

**UFRRJ**

**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**CONFECÇÃO DE KIT DIDÁTICO COM FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA E CABO  
COAXIAL PARA AQUISIÇÃO DE PARÂMETROS ÓPTICOS**

**WANESSA AFONSO DE ANDRADE**

2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**

**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**CONFECÇÃO DE KIT DIDÁTICO COM FIBRA ÓPTICA PLÁSTICA E CABO  
COAXIAL PARA AQUISIÇÃO DE PARÂMETROS ÓPTICOS**

**WANESSA AFONSO DE ANDRADE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de Física  
da Universidade Federal Rural do Rio de  
Janeiro para obtenção do título de  
Licenciado(a) em Física.

Orientadora: Greice Kelly Bezerra da Costa

Coorientador: Marcelo de Azevedo Neves

Seropédica, RJ

Julho de 2019

WANESSA AFONSO DE ANDRADE

**Confecção de Kit didático com fibra óptica plástica e cabo coaxial para aquisição de parâmetros ópticos**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Licenciada em Física pelo Departamento de Física da UFRRJ. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

---

**Profa. Dra. Greice Kelly Bezerra da Costa** (Orientadora)

Departamento de Física – UFRRJ

---

**Prof. Dr. Marcelo Azevedo Neves** (Coorientador)

Departamento de Física - UFRRJ

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho**

Departamento de Física – PUC-RIO

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Sandra da Silva Pedro**

Instituto de Física Armando Dias Tavares – UERJ

---

**Prof. MSc. Francisco Antônio Lopes Laudares**

Departamento de Física – UFRRJ

Rio de Janeiro, 09 de julho de 2019.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho a todos os alunos de Licenciatura em Física da UFRRJ que se sentiram desmotivados em algum momento do curso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Eliane, por todo o apoio nessa caminhada.

Agradeço aos já falecidos Tio-Avô Roque e Vó Penha por serem meus guias mesmo não mais nesse plano.

Agradeço ao Grupo PET-Física em todas as suas versões de tutores e petianos que me acolheu, me fez enxergar além das fronteiras do ensino formal e me deu oportunidade de expor o que produzimos para além das paredes da Universidade.

Agradeço a oportunidade de ter participado do PIBIC.

Agradeço a oportunidade de ter participado da Residência Pedagógica.

Agradeço aos membros do 'Moradia da Treta' em todas as suas versões (e aos agregados também).

Agradeço a Cia Experimental Surto de Teatro.

Agradeço ao Corpo Técnico Coreográfico da UFRRJ e a Cia de Dança da UFRRJ por serem o melhor refúgio possível dentro da Universidade.

Agradeço aos membros da Gestão 2018/2019 do Diretório Acadêmico, que aceitaram fazer parte desse enorme desafio que é representar os alunos perante a Universidade.

Agradeço aos organizadores de festas da rural e aos organizadores das antigas festas na CAUR por promoverem os meus poucos momentos de atividade física semanal.

Agradeço a Zoe, por ser a melhor vira-lata do mundo e me amar mesmo quando nem eu acredito em mim.

Agradeço ao HURB e as pessoas que me ajudaram divulgando e doando na vaquinha, para que eu apresentasse esse trabalho em São Tomé e Príncipe.

Agradeço ao Lucas Camaz e a família dele por me receberem de braços abertos e fazerem os melhores cafés possíveis.

Agradeço aos Técnicos dos Laboratórios por toda a colaboração.

Agradeço ao Francisco Laudares, que intermediou a conversa com a Prof<sup>a</sup> Greice sobre essa monografia.

Agradeço à minha orientadora, Greice, em quem me inspiro muito e que sempre me apoiou e deu todo o suporte possível e impossível para que isso se realizasse.

## RESUMO

A utilização de experimentos para o ensino de Física resulta em uma forma eficaz na obtenção de uma aprendizagem significativa, possibilitando o uso de diversas abordagens na técnica de ensino-aprendizagem em todas as áreas. É uma prática fundamental e pode ser considerada como a própria construção do conhecimento científico (SOUSA, 2010). O laboratório didático é utilizado também no ensino à distância (EaD) (VELOSO e NETO, 2014). Nesse sentido, é possível que os laboratórios semipresenciais ou presenciais de outras instituições também utilizem esse kit.

