimento da fibra. O comprimento que ocorre a transferência de energia é denominado comprimento de acoplamento ou comprimento de equilíbrio modal. Ao fim dessa transferência de modos chega-se a uma condição de equilíbrio modal, ou simplesmente EMD O comprimento de acoplamento está diretamente relacionado à AN da fibra, quanto menor a AN, maior é o valor para o comprimento de acoplamento, sendo o equilíbrio alcançado mais tardiamente. Em fibras ópticas plásticas, o comprimento de acoplamento é muito menor do que aquele observado em fibras convencionais de sílica, para os quais o  $L_c$  é da ordem de muitos quilômetros. Isto ocorre porque as POFs têm maior AN e também é devido ao grande número de imperfeições estruturais, principalmente na *interface* núcleo casca. A figura 21 mostra um gráfico do acoplamento modal para diferentes condições de lançamento da luz na fibra, na entrada da fibra injeta-se um feixe de luz e se avalia sua distribuição angular de potência em 20 m,25 m,30 m,35 m.e 40 m, percebe-se que existe uma evolução da distribuição de potência nos diferentes pontos da fibra, em 40 m a condição de EMD foi obtida por completo, nesse ponto tem-se o aproveitamento máximo da distribuição de potência óptica.

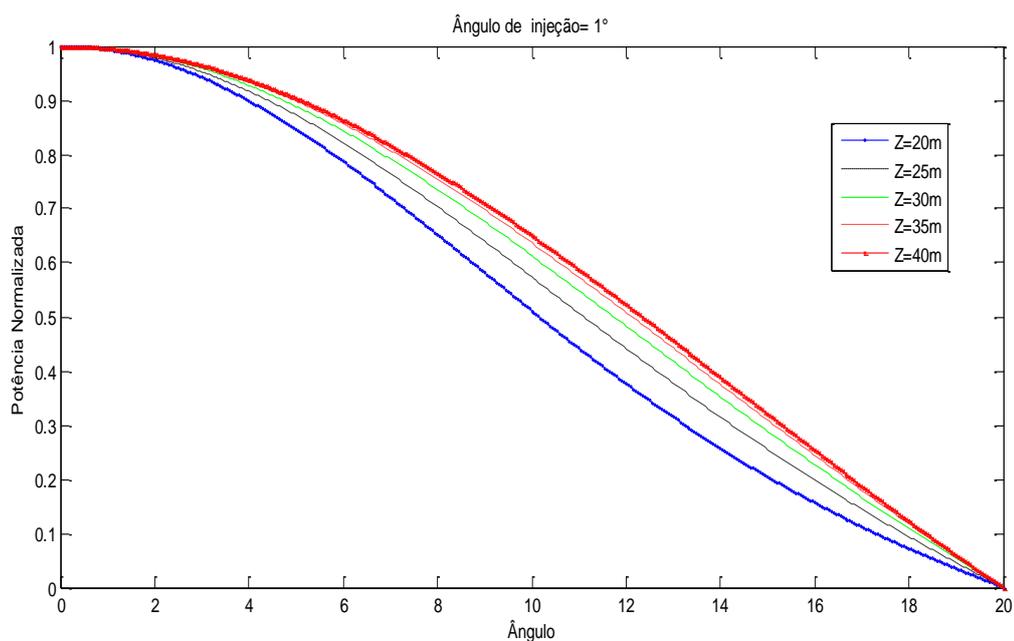


Figura 21 – Distribuição angular de potência para diferentes ângulos de injeção

Quando se alcança o comprimento  $L_c$ , o equilíbrio de distribuição é estabelecido e, nesta condição, as características de transmissão (atenuação e dispersão) independem do comprimento da fibra medida.

### 3.1 Modos em fibras índice degrau

O número de modos de uma fibra multimodo de índice degrau depende diretamente de  $\Delta$  e o raio do núcleo da fibra. O número de modos de propagação também depende do comprimento de onda ( $\lambda$ ) da luz transmitida. Em uma típica fibra multimodo índice degrau existem centenas de modos de propagação. A maioria dos modos propagantes estão longe da região de corte definida pela frequência normalizada ( $V$ ) no eixo central da fibra. Os modos que estão próximo a região de corte, não trafegam no núcleo da fibra. Os modos que estão mais longe do comprimento de onda de corte concentram a maior parte de sua energia da luz no núcleo da fibra. Modos que se propagam perto da região de corte têm sua maior parte da potência luminosa propagando-se pela casca da fibra. Como a maioria dos modos de se propagam longe da região de corte, então a maior parte dos modos se propagam no núcleo da fibra. Portanto, as propriedades inerentes do revestimento da fibra, como material da casca, diâmetro da casca, tem efeito limitado sobre os modos de propagação nas fibras multimodo índice degrau.

As fibras multimodo índice degrau têm o diâmetro do núcleo grande comparada as fibras monomodo, essa característica proporciona também uma abertura numérica elevada. O núcleo e NA grandes facilitam o acoplamento da luz proveniente de LEDs na fibra. As dimensões do núcleo e a abertura numérica facilitam o acoplamento modal da luz proveniente de uma fonte como o LED, que com uma largura espectral considerada grande, em torno de 25 nm a 100 nm, dificultam sua utilização com fibras monomodo que tem núcleo reduzido. Os tamanhos dos núcleos das fibras multimodo normalmente são de 50  $\mu\text{m}$  ou 100  $\mu\text{m}$ . Apesar de poder trafegar muitos modos a fibra multimodo índice degrau têm capacidade limitada de banda, devido à dispersão, principalmente a dispersão modal. Quando se está projetando um enlace óptico deve-se considerar todos esses fatores para uma aplicação adequada das fibras multimodo.

### **3.2 Fluxo de potência em fibras índice degrau**

A energia eletromagnética de um modo guiado flui parcialmente para o núcleo e parcialmente para a casca, devido a existência do campo evanescente. Quanto mais distante o modo estiver de sua condição de corte,  $V < 2,405$ , mais energia está concentrada no núcleo da fibra. Quanto mais próximo da condição de corte, mais o campo elétrico evanescente penetra na casca, ocasionando mais energia sendo transportada pela casca.

Os modos parcialmente confinados no núcleo da fibra óptica caracterizam-se por irradiarem continuamente potência fora do núcleo e sofrem atenuação à medida que se propagam. A irradiação dos modos parcialmente confinados resulta do equivalente óptico do fenômeno de mecânica quântica conhecido como efeito túnel [14]. Os modos parcialmente acoplados podem carregar quantidades significativas de potência luminosa em fibras ópticas de curto comprimento. A maior parte desses modos desaparece após alguns centímetros de fibra. Entretanto, alguns modos, com perdas baixas, podem alcançar elevadas distâncias, da ordem de até alguns quilômetros. Então, a existência de modos parcialmente confinados tem implicações práticas em medidas de fibras ópticas, particularmente na determinação da abertura numérica e das perdas por propagação.

As condições de contorno, oriundas da equação de Maxwell, impostas por uma fibra óptica inclui além do número finito de modos guiados um número infinito de modos não guiados pelo núcleo da fibra e que irradiam potência para fora. Esses modos irradiados correspondem aos raios que estão fora do cone de aceitação da fibra óptica e são refratados para a casca. A casca de uma fibra óptica prática tem espessura finita e é envolta por um material de proteção ou suporte físico, alguns dos modos irradiados podem ser guiados pela casca.

A existência desses modos irradiados pela casca da fibra óptica podem ocasionar erros de medidas em fibra ópticas em razão do fenômeno de acoplamento de modos; porque os modos guiados pela casca podem ser acoplados a modos guiados pelo núcleo a partir de pequenas descontinuidades, nas emendas ocorre esse efeito pois nesse ponto a luz tem uma descontinuidade de seu percurso, embora as conexões mecânicas e as emendas por fusão nas fibras de sílica são feitas de modo que não se crie essas descontinuidades, por mais perfeitas que sejam as emendas mecânicas e por fusão contribuem para o acoplamento entre os modos guiados pela casca e pelo núcleo, devido a micro-imperfeições geradas, o que ocasiona a redução da banda passante efetiva.

As fibras ópticas podem ter suas características alteradas das previstas teoricamente do modelo de um guia de onda dielétrico perfeito (cilíndrico, núcleo homogêneo etc.). Na prática, as imperfeições existem no guia de onda prático, traduzidas em termos de desvios de geometria básica (eixo curvo, variações no diâmetro etc.) e de imperfeições na composição do núcleo e da casca (não homogeneidade etc.), podem alterar as características de propagação da fibra óptica. As consequências dessas imperfeições em fibras ópticas práticas, que podem ser causadas na fabricação ou no simples manuseio operacional da fibra, é o de acoplar energia de um modo de propagação em outro, de acordo com o do tipo de perturbação.