Neste trabalho mostra-se o ensino direcionado para a área da óptica e fotônica na graduação, através de experimentos confeccionados com cabo coaxial e fibra óptica para aquisições quantitativa e qualitativa dos seguintes parâmetros ópticos em guias de onda: modos de propagação da luz, abertura numérica, velocidade de fase e defasagem. Desta forma, apresentam-se dois experimentos, sendo o primeiro composto por luz laser He-Ne com alinhamento em espaço livre focalizada na entrada da fibra óptica plástica CK40 da ESKA com 15 cm de comprimento, 1mm de diâmetro e um anteparo localizado na saída de luz da fibra, possibilitando a visualização dos modos de propagação da luz e abertura numérica da fibra, assim como o cálculo destes com erros inferiores a 5% em relação aos valores tabelados. O segundo é formado por gerador de função, cabo coaxial RG58XX e osciloscópio, permitindo a visualização da defasagem e atenuação de uma onda senoidal guiada por um cabo coaxial com impedância de 50 Ohms e 16 m de comprimento em relação a onda guiada no cabo com 0,25 m de comprimento. Originalmente mostra-se que a velocidade de fase se mantêm constante e igual a 0,76 e com defasagem variando linearmente de  $(117,8 - 5,1)$  graus no intervalo de frequência analisada  $(4,5 - 14,0)$  MHz, ambos em acordo com os valores teoricamente esperados, resultando em uma estabilidade na transmissão de sinais nesta faixa de operação e grande instabilidade em baixas frequências.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	01
<b>2. GUIAS DE ONDA</b> .....	03
<b>2.1. Fibras Ópticas</b> .....	04
2.1.1. Óptica geométrica .....	07
2.1.2. Óptica Ondulatória: Teoria Eletromagnética.....	08
<b>2.2. Cabos Coaxiais</b> .....	12
2.2.1. Impedância .....	14
<b>3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS</b> .....	18
<b>3.1. Abertura Numérica (AN)</b> .....	18
<b>3.2. Fator de velocidade e Defasagem Experimental</b> .....	19
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	21
<b>4.1 Medidas de AN e obtenção dos modos de propagação na POF</b> .....	21
<b>4.2 Medidas casamento de impedância</b> .....	22
<b>4.3 Medidas de Fator de velocidade</b> .....	23
<b>4.4 Medidas de Defasagem</b> .....	25
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	28
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	30
<b>ANEXO A: As equações de Fresnel</b> .....	33
<b>ANEXO B</b>	
<b>Certificado de apresentação do trabalho na 3ª Conferência de Física de Países de Língua Portuguesa em São Tomé e Príncipe, no período de 30/05/2019 – 01/06/2019</b> .....	36
<b>Certificado de aceite e Resumo estendido submetido a 71ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência no período de 21/07/2019 a 27/07/2019 na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) – Campo Grande, MS</b> .....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura -1: Fibra Óptica plástica (POF) e Fibra Óptica de vidro (GOF). Fonte: A autora, adaptado de [1,3].....	5
Figura -2: Modos de propagação na fibra em função da frequência normalizada e diferença relativa do índice núcleo-casca. Fonte: A autora, adaptado de [22].....	8
Figura -3: Princípio da Reflexão Interna Total em fibras ópticas. Fonte: A autora, adaptado de [23].....	9
Figura -4: Princípio da Reflexão interna total da luz em fibras ópticas com a onda transmitida e campo evanescente. Fonte: A autora.....	14
Figura -5: Reflexão interna total da luz em fibras ópticas com o campo evanescente entre a casca e o núcleo da fibra. Fonte: A autora. ....	14
Figura -6: Defasagem de 160 ns entre duas ondas senoidais com frequência de 0.5MHz. Fonte: A autora. ....	15
Figura -7: Sinal elétrico incidente, resultando em uma diferença de potencial no cabo coaxial defasado em $90^0$ em relação a corrente e um dos planos transversos do campo elétrico e magnético. Fonte: A autora, adaptado de [17]. ....	17
Figura -8:(a) Cabo coaxial composto pela capa, blindagem, dielétrico e condutor central, (b) imagem do cabo RG58XX. Fonte: A autora.....	19
Figura -9:Esquema experimental para obtenção da abertura numérica. Fonte: A autora. ....	21
Figura -10: Relação trigonométrica para abertura numérica. Fonte: A autora.....	22
Figura -11: Esquema experimental para obtenção da Defasagem e Fator de Fase. Fonte: A autora. ....	23
Figura -12: Visualização de dois modos de propagação da luz na POF, (a) $L_{01}$ e (b) $L_{02}$ . Fonte: A autora. ....	24
Figura -13: Visualização da onda incidente e refletida proveniente de um sinal propagando no cabo sem casamento de impedância realizada. Fonte: A autora.....	25
Figura -14: Sinal com casamento de impedância e atenuação observada com o aumento da frequência e extensão do cabo. Fonte: A autora. ....	26
Figura -15: Fator de velocidade em função da frequência. Fonte: A autora. ....	28
Figura -16: Defasagem do sinal em função da frequência. Fonte: A autora. ....	30



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixa espectral da Energia Eletromagnética. ....	16
Tabela 2: Medidas obtidas para o cálculo de Fator de Velocidade .....	27
Tabela 3: Medidas de Defasagem.....	29

## 1- INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é a criação de kit didático para o ensino de óptica na Licenciatura em Física da UFRRJ, dando possibilidade ao licenciando de, através de uma aprendizagem significativa, seja capaz de refletir sobre suas metodologias em sala de aula e seja capaz de relacionar esse conhecimento adquirido no Laboratório de Óptica da UFRRJ com a sala de aula, realizando posteriormente uma experimentação de baixo custo e aprofundando os conceitos já abordados nas matérias de óptica na graduação para que o licenciando seja capaz, através disso, de utilizar essa conceituação sólida no ensino de física. Tendo em vista que várias áreas correlatas possuem como motivação para o ensino as atividades experimentais (SEVERO e RESENDE, 2012), o uso do construtivismo para o ensino de física experimental se mostra altamente promissor.

As fibras ópticas são guias de onda cilíndricas confeccionadas com um material dielétrico, geralmente sílica ou plástico, possuindo uma estrutura básica composta por um revestimento, casca e núcleo, cujo diâmetro do núcleo é relacionado ao número de modos de propagação do sinal na fibra. Uma fibra padrão possui um núcleo com diâmetro variando entre (6-10)  $\mu\text{m}$  e é amplamente utilizada no ramo das telecomunicações e sensoriamento remoto, enquanto fibras com diâmetros superiores são utilizadas em sensoriamentos de curtas distâncias (SMITH, 1995).

As Fibras Ópticas Plásticas (POF) possuem várias vantagens em comparação com as fibras de vidro. A POF possui maior diâmetro, o que facilita fazer conexões e fazer o alinhamento óptico, as conexões são menos onerosas, são mais resistentes à curvaturas (ATEF e ZIMMERMANN, 2013). A fibra escolhida para esse trabalho foi a CK 40 da ESKA, possui índice de refração de 1,49 e 1 mm de núcleo (ESKA, 2010). A escolha da fibra plástica se deu pela maior facilidade em trabalharmos com ela, já que como o diâmetro do núcleo é maior, o alinhamento óptico sem translador é facilitado. A POF é

multimodo, possibilitando assim uma análise mais profunda com a obtenção de alguns parâmetros ópticos, tais como modos de propagação da luz. Fibras com grandes quantidades de modos conferem maior atenuação do sinal em guiamento a longas distâncias (ARUMUGAM, 2001). É importante dizer que um maior valor de abertura numérica nos dá maiores chances de propagação, então quanto maior a abertura numérica, mais fácil a entrada da luz na fibra e maior a quantidade de modos de propagação (OSMAN et. al, 2018).

O estudo de fibras ópticas possui grande relevância e originalidade na área da Física experimental, pois sensores a fibra óptica encontram-se atualmente em destaque por estarem substituindo sensores tradicionais em virtude de suas vantagens intrínsecas, entre as quais podemos citar: custo, peso, confiabilidade, tempo de resposta, precisão, faixa dinâmica, passividade e imunidade eletromagnética (KEISER, 2000), (MISTSCHKE, 2009). Tais características tornam estes sensores de grande interesse e com vasto campo em diversas áreas, tais como: elétrica, petróleo e gás, construção civil, medicina, segurança pública, entre outras (SOARES, 2015). Esta tecnologia foi transferida parcialmente da indústria dos componentes usados nas telecomunicações, e vem demonstrando uma operação versátil em muitos setores, caracterizados pela sensibilidade e pelo baixo custo, promovendo assim aos sensores ópticos uma solução favorável nas aplicações necessárias do mundo atual (FOUROZAN, 2010).

O conceito de transmissão de sinal é abordado na graduação em várias disciplinas, entre elas Eletrônica Básica, Eletricidade e Magnetismo e Óptica. A partir disso, se faz necessário o estudo aprofundado desse conceito para que, além de construir seu próprio conhecimento, o estudante de licenciatura seja capaz de mediar esse conhecimento através de práticas experimentais e inseridas na realidade dos estudantes da Educação Básica (SOUSA, 2010). A transmissão de sinal se dá quando temos um guia de onda, que é um dispositivo capaz de receber e transmitir um sinal eletromagnético, de forma que sejamos capazes de utilizar esse sinal em telecomunicações, rádio, televisão, etc, (FOUROZAN, 2010).

Os cabos coaxiais são guias de onda com estrutura distinta a das fibras ópticas, de forma geral são compostos por um núcleo torcido ou sólido produzidos de um material condutor, geralmente cobre que, por sua vez, são revestidos por um material isolante. O material isolante é envolto por um filme metálico com a função de blindagem contra ruídos, assim como a de completar a ligação do circuito, sendo posteriormente revestido pelo mesmo material isolante utilizado para revestimento do núcleo e finalizado com um invólucro plástico (SILVER, 2011). Os cabos coaxiais foram bastante utilizados em redes de telefonia, TV a cabo e redes de LANs Ethernet, que estão sendo substituídos por fibras ópticas (SMITH, 1995).

Além da utilidade tecnológica dos guias de onda, trata-se de uma boa estrutura para o estudo de óptica na graduação e no ensino médio, pois permite um melhor entendimento sobre a óptica geométrica, através da Lei de Snell aplicado a um guia de onda, abertura numérica e óptica ondulatória, através da teoria eletromagnética para obtenção dos modos de propagação da luz e campo evanescente (AGRAVAL, 2001), (FASSARELA, 2007). A utilização de experimentos para o ensino de física é uma forma eficaz de gerar uma aprendizagem significativa, motivando a produção de kits didáticos, que serão realizados neste trabalho de curso de graduação, para implementar novos métodos de ensino-aprendizagem.

## 2 GUIAS DE ONDA

Guia de onda pode ser entendida como uma estrutura formando um percurso contínuo de um ponto a outro, capaz de conduzir energia eletromagnética ao longo deste percurso. Os guias de onda são amplamente utilizados para aplicações tecnológicas, como por exemplo: fibras ópticas que trazem o sinal da internet; o cabo coaxial que traz o sinal de televisão e etc. Uma estrutura de guia de onda propaga diferentes modos de campo, as componentes do campo elétrico e magnético da onda levam necessariamente a planos transversos a direção de propagação, e a onda é então chamada de eletromagnética transversal (TEM) (SILVER, 2011). No escopo deste trabalho, analisaremos parâmetros ópticos provenientes de experimentos confeccionados com guias de sinais de entrada elétrico AC e eletromagnético - luz.

### 2.1 Fibras Ópticas

As fibras ópticas padrão de telecomunicação são de vidro (GOF - Glass Optical Fiber – Fibra Óptica de Vidro), basicamente formadas por um núcleo de sílica dopado com germânio e índice de refração  $N_1$ , casca de sílica pura com índice de refração  $N_2$  e revestimento, sendo o índice de refração  $N_2$  suavemente menor em relação ao índice de refração do núcleo, diâmetro total de 125  $\mu\text{m}$ . A configuração do índice de refração nestas fibras é denominada degrau, ou seja, a mudança do índice do núcleo para a casca ocorre em forma de degrau (AGRAVAL, 2001). As fibras ópticas plásticas (POF – Plastic Optical Fiber – Fibra Óptica de Plástico) são uma opção para substituir a GOF em comunicação a curtas distâncias, visto que seus componentes são mais baratos e de mais fácil manuseio, as POFs padrão de comunicação a curtas distâncias são basicamente constituídas por um núcleo de Polimetil-metacrilato (índice de refração  $N_1$ ) e casca de Polímero Fluorado (índice  $N_2$ ), com índice degrau (ESKA, 2010). A estrutura esquemática da fibra óptica de plástico e da fibra óptica de vidro é representada na Figura 1.

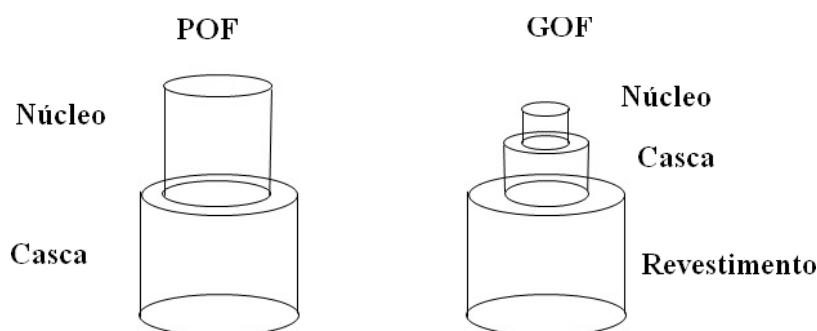


Figura -1: Fibra Óptica plástica (POF) e Fibra Óptica de vidro (GOF). Fonte: A autora, adaptado de [1,3].

Dois parâmetros são utilizados para caracterizar uma fibra óptica, sendo eles a diferença relativa do índice de refração do núcleo-casca ( $\Delta$ ) e a Frequência Normalizada ( $V$ ) (AGRAVAL, 2001), definidos como:

$$\Delta = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad 1$$

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (N_1^2 - N_2^2)^{1/2} \quad 2$$

onde  $N_1$  é o índice de refração do núcleo,  $N_2$  é o índice de refração da casca,  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz e  $a$  é o raio do núcleo da fibra.

De acordo com o diâmetro do núcleo, classifica-se a fibra como monomodo ou multimodo, sendo isso a quantidade de modos possíveis de propagação da luz na fibra. A fibra monomodo só permite um modo de propagação, enquanto a multimodo permite dois ou mais modos de propagação. Fibras de vidro padrão de telecomunicação são referenciadas como monomodos, cujo diâmetro está em torno de  $8,2 \mu\text{m}$  (SMF, 2014), enquanto fibras de vidro multimodos apresentam um núcleo com diâmetro em torno de  $(50-60) \mu\text{m}$ . Fibras monomodos apresentam  $\Delta \leq 0,005$  para  $\lambda$  em torno de  $1,55 \mu\text{m}$ ,  $V \leq 2,405$  e atenuação máxima de  $0.2 \text{ dB/Km}$  (AGRAVAL, 2001). As POFs são fibras multimodais, em forma padrão apresentam diâmetro do núcleo de  $980 \mu\text{m}$  e  $20 \mu\text{m}$  de casca ( $1000 \mu\text{m}$  de diâmetro total) com configuração de índice na forma degrau e perda máxima na transmissão em  $\lambda = 650 \text{ nm}$  de  $200 \text{ dB/Km}$  (ESKA, 2010). O número de

modos de propagação (M) suportados por uma fibra de índice degrau pode ser obtido por (MISTTSCHKE, 2009):

$$M = \frac{V^2}{2} \quad 3$$

A equação de onda completa derivada das equações de Maxwell é dada por (LIAO e KELLEY, 1991):

$$\nabla^2 \vec{E} + K_0^2 \varepsilon \vec{E} = 0$$

Onde  $\vec{E}$  é o vetor campo elétrico,  $K_0$  é o número de onda e  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica.