Em fibras multimodo, sempre há ocorrências de acoplamento de modos que resulta na transferência de potência óptica de um modo para os modos adjacentes, à medida que a luz se propaga ao longo da fibra óptica. O acoplamento modal tem implicações importantes na determinação das características de transmissão das fibras ópticas, por exemplo, os modos irradiados guiados pela casca, podem se acoplar aos modos de ordem superior guiados pelo núcleo (inclusive os modos parcialmente confinados), isso ocorre porque o campo elétrico evanescente de um modo guiado pelo núcleo influencia os modos guiados pela casca.

### 3.3 Modelagem do acoplamento modal pela equação do fluxo de potência

As perdas por acoplamento modal e diferenças de atraso entre os modos de uma fibra multimodo, influenciam suas características de transmissão de forma complexa. A aproximação dos modos para um modelo modal contínuo leva a uma descrição compreensiva dessas interações, relacionando-se o modo de distribuição de energia com a saída de campo distante e calculando-se essas distribuições em função do comprimento da fibra e da entrada. Pode-se obter medições das distribuições de campo distante em vários comprimentos de uma fibra multimodo de baixa perda. Uma comparação entre a teoria e a experiência produz uma estimativa quantitativa do acoplamento de modos envolvidos. Pode-se associar esta quantidade de acoplamento às irregularidades aleatórias da fibra e sua simetria cilíndrica, e assim constroem-se um modelo quantitativo de tais irregularidades.

### 3.4 Transição para um modelo modal contínuo

Para um grande número de modos, as características dos modos sofrem muito pouca mudança entre os modos vizinhos de maneira que seus valores discretos podem ser substituídos por uma variável contínua. Conforme definido na equação 03, pode-se considerar que a *interface* núcleo casca de uma fibra possui uma diferença muito pequena, então o ângulo crítico de reflexão interna total pode ser definido de acordo com a seguinte aproximação, conforme a equação 16:

$$\theta_c = \sqrt{1 - \left(\frac{n_c}{n}\right)^2} \approx \sqrt{2\Delta} \quad (16)$$

Na fibra multimodo, a distribuição de campo do  $m$ -ésimo modo é essencialmente senoidal com o número de onda transversal dado pela equação 17:

$$u = \frac{\pi m}{2a} \quad (17)$$

Onde:

$u$  número de onda transversal

$2a$  diâmetro da fibra.

$m$  iésimo modo

Se  $k=2\pi/\lambda$  é o número de onda do espaço livre, então podemos relacionar as duas equações, resultando na equação 18:

$$\theta = \frac{u}{nk} \cdot \frac{\frac{\pi m}{2a}}{n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}} = \frac{m\lambda}{4an} \quad (18)$$

Aplicando a lei de Snell, a expressão passa a ser a seguir, equação 19:

$$\theta_{saída} = \frac{u}{nk} = \frac{m\lambda}{4a} \quad (19)$$

Analisando-se o feixe óptico fora da fibra, no campo distante, as ondas planas se concentram nas direções do ângulo  $\theta_{saída}$ , e a abertura da fibra determina a concentração angular dos feixes dos dois campos distante. Se o diâmetro do núcleo da fibra é  $2a$ , então a largura do feixe é  $\frac{\lambda}{a}$ ,

De acordo com a equação 18, verificou-se que a diferença entre os ângulos adjacentes dos modos propagantes é dada pela equação 20:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{4an} \quad (20)$$

A transição para um modelo modal contínuo modal usa um ângulo  $\theta$  contínuo em vez dos valores discretos, desta forma, chega-se a uma onda plana contínua que é representado por um único modo. A distribuição de potência, neste modelo contínuo é obtida através da substituição de  $\theta_{saída}$  por  $\theta$  na média da distribuição de potência do campo distante.

A equação diferencial definida por Gloge, considera que o acoplamento modal ocorre apenas entre os modos adjacentes, essa afirmação já foi comprovada empiricamente[2], observando-se que a aproximação gera um erro desprezível. Enquanto o mecanismo de acoplamento é um processo estatístico, pode-se ignorar os campos de modo individual e obter a distribuição de potência diretamente de alguma forma de equações de taxa de potência. Esta

equação do fluxo de potência definida por Gloge [1], considera a variação  $\Delta P_m$  na potência  $P_m$  do  $m$ -ésimo modo ao longo de um incremento  $dz$  na fibra. No caso variante no tempo, a derivada  $\Delta P_m$  tem dois casos distintos:

- 1 - Dissipação e perdas, espalhamento, para o exterior, que incluem, um termo  $-\alpha_m P_m dz$ .
- 2 - O acoplamento para outros modos. Nosso modelo simplificado assume-se o acoplamento entre modos de vizinhos apenas, segundo a teoria de Gloge, Assim, se  $d_m$  é o coeficiente de acoplamento entre os modos de ordem  $m+1$  e  $m$ , então tem-se que (equação 21):

$$\frac{\Delta P_m}{dz} = -\alpha_m P_m + d_m(P_{m+1} - P_m) + d_{m-1}(P_{m-1} - P_m) \quad (21)$$

A transição para o modelo contínuo requer que as diferenças de potência sejam substituídas por diferenciais, assim defini-se (equação 22):

$$\frac{P_{m+1} - P_m}{\theta_{m+1} - \theta_m} = \frac{\Delta P_m}{d\theta} \quad (22)$$

Definindo-se  $\Delta\theta$  na equação 23:

$$\theta_m - \theta_{m-1} = \Delta\theta \quad (23)$$

Teremos então a equação 24:

$$\frac{\Delta P_m}{dz} = -\alpha_m P_m + \Delta\theta \left( d_m \frac{\Delta P_m}{d\theta} - d_{m-1} \frac{\Delta P_{m-1}}{d\theta} \right) \quad (24)$$

a diferença restante requer uma transição análoga de acordo com a equação 25:

$$d_m \frac{\Delta P_m}{d\theta} - d_{m-1} \frac{\Delta P_{m-1}}{d\theta} = \Delta\theta \frac{d}{d\theta} \left( d_m \frac{\Delta P_m}{d\theta} \right) \quad (25)$$

Depois de substituir o índice  $m$  em toda a equação 25 por uma dependência funcional de  $\theta$  finalmente obtemos a equação de fluxo de potência, equação 26:

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -\alpha(\theta)P + (\Delta\theta)^2 \frac{\partial}{\partial\theta} \left[ d(\theta) \frac{\partial P}{\partial\theta} \right] \quad (26)$$

Por causa da simetria envolvida, podemos expandir  $\alpha$  na forma como na equação 27:

$$\alpha(\theta) = \alpha_0 + A\theta^2 + \dots, \quad (27)$$

onde  $A$  compreende a perda comum a todos os modos. Essa perda também pode ser calculada multiplicando-se a solução final por  $e^{-\alpha_0 \cdot Z}$ . Ignora-se as perdas entre as ordens superiores. O termo  $A\theta^2$  é o mais importante, porque ele compreende a perda causada na *interface* núcleo-casca, ela assume essa forma porque a densidade de potência na *interface* aumenta quadraticamente com o número de onda  $u$  transversal de um modo e, portanto quadraticamente com  $\theta$ . O coeficiente de acoplamento exige a mesma expansão, seu termo de ordem zero é:

$$d(\theta) = d_0$$

Assim tem-se ,equação 28:

$$D = (\Delta\theta)^2 d_0 = \left( \frac{\lambda}{4an} \right)^2 d_0 \quad (28)$$

Então podemos reescrever a equação de fluxo de potência de acordo com a equação 29:

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = -A\theta^2 P + \frac{D}{\theta} \frac{\partial}{\partial\theta} \left( \theta \frac{\partial P}{\partial\theta} \right) \quad (29)$$

### 3.5 Equação do fluxo de potência de Gloge

A equação 29 define o fluxo de potência óptica, essa equação desenvolvida por Gloge pode informar a condição de distribuição de potência em um determinado ponto  $z$  ao longo do eixo da fibra, porém se fazer uma análise contínua, precisa-se aplicar uma solução numérica para a equação. Aplicando-se o método das diferenças finitas explícitas chega-se a uma solução para análise numérica ao longo do eixo da fibra.