Utilizando a aproximação escalar, também conhecida como aproximação guia fraco, onde a diferença entre o índice de refração entre o núcleo e a casca é pequeno, temos que a equação de onda em coordenadas cartesianas, pode ser reescrita a partir da equação 4 como equação 5:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} + K_0^2 \varepsilon(r) \Psi = \beta^2 \Psi \quad 5$$

Onde  $\Psi$  é a função onda,  $\varepsilon(r)$  é a dependência da permissividade do meio em função de  $r$ ,  $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$  e  $\beta$  é o autovalor (constante de propagação). A equação 5 pode ser reescrita em coordenadas polares, mostrando a dependência em relação ao raio do núcleo e aos índices de refração do núcleo e casca, equações 6 e 7.

$$\frac{\partial^2 R_{m(r)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R_{m(r)}}{\partial r} - \frac{m^2}{r^2} R_{m(r)} + K_0^2 N_{nuc}^2 R_{m(r)} = \beta^2 R_{m(r)} \quad 6$$

$$\frac{\partial^2 R_{m(r)}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R_{m(r)}}{\partial r} - \frac{m^2}{r^2} R_{m(r)} + K_0^2 N_{casca}^2 R_{m(r)} = \beta^2 R_{m(r)} \quad 7$$

Sendo  $R_{m(r)}$  o perfil do modo radial para a  $m$ -ésima solução, onde cada modo é associado com um autovalor  $\beta$  dependente do comprimento de onda. A solução dessas equações é definida a partir de novos parâmetros,  $\kappa = (K_0^2 N_{núcleo}^2 - \beta^2)^{1/2}$  e  $\sigma = (\beta^2 - K_0^2 - N_{casca}^2)^{1/2}$ :

$$\Psi(r, \phi) = AJ_m(\kappa r) \cos(m\theta) \quad \text{para } r < a \quad 8$$

$$\Psi(r, \phi) = BK_m(\sigma r) \cos(m\theta) \quad \text{para } r > a \quad 9$$

Onde  $J_m$  e  $K_m$  são funções de Bessel,  $\theta$  é o ângulo azimutal e  $a$  é o raio do núcleo. Precisa-se respeitar as seguintes condições de contorno:

$$AJ_m(\kappa a) = BK_m(\sigma a) \quad 10$$

$$AaJ'_m(\kappa a) = B\sigma K'_m(\sigma a) \quad 11$$

Cada modo é então associado a um autovalor  $\beta$  que depende do comprimento de onda.

A partir dele, um índice de refração efetivo  $N_{eff}$  é introduzido, sendo  $N_{eff} = \frac{\beta}{K_0}$ .

Geralmente utiliza-se a notação  $LP_{mn}$  para indicar o modo da luz linearmente polarizada que está sendo guiada em uma fibra óptica (OKAMOTO, 2006). Sendo os 4 primeiros modos caracterizados pela notação  $L_{01}$ ,  $L_{11}$ ,  $L_{21}$  e  $L_{02}$ , figura 2.



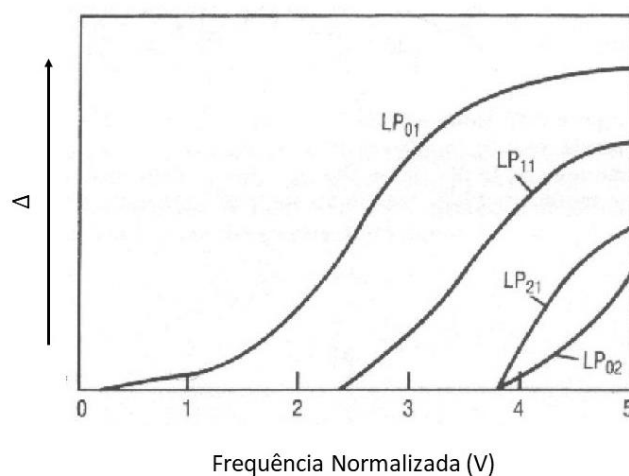


Figura -2: Modos de propagação na fibra em função da frequência normalizada e diferença relativa do índice núcleo-casca. Fonte: A autora, adaptado de [22].

### 2.1.1 Óptica geométrica

Em fibras ópticas, a luz se propaga por conta do princípio da reflexão interna total - que ocorre quando um feixe de luz ao incidir de um meio mais refringente para um meio menos refringente em um certo ângulo com a normal à interface divisora dos meios, resulta somente em luz refletida. Neste caso, parte da luz que resulta no feixe transmitido para o meio menos refringente não existe, pois somente existem ângulos de incidência maiores que o ângulo crítico. O ângulo de incidência crítico é obtido quando a luz que foi transmitida se propaga na interface divisora entre o meio  $N_{\text{núcleo}}$  e  $N_{\text{casca}}$  ( $N_{\text{núcleo}} > N_{\text{casca}}$ ), ou seja, fazendo  $90^\circ$  com a normal, de forma que ângulos de incidência acima deste ângulo crítico resultarão somente em feixes propagando-se sob o princípio da reflexão interna total (HECHT, 2002). A partir da óptica geométrica, pode-se representar a reflexão interna total ocorrendo em fibras ópticas a partir da incidência de um campo eletromagnético no núcleo da fibra, figura 3.

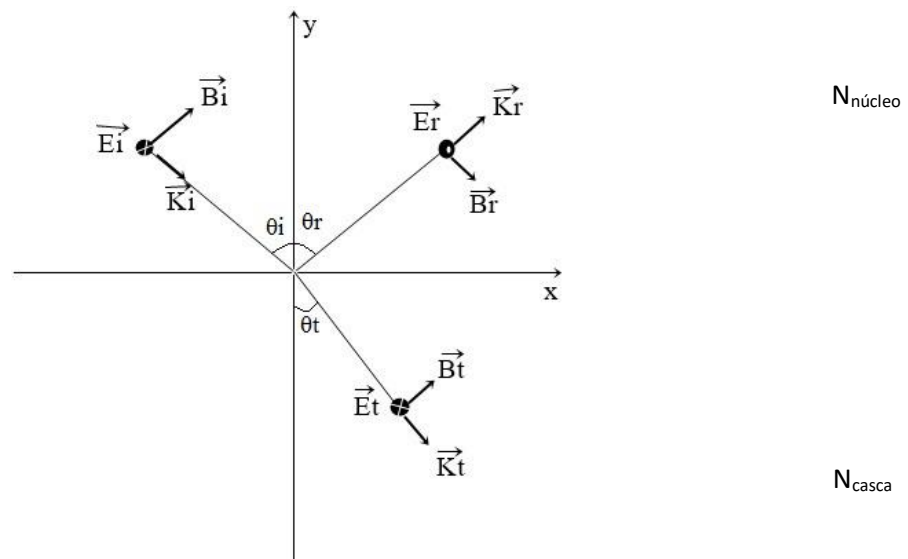


Figura -3: Princípio da Reflexão Interna Total em fibras ópticas. Fonte: A autora, adaptado de [23].