#### 3.5.1 O método das diferenças finitas explícitas

Aplicando-se uma indexação para o eixo da potência e outro para o eixo dos ângulos na fibra, adotando-se o eixo X para os ângulos de injeção e o eixo Y para o nível de potência óptica, indexamos com  $i$  o eixo X e com  $j$  o eixo Y, para uma análise bidimensional[15] como na figura 22

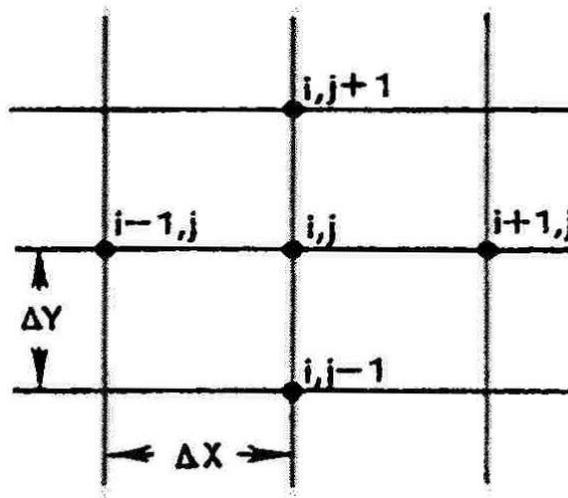


Figura 22- Malha bidimensional

Então pode-se definir os valores dos índices para se executar as sucessivas repetições para cada passo em função do nível de potência e comprimento percorrido pela luz na fibra, O método de diferenças finitas é uma das várias técnicas para o cálculo de diferenciações de uma função discreta, ou seja, um conjunto discreto de valores da variável dependente em pontos conhecidos da variável independente. O cálculo do declive não é mais do que o cálculo discreto de  $dy/dx$  num dado ponto  $x_0$  do seu valor, a derivada  $dy/dx = (y_1 - y_0) / (x_1 - x_0)$  corresponde a uma fórmula de diferenças finitas para o cálculo da primeira derivada. Após aplicar-se o método de diferenças explícitas a equação de Gloge, obtem-se a solução numérica da equação 30.

$$P_{i,j+1} = \left( \frac{\Delta z D}{\Delta \theta^2} - \frac{\Delta z D}{2\theta_{i,j}\Delta\theta} \right) P_{i-1,j} + \left( 1 - \frac{2\Delta z D}{\Delta \theta^2} \right) P_{i,j} + \left( \frac{\Delta z D}{2\theta_{i,j}\Delta\theta} + \frac{\Delta z D}{\Delta \theta^2} \right) P_{i+1,j} \quad (30)$$

Onde:

$P(\theta, Z)$  -Distribuição angular de potência

$Z$  -Distância da extremidade de entrada da fibra

$\theta$  -Ângulo de propagação em relação ao eixo central

$D$  - Coeficiente de acoplamento normalizado constante

$\alpha(\theta)$  -Atenuação modal

A atenuação modal é assumida constante entre:

$$0 \leq \theta < \theta_c$$

Onde:

$\theta$  - é o ângulo de injeção do feixe óptico;

$\theta_c$  - é o ângulo crítico de injeção do feixe óptico;

Todas as características de propagação dos modos guiados das fibras índice degrau podem ser descritas em função de seu ângulo de propagação, relacionados com a constante de propagação  $\beta$ ,

através da equação 31:

$$\beta = k_1 \cos\theta, \quad (31)$$

onde  $k_1$ , defini-se na equação 32:

$$k_1 = 2\pi [(n_1)/\lambda] \quad (32)$$

sendo:

$k_1$  Número da onda da constante de propagação

$\lambda$  comprimento de onda no vácuo,

$n_1$  índice de refração do núcleo

O ângulo máximo de injeção do feixe óptico incidente na fibra é determinado pela equação 33:

$$k_2 = k_1 \cos \theta_c = (n_2)/(n_1) \quad (33)$$

onde:

$n_1$  e  $n_2$  são respectivamente os índices de refração do núcleo e da casca

$\theta_c$ , ângulo máximo permitido para que haja reflexão total

Na solução numérica, desprezou-se a atenuação modal  $\alpha(\theta)$ , pois como já verificado experimentalmente em outros trabalhos [10] [2], a atenuação modal permanece constante na região dos modos guiados, então a equação 29 se reduz a:

$$\frac{\partial P(\theta, Z)}{\partial z} = \frac{D}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\theta (\partial P(\theta, Z)) / \partial \theta) \quad (34)$$

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Simulações numéricas

Nesse capítulo analisou-se alguns resultados de simulações realizados com a solução numérica proposta, esses resultados foram comparados com alguns trabalhos já citados. [1][2][3][4][5][6][7][8].

A primeira simulação foi realizada para se verificar a diferença na distribuição angular de potência ao longo das fibras.

Aplicando-se a solução numérica baseada na equação de Gloge, submetida ao método das diferenças finitas explícitas, realizou-se as simulações:

$$P_{i,j+1} = \left( \frac{\Delta z D}{\Delta \theta^2} - \frac{\Delta z D}{2\theta_{i,j}\Delta\theta} \right) P_{i-1j} + \left( 1 - \frac{2\Delta z D}{\Delta \theta^2} \right) P_{i,j} + \left( \frac{\Delta z D}{2\theta_{i,j}\Delta\theta} + \frac{\Delta z D}{\Delta \theta^2} \right) P_{i+1j}$$

Os índices  $i$  e  $j$ , são referentes à discretização de  $\Delta z$  e  $\Delta\theta$ , no caso utilizou-se 400 pontos em  $\Delta\theta$  com passo de  $0,05^\circ$  e em  $\Delta z$  10000 pontos com passo de  $0,0001\text{m}$ . Nessa equação analisa-se o nível de potência óptica em função do ângulo de injeção do feixe óptico e também do comprimento da fibra em questão. O coeficiente de acoplamento normalizado é definido de acordo com a equação 35:

$$D(\theta) = C(\theta) \cdot \delta\theta^2 \quad (35)$$

onde:

$D$  coeficiente de acoplamento normalizado

$C(\theta)$  coeficiente de acoplamento;

$\delta\theta$  é a separação angular entre modos adjacentes que é definida na equação 36:

$$\delta\theta = \lambda/4a n_1 \quad (36)$$

onde:

$\lambda$  é o comprimento de onda do feixe óptico incidente na fibra,

$a$  é o raio do núcleo da fibra,

$n_1$  é o índice de refração do núcleo

O estudo do acoplamento modal em fibras MM leva a analisar diversas variáveis envolvidas. Sabe-se através da equação do fluxo de potência proposta por Gloge [1], que o ângulo de injeção de um feixe óptico em uma fibra influencia diretamente a distribuição angular de potência. É também conhecido que o comportamento do sinal óptico até o alcance da estabilização de modos é totalmente dependente desse ângulo. A proposta de uma solução numérica apresentada nesse trabalho, possibilita a investigação do comportamento modal em fibras com diferentes características, com isso tem-se a possibilidade de analisar previamente o comportamento de um sinal óptico e também de se definir previamente a introdução de componentes como amplificadores, misturadores de modos, regeneradores, em um enlace óptico, pode-se ainda analisar-se o comportamento das fontes de luz na distribuição angular de potência ao longo da fibra. Com isso torna-se interessante a possibilidade de se analisar o comportamento modal em fibras multimodo, especialmente em POFs, pois abre-se a possibilidade de desenvolvimento de enlaces ópticos de bom desempenho e baixo custo.

#### 4.2 Análise da obtenção do EMD

Os modos propagantes numa fibra atingem um equilíbrio de modos após percorrerem certo comprimento da fibra, as perturbações em uma fibra influenciam no alcance do equilíbrio de distribuição de modos, essas perturbações causam difração da luz ocasionando a transferência de potência entre modos. Utilizando a solução numérica proposta analisou-se a diferença na obtenção do EMD para fibras índice degrau, de plástico e de sílica. Na simulação desprezou-se o fator atenuação para a análise do fluxo de potência. O coeficiente de acoplamento ( $D$ ) está ligado diretamente ao acoplamento modal da fibra, que representa a transferência de potência óptica de modos de baixa ordem para modos de ordem superior causados por fatores como: impurezas da fibra, micro-curvaturas, diferença de excentricidade ao longo da fibra. Estudos [6] mostraram que em fibras plásticas (POF), o comprimento de acoplamento é alcançado com poucos metros, em torno de 15 a 35 m, isto se deve ao grande número de perturbações em uma fibra plástica. Em fibras de sílica, o comprimento de acoplamento é alcançado entre 4300 m e 8100 m [6]; Verifica-se que o EMD, ocorre em uma distância bem menor nas fibras plásticas, isto se deve a fator atenuação, pois como essas fibras possuem mais impurezas, o que acarreta maior atenuação, também leva ao alcance do EMD mais rapidamente. As impurezas das fibras plásticas causam refração da luz no núcleo da fibra, já as fibras de sílica tem atenuação muito menor que as fibras plásticas, o que leva a

uma obtenção de EMD mais tardia. A equação 37 representa a solução analítica da equação 34, e pode ser utilizada para testar a solução numérica utilizada, a partir da equação de Gloge, considerando um comprimento da fibra em que as condições de injeção do feixe inicial não influenciam na distribuição de potência.

$$P(\theta, z) = j_0 \left( 2.405 \frac{\theta}{\theta_c} \right) e^{(-\gamma_0 z)} \quad (37)$$

onde:

$j_0$  função de Bessel do 1<sup>a</sup> tipo

e  $\gamma_0 [\text{m}^{-1}] = 2.405^2 D / \theta_c^2$  - Coeficiente de atenuação.