De acordo com a Lei de Snell, equação 8:

$$N_{\text{núcleo}} \text{seno}(\theta_i) = N_{\text{casca}} \text{seno}(\theta_t) \quad 12$$

Em  $\theta_t = 90^\circ$ , resulta o ângulo crítico ( $\theta_c$ ), equação 9, sendo este o maior ângulo de incidência que ainda resulta em raio refratado que propaga ao longo da fronteira (eixo x) entre os dois meios ( $N_{\text{núcleo}}$  e  $N_{\text{casca}}$ ) na Figura 3.

$$\theta_c = \text{arcseno} \left( \frac{N_{\text{casca}}}{N_{\text{núcleo}}} \right) \quad 13$$

Para que resulte em Reflexão Interna Total dentro da fibra, deve-se ter  $\theta_i > \theta_c$ .

### 2.1.2 Óptica ondulatória: Teoria eletromagnética

As ondas incidente, refletida e refratada (transmitida) são representadas pelas equações [23]:

$$\begin{aligned}
\vec{E}_i &= \vec{E}_{0i} e^{j(\vec{K}_i \vec{R} - \omega_i t)} \\
\vec{E}_t &= \vec{E}_{0t} e^{j(\vec{K}_t \vec{R} - \omega_t t)} \\
\vec{E}_r &= \vec{E}_{0r} e^{j(\vec{K}_r \vec{R} - \omega_r t)}
\end{aligned}
\tag{14}$$

Onde  $i, t$  e  $r$  se referem à onda incidente, transmitida e refletida.  $E_0$  é a amplitude,  $K$  é o número de onda (dado por  $K=2\pi/\lambda$ ) e  $w$  é a frequência angular (dada por  $w = 2\pi F$ ).

Os três vetores que representam a luz propagando-se em forma de onda devem obedecer às seguintes condições de contorno em qualquer ponto da interface núcleo-casca [23]. Sendo eles:

#### 1) Continuidade

Todas as ondas devem existir simultaneamente, resultando:

$$\hat{n} \times \vec{E}_i + \hat{n} \times \vec{E}_r = \hat{n} \times \vec{E}_t \tag{15}$$

$$\hat{n} \times \vec{E}_{0i} e^{j(\vec{K}_i \vec{R} - \omega_i t)} + \hat{n} \times \vec{E}_{0r} e^{j(\vec{K}_r \vec{R} - \omega_r t)} = \hat{n} \times \vec{E}_{0t} e^{j(\vec{K}_t \vec{R} - \omega_t t)} \tag{16}$$

Considerando as amplitudes constantes, somente teremos a identidade acima se existir uma igualdade das fases na interface (núcleo-casca) em todo tempo  $t$ , resultando:

$$\vec{K}_i \vec{R} - \omega_i t = \vec{K}_r \vec{R} - \omega_r t = \vec{K}_t \vec{R} - \omega_t t \tag{17}$$

✓ A frequência é a mesma, considerando  $\vec{R} = 0$ , temos:

$$\omega_i t = \omega_r t = \omega_t t \tag{18}$$

$$w_i = w_r = w_t \quad 19$$

✓ A fase na interface é constante, considerando  $t = 0$ , temos:

$$\vec{K}_i \vec{R} = \vec{K}_r \vec{R} = \vec{K}_t \vec{R} \quad 20$$

2) Os três vetores devem relacionar-se por meio das equações de Fresnel.

Da teoria de campo Eletromagnético de Maxwell, têm-se as seguintes condições de contorno na interface para o campo Elétrico Transversal (TE) e Magnético Transversal (TM) ao plano de incidência, figura 3.

✓ Caso TE (Campo elétrico perpendicular ao plano)

$$\vec{E}_{0i} + \vec{E}_{0r} = \vec{E}_{0t} \quad 21$$

$$-\vec{B}_i + \vec{B}_r = -\vec{B}_t \quad 22$$

$$-B_{0i} \cos(\theta_i) + B_{0r} \cos(\theta_r) = -B_{0t} \cos(\theta_t) \quad 23$$

✓ Caso TM (Campo elétrico paralelo ao plano)

$$\vec{E}_{0i} + \vec{E}_{0r} = \vec{E}_{0t} \quad 24$$

$$\vec{B}_i - \vec{B}_r = \vec{B}_t \quad 25$$

$$B_{0i} \cos(\theta_i) - B_{0r} \cos(\theta_r) = B_{0t} \cos(\theta_t) \quad 26$$

Resultando nos coeficientes de reflexão e transmissão (Equações de Fresnel), Anexo A:

$$R_{TE} = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{TE} = \frac{\cos(\theta_i) - N \cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i) + N \cos(\theta_t)} \quad 26$$

$$T_{TE} = \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{TE} = \frac{2\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_i) + N \cos(\theta_t)} \quad 27$$

$$R_{TM} = \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{TM} = \frac{N\cos(\theta_i) - \cos(\theta_t)}{\cos(\theta_i) + N \cos(\theta_t)} \quad 28$$

$$T_{TM} = \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{TM} = \frac{2\cos(\theta_i)}{\cos(\theta_t) + N \cos(\theta_i)} \quad 29$$

Sendo N a relação entre o índice de refração da casca e núcleo  $\left( N = \frac{N_{casca}}{N_{núcleo}} \right)$ , R e T os coeficientes de reflexão e transmissão, respectivamente. A partir da condição de continuidade, verifica-se que o campo elétrico transmitido não desaparece. Reescrevendo a equação 10, temos:

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{j(K_x X + K_y Y - w_t t)} \quad 30$$

Substituindo as componentes das constantes de propagação em x e y, resulta:

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(K_t \text{seno}(\theta_t) X + K_t \text{coseno}(\theta_t) Y - w_t t)} \quad 31$$

Assim reescrevendo o  $\text{coseno}(\theta_t)$  em função do seno, temos a componente da constante de propagação  $K_y$  reescrita com:

$$\text{coseno}(\theta_t) = \sqrt{1 - \text{seno}^2(\theta_t)} \rightarrow K_t \text{coseno}(\theta_t) = \text{cte} * \text{imaginário} = A * i \quad 32$$

Na equação 32, podemos mostrar matematicamente que  $\text{seno } \theta_t > 1$ , visto que:

Para que ocorra a reflexão interna total, temos que  $\theta_i > \theta_c$ .