Em sistemas reais a distorção de pulso aumenta com menor velocidade após certa distância em relação ao início da fibra por causa do acoplamento modal e perda de modo diferencial. No início da fibra o acoplamento de energia de um modo para outro surge em função das imperfeições estruturais, ao alcançarmos o LC, inicia-se então o processo de estabilização dos modos até alcançar-se o SSD. Isto indica o completo acoplamento modal e também a independência do ângulo de injeção da luz na fibra. Para fins de comparação utiliza-se valores de uma POF reportada no artigo [4], com um sinal óptico de entrada gaussiano, figura 23, com as seguintes características:

diâmetro = 1 mm

índices de refração da casca e do núcleo da fibra,  $n_1 = 1.492$  e  $n_2 = 1.402$ ,

abertura numérica,  $Na = 0.51$ ,

ângulo crítico de injeção do feixe óptico,  $\theta_c = 20^\circ$

coeficiente normalizado de acoplamento  $D = 5.62 \times 10^{-4} \text{ rad/m}^2$

Foram utilizados os seguintes comprimentos de fibra, 1 m, 5 m, 10 m, 30 m e 50 m.

Na entrada da POF, tem-se uma distribuição gaussiana do de potência em torno do ângulo de injeção, dado pela equação 38:

$$P(\theta, 0) = e \left[ -\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (38)$$

onde:

$P(\theta, 0)$  Representa o feixe óptico de injeção com distribuição gaussiana (figura 23), com ângulo  $\Theta$  e a 0 metro (entrada da fibra),

$\Theta$  - Representa o ângulo de 0 a 20°, ou seja, a faixa do ângulo de aceitação, isto quer dizer que a faixa vai do ângulo inicial até o ângulo crítico  $\Theta_c$ .

$\Theta_0$  - Representa o ângulo de incidência do feixe óptico,

$\sigma$  - Desvio padrão.

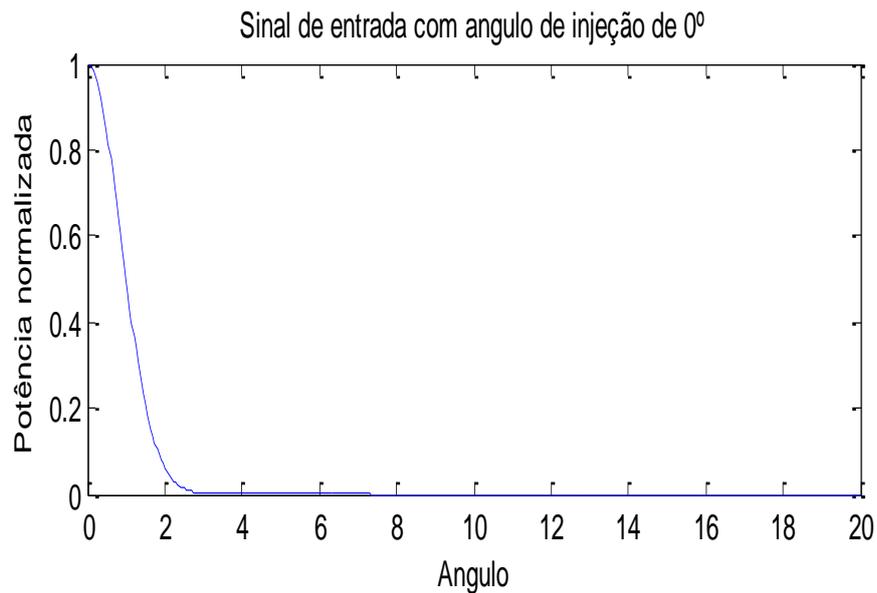


Fig. 23. – Sinal de entrada da fibra

Aplicando-se a solução numérica da equação do fluxo de potência, simulamos numericamente, o comportamento da distribuição de potência angular em diferentes distâncias (1, 5, 10, 30 e 50 m), e com ângulo de injeção de 0°, (figura 24).

No início da fibra a 1m, temos um pulso óptico parecido com o injetado inicialmente, percebe-se que com o aumento da distância percorrida a distribuição de potência deixa de se concentrar apenas no ângulo de injeção, em 50 m, observa-se que a distribuição angular de potência tem uma distribuição definida, nesse ponto da fibra já ocorreu o EMD.

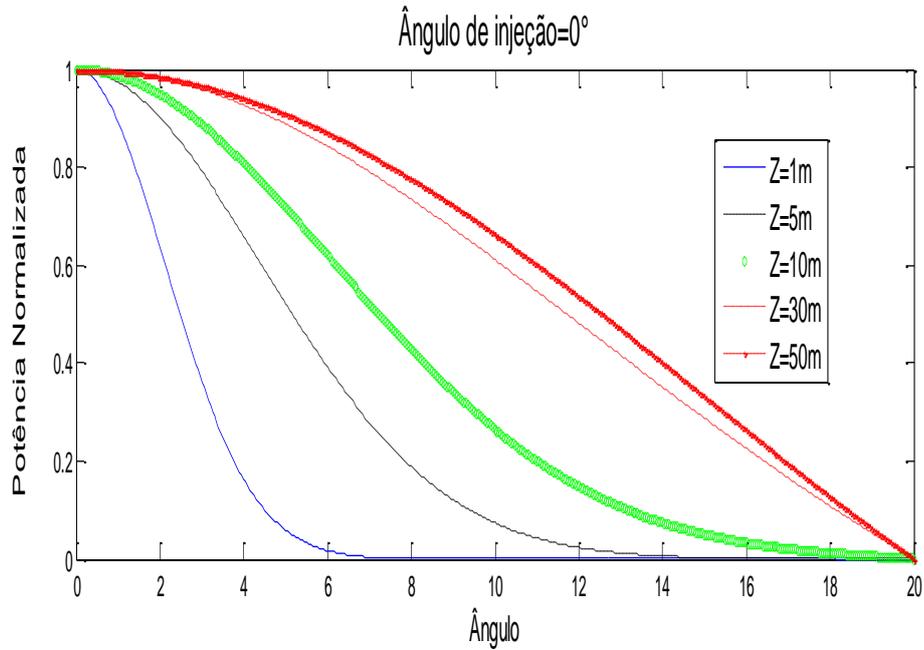


Fig. 24. - Distribuição angular de potência angular em  $0^\circ$ , a 1,5,10,30 e 50 m

Analisando-se a injeção do feixe óptico inicial com diferentes ângulos na figura 25, em um mesmo comprimento da fibra verificou-se a diferença na distribuição angular de potência em função do ângulo de injeção inicial. Após o estabelecimento do EMD observa-se claramente nas simulações realizadas que o ângulo de injeção do feixe óptico não mais influencia na distribuição angular de potência. O acoplamento modal é afetado diretamente pela AN de lançamento, porém, após o estabelecimento do equilíbrio modal a atenuação e a dispersão não dependem mais das condições de lançamento, assumindo então valores bem definidos.

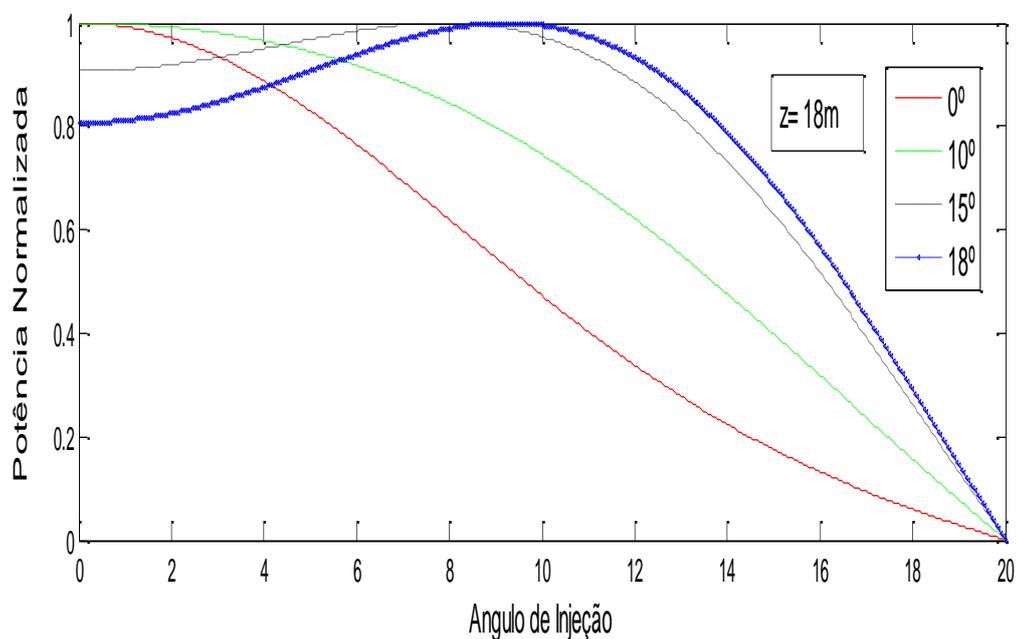


Fig. 25. - Distribuição angular de potência em 18m de POF com, ângulos de injeção e  $0^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  e  $18^\circ$ .

A distribuição angular de potência nos modos de alta ordem pode ser otimizada pelo ajuste da largura espectral da fonte de luz, ou ainda através de recursos aplicados à fibra que causam perturbações mecânicas cujo objetivo é antecipar (reduzir a  $L_c$ ) o equilíbrio modal. Um destes recursos é o misturador de modos (*mode mixer* ou *mode scrambler*) que é um dispositivo que provoca a antecipação do acoplamento dos modos em uma fibra óptica, isto é feito adicionando-se um comprimento extra de fibra no enlace, sujeitando o mesmo a uma perturbação mecânica induzida, enrolando-se essa parte adicional da fibra criando macro curvaturas que geram, perturbações no sinal óptico. Normalmente o *modescrambler* é inserido no início do enlace óptico, entrada da fibra, mas nada impede que seja aplicado na saída da fibra, em alguns casos. Na figura 26 temos a foto de um *modescrambler*.



Figura 26- Modescrambler

Outro recurso é o supressor de modos da casca (*cladding-mode stripper*); Esse dispositivo minimiza a potência dos modos que se propagam pela casca da fibra. Esses dispositivos na maioria das vezes consiste de material com índice de refração maior que o da casca da fibra. Em boa parte das fibras, a capa de proteção exerce essa função. Outro recurso é o filtro de modos que consiste na atenuação seletiva dos modos propagantes na *interface* núcleo-casca ou próximo dela (modos de ordem superior e modos de fuga) no núcleo da fibra óptica. A maioria destes filtros funciona através do enrolamento da fibra multimodo em volta de um cilindro, ou fazendo-se voltas na própria fibra de forma livre. Em geral recomenda-se aplicar estes filtros no lançamento óptico do enlace, mas também podem ser aplicados no fim do enlace.

Analisando-se o gráfico da figura 27, verificou-se o comportamento de um feixe gaussiano injetado com ângulo de  $0^\circ$  com distâncias de 20 m, 25 m, 30 m, 35 m e 40 m e observou que entre 20 m e 40 m, houve um ganho de potência óptica otimizada após 35 m, de onde concluiu-se que o EMD ocorreu entre 35 m e 40 m. Observou-se também que o comportamento da distribuição angular de potência para o ângulo de injeção de  $0^\circ$ , variou pouco com a distância, de onde concluiu-se que a transferência de potência entre os modos de baixa ordem e de alta ordem, ocorreu com menos intensidade com ângulos de injeção do feixe óptico menores. Aumentando-se o ângulo de injeção verificou-se que existe uma alteração maior da distribuição angular de potência, ou seja ocorre a transferência de potência entre modos de baixa ordem para modos de alta ordem com maior intensidade [17].

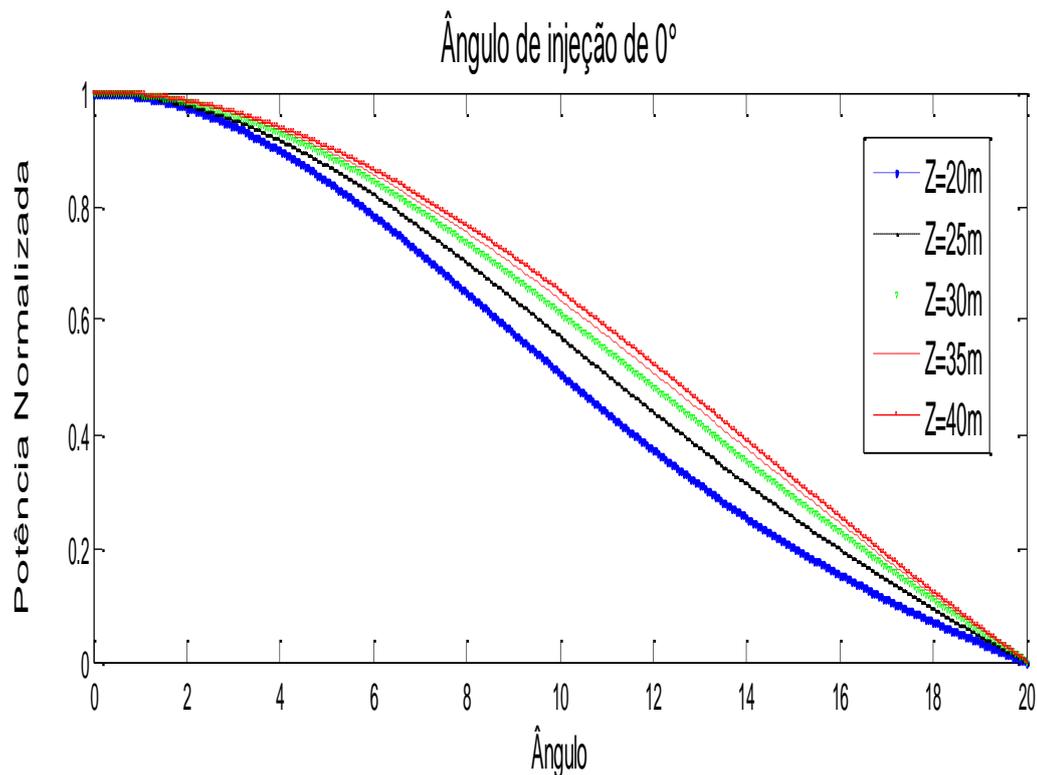


Fig. 27. – Distribuição angular de potência em 20, 25,30 e 40m em uma fibra plástica.

No gráfico da figura 28, utilizando-se os mesmos valores de distâncias da fibra do gráfico da figura 27, analisou-se agora com um ângulo de injeção de  $15^\circ$ .

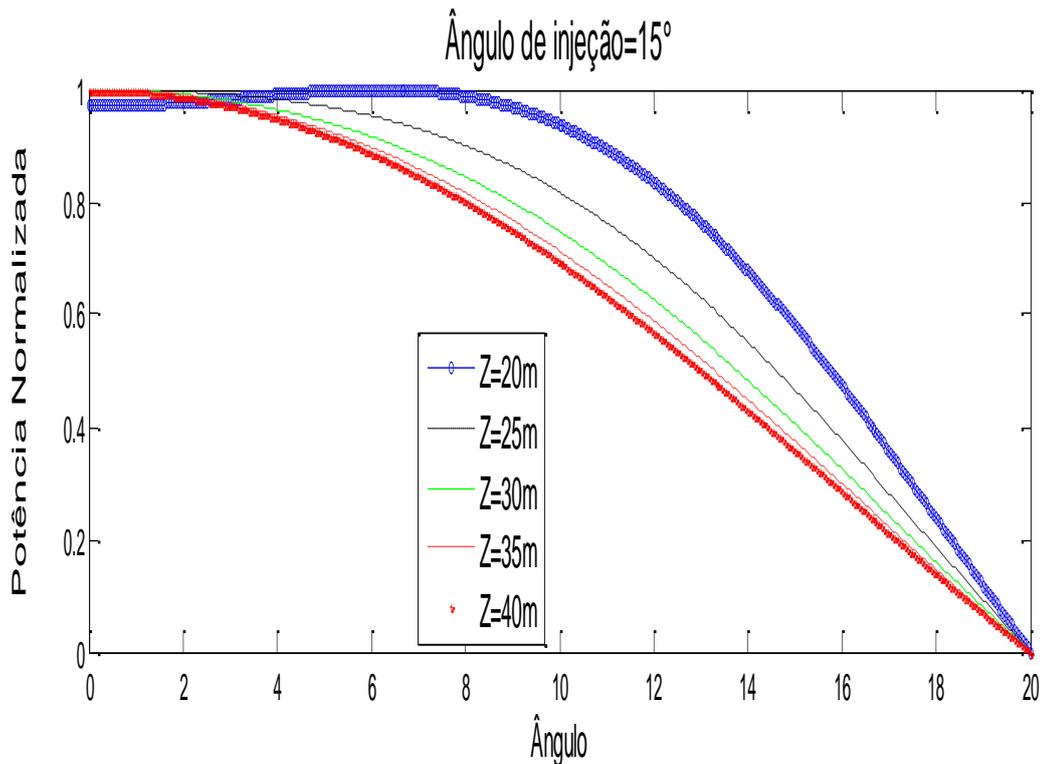


Fig. 28. – Distribuição angular de potência em 20, 25,30 e 40 m em uma fibra plástica com ângulo de injeção do feixe óptico inicial de 15°.

Observa-se com a mudança do ângulo de injeção que a distribuição angular de potência se altera ligeiramente; em 20 m a inclinação maior da curva é devido a esse ponto ser o mais distante do comprimento de alcance do EMD.

Nas fibras de sílica, o alcance do EMD ocorre em distâncias próximas as 4 km como relatado no trabalho [6], para análise utilizou-se as características da fibra de sílica descrita nesse trabalho.

Dados para análise:

ângulo crítico,  $\theta_M = 9,9^\circ$ ;

desvio padrão do feixe de injeção,  $\sigma\theta = 4,1^\circ$ ;

Desvio padrão do comprimento da fibra,  $\sigma z = 7^\circ$ ;

comprimento da fibra,  $z = 8500 \text{ m}$ ;

coeficiente de acoplamento,  $D = 5,77 \times 10^{-7} \text{ rad/m}^2$

Na figura 29 tem-se a distribuição angular de potência para diferentes ângulos para a fibra em questão aos 500 m de comprimento da fibra.