Na equação 13, vimos que neste caso o ângulo crítico é representado por:

$$\theta_c = \arcseno \left( \frac{N_{casca}}{N_{núcleo}} \right)$$

E o ângulo incidente pode ser reescrito na equação 12, como:

$$\theta_i = \arcseno \left( \frac{N_{casca}}{N_{núcleo}} \text{seno} (\theta_t) \right)$$

Substituindo o ângulo crítico e ângulo incidente em termos de arcseno na condição de ocorrência da reflexão interna total, ou seja  $\theta_i > \theta_c$ , temos:

$$\arcseno \left( \frac{N_{casca}}{N_{núcleo}} \text{seno} (\theta_t) \right) > \arcseno \left( \frac{N_{casca}}{N_{núcleo}} \right)$$

Para que a relação acima seja verdadeira, deve-se ter  $\text{seno} (\theta_t) > 1$ .

Substituindo eq. 32 na eq. 31, temos:

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(K_t \text{seno}(\theta_t)X + A* iY - w_t t)} \quad 33$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{i(K_t \text{seno}(\theta_t)X - w_t t)} e^{-AY} \quad 34$$

Resultando a partir do campo transmitindo em uma onda propagando em X e o campo evanescente (que é o campo formado entre o núcleo e a casca da fibra) em Y, figura 4.

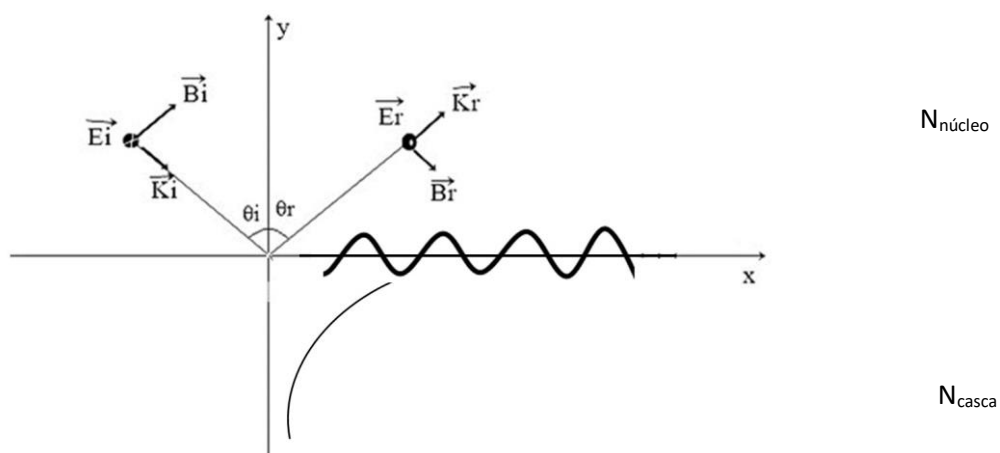


Figura -4: Princípio da Reflexão interna total da luz em fibras ópticas com a onda transmitida e campo evanescente. Fonte: A autora.

Assim, observa-se que a partir da onda transmitida propagando na interface núcleo-casca, surge o campo evanescente na casca da fibra, figura 5.

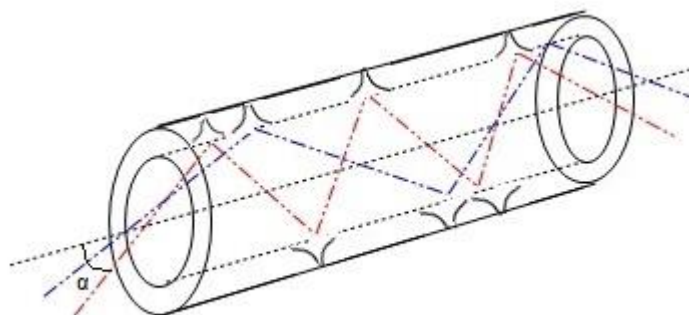


Figura -5: Reflexão interna total da luz em fibras ópticas com o campo evanescente entre a casca e o núcleo da fibra. Fonte: A autora.

## 2.2 Cabos Coaxiais

Para estudar o comportamento de um sinal elétrico de corrente alternada (AC) no formato senoidal fornecido pelo gerador de função, que será analisado neste trabalho, deve-se primeiramente conceituar o termo Fase.

Pode-se definir fase como sendo a posição de um ponto dentro de um ciclo AC expressa em graus ou radianos em relação ao eixo de propagação (SILVER, 2011). Assim, a relação de fase permite a comparação entre duas voltagens AC na mesma frequência, logo o ponto zero de dois sinais com a mesma frequência ocorrendo no mesmo tempo, representa a diferença de fase zero entre os sinais, caracterizando-os estar em fase. Já no caso em que o ponto zero de dois sinais com a mesma frequência ocorre em tempos diferentes, representará uma diferença de fase diferente de zero, resultando no termo defasagem. A Figura 6 nos mostra um exemplo de visualização da defasagem:

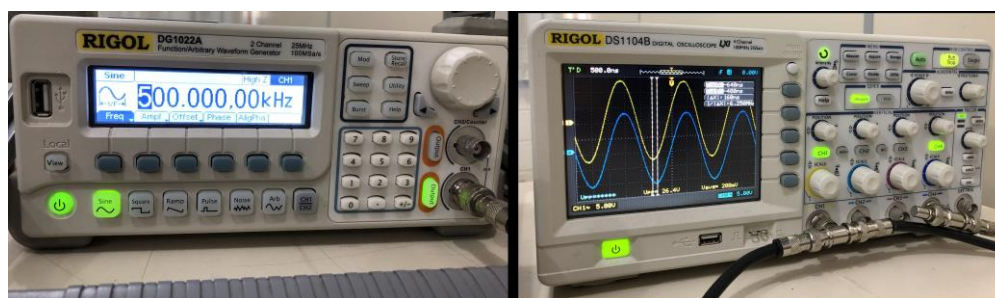


Figura -6: Defasagem de 160 ns entre duas ondas senoidais com frequência de 0.5MHz. Fonte: A autora.