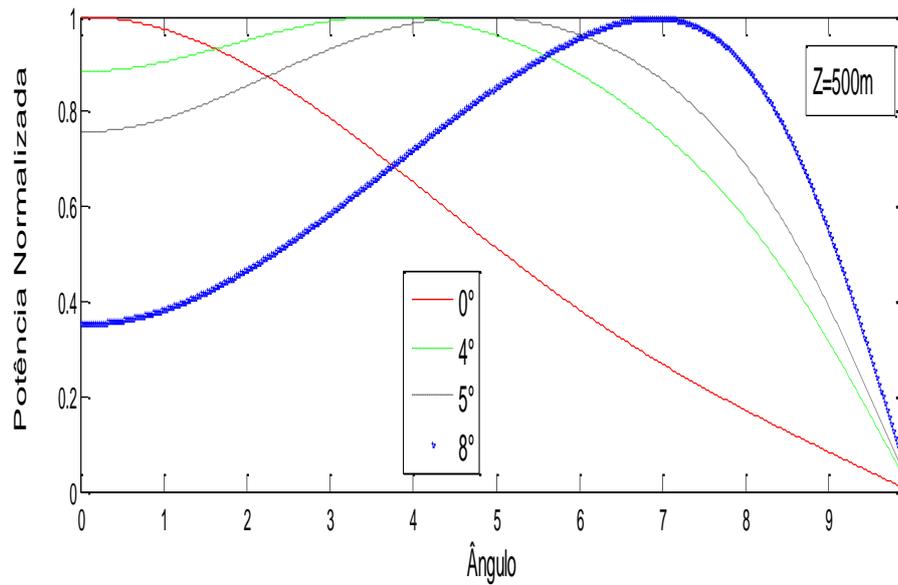


Fig. 29. – Distribuição angular de potência em  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$  e  $8^\circ$  em uma fibra de sílica a 500m de comprimento.

Observa-se nas fibras de sílica a mudança na distribuição de potência com a mudança do ângulo de injeção; com o aumento da distância da fibra os modos tendem ao equilíbrio modal, conforme a figura 30.

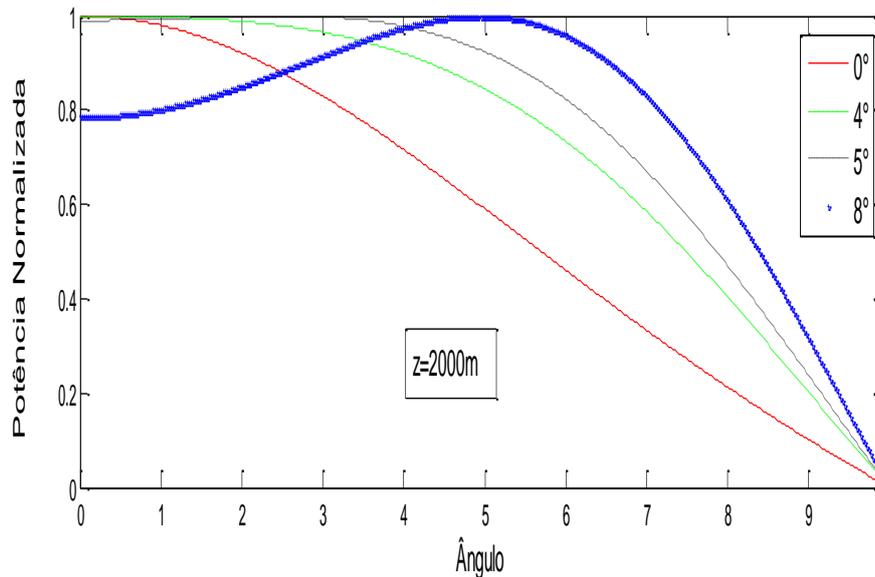


Fig. 30. – Distribuição angular de potência em  $0^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $5^\circ$  e  $8^\circ$  em uma fibra de sílica a 2000m de comprimento.

Na figura 30 observa-se que no ângulo de injeção de  $8^\circ$ , ocorre perceptíveis mudanças na distribuição angular de potência. As alterações na distribuição angular de potência ocorrem até o alcance do EMD, na figura 31 começa-se a observar uma linearização entre as curvas.

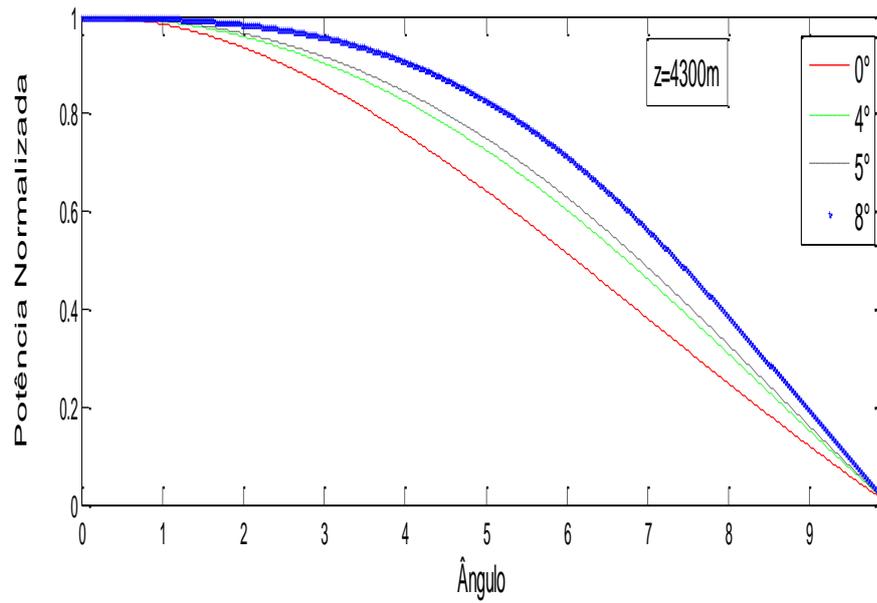


Fig. 31. – Distribuição angular de potência em 0°, 4°, 5° e 8° em uma fibra de sílica a 4300 m de comprimento.

A 4300 m é perceptível que o processo de estabilização dos modos em andamento; na figura 32 tem-se o EMD já concluído em 8100 m de comprimento da fibra.

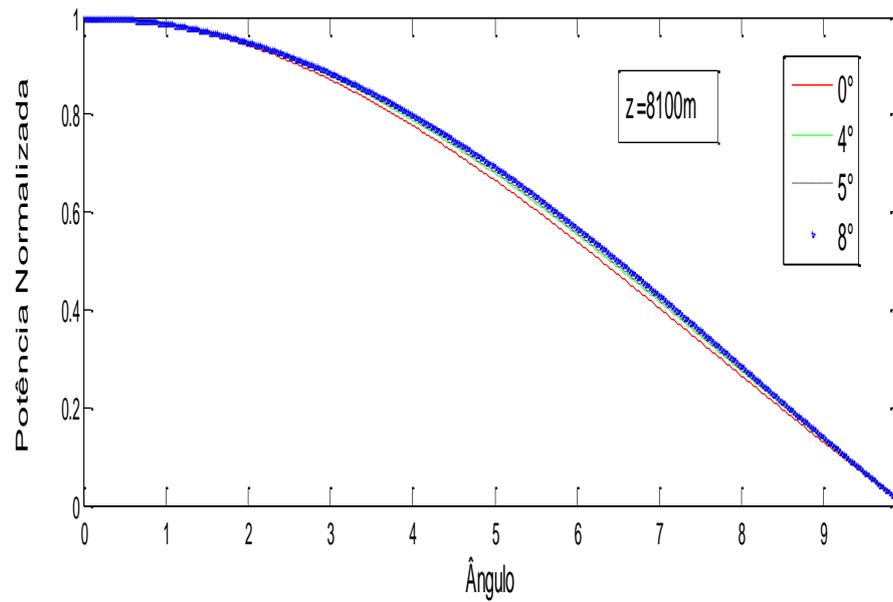


Fig. 32. – Distribuição angular de potência em 0°, 4°, 5° e 8° em uma fibra de sílica a 8100m de comprimento.

## 5 CONCLUSÕES

Com a solução numérica adotada, explorou-se o comportamento do acoplamento modal em fibras multimodo, essa análise permite a verificação de diferentes comportamentos em função dos dados de lançamento da luz na fibra, permitindo-se verificar as melhores condições para a injeção de luz na entrada da fibra. A determinação das condições ideais para o lançamento da luz na fibra é importante para projetos de enlaces ópticos utilizando fibras multimodo.

Verificou-se que o acoplamento modal em fibras multimodo sofre grande influência das condições de injeção do feixe óptico, no caso particular das fibras de plástico essa influência tem sido alvo de diversos estudos com o objetivo de se utilizar LEDs como fonte de luz em detrimento aos LASERs que têm custo mais elevado. A combinação da fibra de plástico com o LED, traz a possibilidade de se realizar projetos eficientes e de baixo custo. Nas fibras de sílica, constatou-se que o acoplamento modal ocorre com distância muito superior às fibras de plástico, por volta de 4000 m, enquanto nas fibras plásticas ocorre por volta de 30 m, essa diferença é atribuída às impurezas das fibras de plástico, que levam a uma estabilização dos modos mais rápida, devido à turbulência causada. O coeficiente de acoplamento  $D$  é um fator determinante para o comportamento da distribuição de potência óptica ao longo dos ângulos de propagação dos modos na fibra, ele expressa a taxa de acoplamentos entre os modos vizinhos em função do comprimento de onda, índice de refração e diâmetro do núcleo da fibra.

Atualmente fibras multimodo ocupam uma parcela muito pequena de fibras instaladas em enlace acima de 500 m, existe a possibilidade de se aumentar essa parcela com projetos baseados nos estudos que utilizam fontes de luz e fibras de fácil manipulação e baixo custo, como os LEDs e POFs.

### 5.1 Acoplamento modal em fibras multimodo

A análise do acoplamento modal em fibras multimodo índice degrau de sílica e de plástico, traz uma contribuição às pesquisas já realizadas, apresentando uma solução numérica simples e eficiente, de fato as fibras monomodo apresentam uma superioridade em relação ao produto  $B \times L$ , porém em função do custo elevado das fibras e componentes relacionados, é desejável se empregar as fibras multimodo. Esse estudo contribui ainda para a utilização das fibras multimodo índice degrau utilizando POFs e LEDs, tecnologia ainda muito pouco explorada no país. O método numérico empregado apresentou resultados que foram comparados a outros trabalhos, mostrando eficiência e simplicidade. As análises para as

fontes de luz com diferentes larguras espectrais, é viável utilizando-se o método numérico proposto. Atualmente as fibras multimodo são utilizadas em enlaces considerados curtos, (<1km), onde o problema da dispersão modal não chega a ser um impeditivo. Estudos sobre acoplamento modal tem contribuído para o aumento significativo dos enlaces utilizando fibras multimodo, a tendência é que essa evolução persista em função do ponto de vista econômico. As fibras plásticas também tem despertado interesse na comunidade acadêmica e também no mercado, cabeamentos de pequena distância utilizando as POF, já são uma realidade, em alguns países as POFs ocupam uma boa parte do enlaces de última milha, a opção pelas POFs se dá não apenas pelo menor custo, como também pela facilidade de conectorização e manuseio. Em contrapartida as POFs apresentam o problema da alta atenuação, problema esse que tem fomentado o estudo do acoplamento modal, com o interesse de se otimizar a relação banda passante, distância. A análise do acoplamento modal em fibras multimodo também tem grande importância para o desenvolvimento de dispositivos de conexão.

## **5.2 Manipulação dos parâmetros de lançamento da luz**

O lançamento da luz na fibra é um dos pontos mais importantes a se analisar para se ter uma largura de banda satisfatória com elementos de baixo custo. Por esse motivo as simulações com soluções numéricas propostas são tão importante nesse desenvolvimento.

O domínio dos princípios envolvidas no acoplamento de modos em fibras multimodo é a ferramenta inicial para se explorar essa tecnologia.

Na solução numérica analisou-se principalmente o comportamento da distribuição angular de potência nas fibras; esse comportamento é regido pelas variáveis envolvidas na equação do fluxo de potência de Gloge. Na manipulação dos parâmetros observou-se a importância do fator de acoplamento modal  $D$ , que é definido pelas características dos materiais que compõem a fibra.

## **5.3 Proposta para continuidade e desenvolvimento do tema**

Como sugestão de continuidade para esse estudo propõe-se associar os conceitos aqui expostos sobre acoplamento modal de fibras plásticas multimodo índice degrau com o conceito de filtragem espectral, já abordado anteriormente pelos pesquisadores do LACOP, onde se gerou uma solução numérica para o problema da filtragem espectral, pode-se unir as duas soluções numéricas e se realizar simulações comparando-se com medições práticas afim de se comprovar a eficiência da união das duas soluções numéricas, individualmente as duas se mostram consistentes. Considerado a questão da filtragem espectral para fontes de luz com

largura espectral considerável, como por exemplo, os LEDs, é uma boa questão a se explorar com as fibras plásticas, que utilizam os LEDs como fonte de luz na maioria das vezes.

Um segundo passo seria considerar também a dispersão material que tem uma participação na atenuação final da fibra. Com isso teremos um modelo matemático mais robusto para atenuação em POFs.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GLOGE, D. Optical Power Flow in multimode fibers- **The Bell System Technical Journal**, vol. 51 No. 8 -1972
- [2] ROUSSEAU Michel, and JEUNHOMME, Luc Numerical Solutions of the Coupled-Power Equation in Step-Index Optical Fibers – **IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE AND TECHNIQUES**, VOL. MTT-25, No. 7, July 1977
- [3] DJORDJEVICH, Alexandar. Investigation of Mode Coupling in Step Index Plastic Optical Fibers Using the Power Flow Equation – **IEEE -2000, Microwave theory and techniques** , vol. mtt-25, No 7, July 1977
- [4] GE, Wenping, YIN Zongmin, LI, Zhonghui, ZHOU, Zhengli. Research on mode coupling in plastic optical fiber – **Optical fiber and Planar Waveguide Technology II, Editors proceedings of SPIE Vol. 4904 -2002**
- [5] GARITO, A.F et al. Effects of random perturbation in Plastic Optical fibers - **science**, vol. 281. Pp.962-967, 1998.
- [6] SAVOVIC, Svetilav and DJORDJEVICH, Alexandar. Calculation of the coupling coefficient in step index glass optical fibers- **APPLIED OPTICS**/vol. 48, No 22/ 1 August 2009.
- [7] MATEO, Javier, LOSADA, Angeles and GARCES, Ignacio. Global Characterization of optical power propagation in step-index plastic optical fibers – **Vol.14, No.20/OPTICS EXPRESS 9028 –OSA 2006**
- [8] JDSU. Certificação de redes ópticas de 10GbE -70 –**RTI –DEZ. 2008**
- [9] SAVOVIC, Svetilav and DJORDJEVICH, Alexandar. Numerical Solution of the power flow equation in step-index plastic optical fibers – **OSA, August 2004, vol.21 No 8**
- [10] EVE, M., Ray theory and random mode coupling in a optical fiber waveguide, I. - **Optical and Quantum Electronics** – (1976)503-508
- [11] JEUNHOMME, Luc, .Angular dependence of the mode coupling coefficient in a multimode optical fiber. **Electronics Letters**, vol. -1 1, ~p. 425=426, Sept. 1975.
- [12] KRAUSER, Wernem Daum, Jurgen, E, Peter Zazow and ZIEMANN Olaf. Polymer. **Optical Fibers for Data Communication** .Springer, <http://springer.de>
- [13] KEISER, Gerd. Optical Fiber Communications – **McGraw Hill International Editions- Electrical Engineers Series**
- [14] PROJECTO FARADAY. O Microscópio de Efeito Túnel (STM), disponível em: <http://faraday.fc.up.pt/Faraday/Recursos/webfisica/stm.html/view> \_acessado em 02/08/2011

- [15] AMES, W.F. (1977), Numerical Methods for partial Differential Equation, **2nd ed., New York, Academic Press**
- [16] IRUJO, Tony. Optical fiber in premises applications – **OFS FURUKAWA COMPANY – 2006**
- [17] KECK, DB .Spatial and temporal power transfer measurements on a low-loss optical waveguide, **Appl. Opt., vol. 13, pp. 1882-1888, Aug. 1974.**
- [18] GAMBLING, W.A., OAYNE, D.N and MATSUMURA. Mode conversion coefficients in optical fibers –**APPLIED OPTICS/Vol.14, No.7/July 1975**
- [19] JEUNHOMME, Luc, FRAISE, M. and POCHOLLE, P. Propagation model for long Step-index Optical fibers –**APPLIED OPTICS/Vol.15, No. 12/ December 1976**
- [20] PEITSCHER, D, SCHULTE, G, MUHLEN, H.. Correct Definition and Reproducible Measurements of Spectral Attenuation for Step Index Polymer Optical Fibers. **Optische Polymerfarsen ITG-FG 5.4.1**
- [21] BREYER, F., HANIK, N., RANDEL, S., SPINNLER, B., Investigation on Electronic Equalization for Step-Index Polymer Optical Fiber System – **Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, 2006 –Eindhoven**

**ANEXOS**

## ANEXO A – CÓDIGO EM MATLAB PARA ANÁLISE DA DISPERSÃO MODAL

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Grafico de um pulso gaussiano em uma fibra linear e dispersiva
% Cláudio Márcio de Freitas da Silva
% Universidade Federal Fluminense
% Mestrado em Telecomunicações

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear;
pico = 1E-12;

% definições

T0 = 1 * pico;
B2 = -20 * pico;
LD = T0 ^2 / abs (B2);

%Abaixo a distribuição temporal de cada pulso, em z=0, z=2*LD e z=4*LD
%' gerada. Observe que seria mais elegante criar uma sub-rotina que
%receberia o parâmetro 'z' e daria como resultado U (z, T).
%Para o código ficar mais claro, simplesmente repeti o código 3 vezes.