Correntes alternadas (AC) são geralmente classificadas como Áudio Frequência (AF) ou Rádio Frequência (RF), onde AF está relacionada com a frequência na faixa de áudio, como no caso das linhas telefônicas compreendido na faixa (0.02 – 20) KHz. Enquanto a RF, como exemplo o sinal de rádio é considerado a partir da faixa de 3KHz até o início do infravermelho. Ondas eletromagnéticas possuem faixas características, classificadas na Tabela 1, sendo de grande interesse em pesquisas para os físicos. Toda a energia eletromagnética possui em comum a mesma velocidade de propagação no vácuo, igual a

$$3 \times 10^8 \frac{m}{s} = 30 \frac{Mm}{s}.$$



Tabela 1: Faixa espectral da Energia Eletromagnética.

<b>Regiões da Energia do Espectro Eletromagnético</b>	
<b>Região</b>	<b>Faixa de Frequência</b>
Frequências de Rádio	$3,0 \times 10^3$ Hz até $3,0 \times 10^{11}$ Hz
Infravermelho	$3,0 \times 10^{11}$ Hz até $4,3 \times 10^{14}$ Hz
Luz Visível	$4,3 \times 10^{14}$ Hz até $7,5 \times 10^{14}$ Hz
Ultravioleta	$7,5 \times 10^{14}$ Hz até $6,0 \times 10^{16}$ Hz
Raios X	$6,0 \times 10^{16}$ Hz até $3,0 \times 10^{19}$ Hz
Raios Gama	$3,0 \times 10^{19}$ Hz até $5,0 \times 10^{20}$ Hz
Raios Cósmicos	$5,0 \times 10^{20}$ Hz até $8,0 \times 10^{21}$ Hz

Fonte: A autora: adaptado [17]

Levando em consideração a faixa de operação dos cabos coaxiais, a atenuação pode variar, assim para o cabo RG58 na faixa de operação (0,5 – 15) MHz a atenuação característica estará na faixa de (0,2 – 0,9) dB nos 16m de comprimento do cabo, (DATALINK, 2019).

A Defasagem do sinal no cabo coaxial, pode ser teoricamente obtida a partir da equação 35.

$$D_{Teórico} = \frac{360L}{VF * X} \quad 35$$

Onde,

L é o comprimento físico do cabo;

VF é o fator de velocidade tabelado deste cabo, (VF = 0.80), (LEITHOLD, 2009)

X é o comprimento do sinal senoidal no ar, obtido pela relação entre a velocidade da luz

no ar ( c ) é a frequência do sinal (F),  $X = \frac{c}{F}$ ;

### 2.2.1 Impedância

Pode-se definir como impedância ( $Z_0$ ) a oposição total que um circuito oferece ao fluxo de uma corrente elétrica variável no tempo. Em nosso caso, esse circuito é o cabo coaxial (onde a tensão elétrica AC está  $90^\circ$  defasada com a corrente alternada AC no interior do cabo), proveniente de um sinal senoidal elétrico incidente, figura 7. As componentes elétrica e magnética da onda no cabo coaxial resultam no plano transversal a propagação da corrente (onda eletromagnética transversal - TEM) (SILVER, 2011).

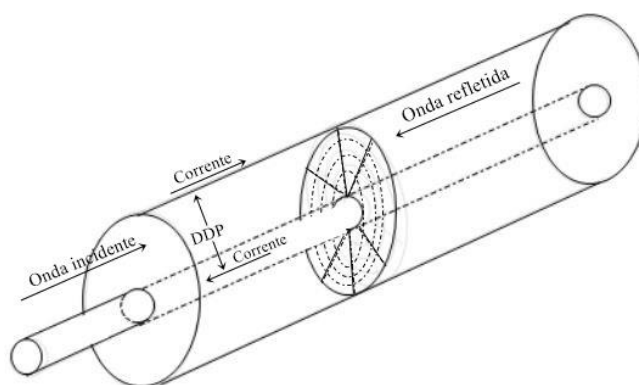


Figura -7: Sinal elétrico incidente, resultando em uma diferença de potencial no cabo coaxial defasado em  $90^\circ$  em relação a corrente e um dos planos transversos do campo elétrico e magnético. Fonte: A autora, adaptado de [17].

Na figura 7, temos que a onda refletida resulta de um não casamento de impedância no cabo, neste caso temos que levar em consideração o coeficiente de reflexão no cabo, que será responsável pela atenuação do sinal. O coeficiente de reflexão ( $C_R$ ) relaciona a onda refletida e a onda incidente no cabo (SILVER, 2011).

$$C_R = \frac{Z_C - Z_0}{Z_C + Z_0}$$

Onde  $Z_C$  e  $Z_0$  são as impedâncias do cabo e a impedância característica, respectivamente.

O coeficiente de reflexão com casamento de impedância é zero, resultando que toda a onda incidente é transmitida pelo cabo sem onda refletida pelo cabo. Logo, na equação 36,  $Z_C = Z_0$ .

Quando a onda incidente e refletida está em fase, temos um coeficiente de reflexão igual a 1, assim  $Z_C = \infty$ .

Já estando a onda incidente e refletida defasadas em  $180^\circ$  resulta em um  $C_R = -1$ , neste caso  $Z_C = 0$ .

A impedância ao longo de uma linha de transmissão pode ser relacionada com o coeficiente de reflexão, como mostrado na equação 37.

$$Z(X) = \frac{V(x)}{I(x)} = Z_0 \frac{e^{\gamma x} + C_R e^{-\gamma x}}{e^{\gamma x} - C_R e^{-\gamma x}} \quad 37$$

De forma que ao realizar-se um casamento de impedância na linha de transmissão, resulta em um coeficiente de reflexão nulo, logo a impedância ao longo da linha de transmissão será constante e igual a  $Z_0$  na equação 37.

A impedância característica  $Z_0$  do cabo coaxial pode ser obtida pela equação 38.

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon_c}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

Onde temos,

$\mu \equiv$  Permeabilidade magnética no cabo (H/m);

$\epsilon_c \equiv$  Permissividade elétrica no cabo (F/m);

$D \equiv$  Diâmetro do condutor externo;

$d \equiv$  Diâmetro do condutor interno.

A Figura 8 mostra a configuração de um cabo coaxial, composto pelo condutor central, dielétrico, blindagem e capa em (a) e o cabo coaxial RG58XX utilizado neste trabalho em (b). De acordo com o data sheet deste cabo, temos que o condutor central é de cobre com 0.90 mm de diâmetro, dielétrico de polietileno (PE), diâmetro de 2.95 mm, condutor externo com diâmetro de 6.15 mm e uma impedância  $Z_0 = 50 \text{ Ohm}$  (LEITHOLD, 2009).