z = 0;

i=0;
For a = -5: .01 : 5 % pode-se aumentar ou diminuir a precisão mexendo-se no
valor 0.01, que e' o passo.
i = i + 1;          % índice para as variáveis
T0(i) = 1 * pico;
T(i) = a * 1 * pico; % para obtermos a relação T/T0
U(i) = ( T0(i) / ( T0(i) ^ 2 - j * B2 * z ) ^ .5 ) * exp ( -T(i)^2 / ( 2 *
(T0(i)^2 - j * B2 * z ) ) );
end

i = length (T);          % assim, se mexermos no passo o plot e' ajustado de
acordo com o numero de pontos
n = 1:i;
plot (n,real(U(n)).^2 + imag(U(n)).^2,'k:');

hold on                  % desse modo os graficos serao impressos juntos,
sobrepostos

% aqui termina um gráfico, logo abaixo começa o outro

z = 2 * LD;

i=0;
for a = -5 : .01 : 5
i = i + 1;
T0(i) = 1 * pico;
T(i) = a * 1 * pico;
U(i) = ( T0(i) / ( T0(i) ^ 2 - j * B2 * z ) ^ .5 ) * exp ( -T(i)^2 / ( 2 *
(T0(i)^2 - j * B2 * z ) ) );
end

i = length (T);
n = 1:i;
plot (n,real(U(n)).^2 + imag(U(n)).^2,'r');

```

```
% terceiro grafico

z = 4 * LD

i=0;
for a = -5 : .01 : 5
i = i + 1;
T0(i) = 1 * pico;
T(i) = a * 1 * pico;
U(i) = ( T0(i) / ( T0(i) ^ 2 - j * B2 * z) ^ .5 ) * exp ( -T(i)^2 / (2 *
(T0(i)^2 - j * B2 * z) ) );
end

i = length (T);
n = 1:i;
plot (n,real(U(n)).^2 + imag(U(n)).^2,'g');

hold off
```

## ANEXO B – CÓDIGO EM MATLAB PARA ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓPTICA PELA EQUAÇÃO DE GLOGE

```

%***Esse código mostra a utilização do método de diferenças finitas
%explícitas para a solução de predição do comportamento de um sinal óptico
%em uma fibra multimodo
clear all;
clc
disp('Reconhecendo variáveis')

%*****
% Variáveis*****
zIni=0;
zFim=50;
%npontos=500000;%
%npontos=10000*zfinal
%npontosteta=400;
deltaz=0.0001;
%z=(zIni:deltaz:zFim);
tetaini=0;
tetaC=20;
deltaTeta=0.05;
teta=(tetaini:deltaTeta:tetaC);

desvio=0.85;
format long;
pic=3.1415926535897932384626433832795;
k=(pic/180);
D=(5.62*(10^(-4)))/(k^2);

%*****
%*** Angulo de Injeção do feixe óptico e comprimento da POF*****
teta0(1)=input('Angulo de injeção do feixe Óptico teta0= ');
metros=input('Comprimento da POF Comp.= ');
%*****

comp=10000*metros;
disp('iniciando cálculos')

% inicial de injeção do sinal óptico

for i=1:length(teta),
    p1(i)=exp(-(teta(i)-teta0)^2/(2*desvio^2));
end

p1(400)=0; % condição de contorno final
p1(1)=p1(2);% condição de contorno inicial

plot (teta,p1);

for j=1:comp; %% 10000 pontos por metro

%***Loop para calcular a equação de Flow Power*****

    for i=2:length(teta)-1, % Estou calculando i até 399 porque em
i=400 atinjo o Teta Crítico=20°, onde a potencia é zero.
p2(i) = p1(i-1)*(((deltaz*D)/deltaTeta^2) -
((deltaz*D)/(2*teta(i)*deltaTeta))) + ...

```

```

                                                    p1(i)*(1-
((2*deltaz*D)/deltaTeta^2)) + ...
p1(i+1)*(((deltaz*D)/(2*teta(i)*deltaTeta))+((deltaz*D)/deltaTeta^2));
    end

    p2(1) = p2(2);      %para deixar o valor no primeiro nivel igual ao
segundo
    p2(length(teta))=0;
    p1=p2;

end

disp ('Cálculos finalizados_1')

%save 15mpontos_15g20m p2 -ascii -tabs
%save 1m5g p2 -ascii -tabs

figure

plot (teta,p2/max(p2));

hold on;

axis ([0 25 0 1]);

```

## ANEXO C – CÓDIGO EM MATLAB PARA ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA ÓPTICA PELA EQUAÇÃO DE GLOGE COM 4 ÂNGULOS INCIDENTES

```

%*****
%***Esse código mostra a utilização do método de diferenças finitas
%explícitas para a solução de predição do comportamento de um sinal óptico
%em uma fibra multimodo com 4 ângulos de injeção distintos
%*****
%*****

clear all;
clc
disp('Reconhecendo variáveis')

%*****
% Variáveis*****
zIni=0;
zFim=50;

deltaz=0.0001;
tetaini=0;
tetaC=20;
deltaTeta=0.05;
teta=(tetaini:deltaTeta:tetaC);

desvio=0.85;
format long;
pic=3.1415926535897932384626433832795;
k=(pic/180);
D=(5.62*(10^(-4)))/(k^2);

%*****
%*** Angulo de Injeção do feixe óptico e comprimento da POF*****
%teta0=0;
%metros=50;

teta0a=input('Angulo de injeção do feixe Optico teta0a= ');
teta0b=input('Angulo de injeção do feixe Optico teta0b= ');
teta0c=input('Angulo de injeção do feixe Optico teta0c= ');
teta0d=input('Angulo de injeção do feixe Optico teta0d= ');

metros=input('Comprimento da POF Comp.= ');
%*****
comp=10000*metros;

disp('iniciando cálculos')

% inicial de injeção do sinal óptico

for i=1:length(teta),
    pla(i)=exp(-(teta(i)-teta0a)^2/(2*desvio^2));
end
pla(400)=0; % condição de contorno final
pla(1)=pla(2);% condição de contorno inicial

```

```

figure
plot (teta,pla, 'b-');
axis ([0 25 0 1]);

hold on;

for i=1:length(teta),
    plb(i)=exp(-(teta(i)-teta0b)^2/(2*desvio^2));
end
plb(400)=0; % condição de contorno final
plb(1)=plb(2);% condição de contorno inicial

plot (teta,p1b, 'k--');

hold on;

for i=1:length(teta),
    plc(i)=exp(-(teta(i)-teta0c)^2/(2*desvio^2));
end
plc(400)=0; % condição de contorno final
plc(1)=plc(2);% condição de contorno inicial

plot (teta,p1c, 'k:');

hold on;

for i=1:length(teta),
    pld(i)=exp(-(teta(i)-teta0d)^2/(2*desvio^2));
end
pld(400)=0; % condição de contorno final
pld(1)=pld(2);% condição de contorno inicial

plot (teta,p1d, 'b-.');

hold off;

    for j=1:comp; %% 10000 pontos por metro

%***Loop para calcular a equação de Flow Power*****

        for i=2:length(teta)-1, % Estou calculando i até 399 porque em
i=400 atinjo o Teta Crítico=20°, onde a potencia é zero.

                p2(i) = pla(i-
1)*(((deltaz*D)/deltaTeta^2) - ((deltaz*D)/(2*teta(i)*deltaTeta))) + ...
                pla(i)*(1-
((2*deltaz*D)/deltaTeta^2)) + ...
pla(i+1)*(((deltaz*D)/(2*teta(i)*deltaTeta))+((deltaz*D)/deltaTeta^2));
            end
            p2(1) = p2(2); %para deixar o valor no primeiro nivel igual ao
segundo

            p2(length(teta))=0;

```

```

        pla=p2;
    end

disp ('Cálculo finalizados_1')

disp ('Plotando Gráfico,aguarde!')

%save 15mpontos_15g20m p2 -ascii -tabs
%save 1m5g p2 -ascii -tabs

figure

plot (teta,p2/max(p2),'r-');
axis ([0 25 0 1]);
hold on;
disp ('Plotando Gráfico')

    for j=1:comp;

        for i=2:length(teta)-1, % Estou calculando i até 399
            porque em i=400 atinjo o Teta Crítico=20°, onde a potencia é zero.

                p2(i) = plb(i-
1)*(((deltaz*D)/deltaTeta^2) - ((deltaz*D)/(2*teta(i)*deltaTeta))) + ...
                plb(i)*(1-
((2*deltaz*D)/deltaTeta^2)) + ...
plb(i+1)*(((deltaz*D)/(2*teta(i)*deltaTeta))+((deltaz*D)/deltaTeta^2));

            end

        p2(1) = p2(2);          %para deixar o valor no primeiro nivel igual ao
segundo

        p2(length(teta))=0;

        plb=p2;

    end

plot (teta,p2/max(p2), 'g--');
axis ([0 25 0 1]);
hold on;
%disp ('terceiro gráfico')

```