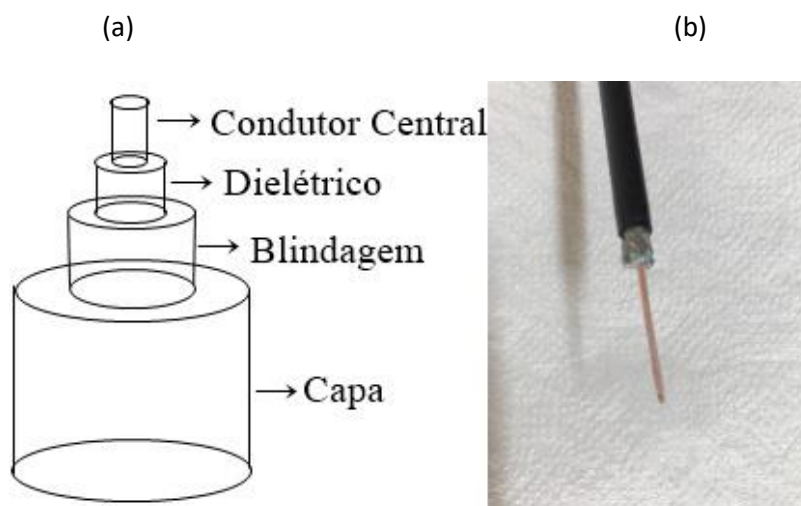


Figura -8:(a) Cabo coaxial composto pela capa, blindagem, dielétrico e condutor central, (b) imagem do cabo RG58XX. Fonte: A autora.

Na ausência de materiais ferromagnéticos, de acordo com (SILVER, 2011) pode-se considerar a permeabilidade magnética no cabo igual do vácuo,  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{T.m}{A} \sim 1.256,6 \text{ nH/m}$  e a permissividade elétrica no cabo é proveniente do produto da permissividade dielétrica relativa do polietileno ( $\epsilon_r = 2.25$ ) e a permissividade elétrica do vácuo ( $\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$ ), resultando na equação 39.

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad 39$$

Resultando em uma impedância teoricamente calculada de 50,7 ohm.

### 3- PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo detalham-se as montagens experimentais (ou kit didático) confeccionadas para obtenção das medidas de Abertura Numérica (AN), Fator de Velocidade e Defasagem.

#### 3.1 Abertura Numérica (AN)

A partir desse experimento, o aluno executará a montagem e deverá fazer a medição indireta da abertura numérica, que fornece o seno do ângulo de aceitação da fibra para o acoplamento de luz, sendo este o ângulo limite para os quais os raios incidindo no

núcleo da fibra óptica satisfaçam a condição de reflexão interna total.

O objetivo desse experimento é que o aluno entenda os conceitos físicos abordados. É possível que, posteriormente, o aluno adapte o experimento para lecionar, utilizando apenas um laser vermelho, uma fibra plástica e uma folha de papel.

Os equipamentos necessários para o experimento são: Anteparo; suporte para a fibra; fibra plástica CK40 com 15 cm de comprimento e 1 mm de diâmetro; lente convergente 20 mm; fonte de luz laser He-Ne e régua, figura 9.

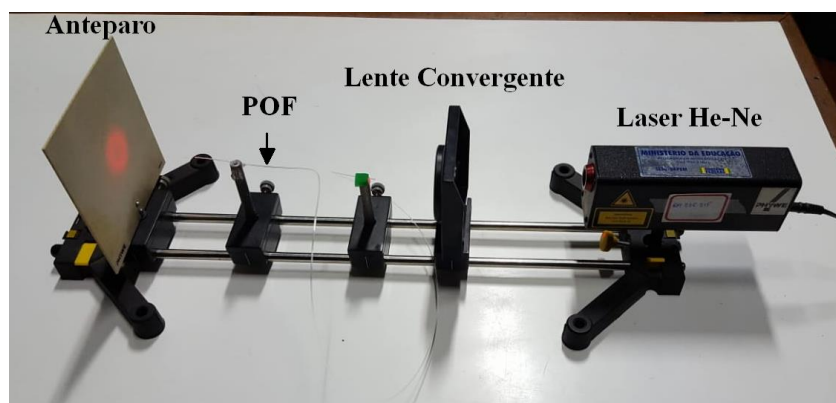


Figura -9:Esquema experimental para obtenção da abertura numérica. Fonte: A autora.

Procedimentos experimentais:

- 1) Colocar o anteparo, a lente, a fibra e a fonte alinhados de modo que a luz incida na ponta da fibra;
- 2) Verificar o círculo (gerado pelo cone de luz) no anteparo;
- 3) Medir o diâmetro do círculo gerado pelo cone de luz ( $a$ ) e a distância entre a fibra e o anteparo ( $L$ );
- 4) Calcular, por meio de trigonometria, a abertura numérica, Figura 10, Equação 40.

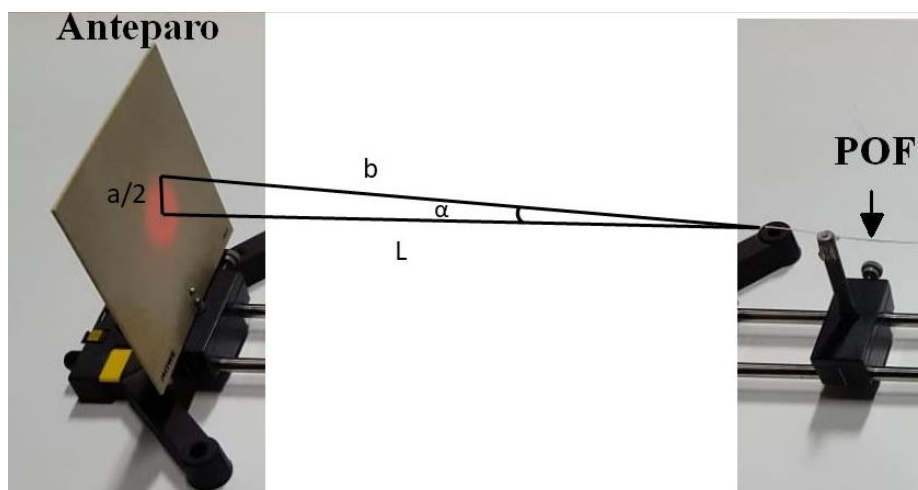


Figura -10: Relação trigonométrica para abertura numérica. Fonte: A autora.

$$(AN) = \text{SENO}(\alpha) = \frac{\frac{a}{2}}{b} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4L^2}} \quad 40$$

O parâmetro V (frequência normalizada) pode ser experimentalmente obtido pela equação 41:

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a (AN) \quad 41$$

### 3.2 Fator de Velocidade e Defasagem experimental

O experimento é formado por gerador de função da marca Rigol - modelo DG1022A (2 canais), 2 cabos coaxiais RG58XX com impedância de 50 Ohms (comprimentos de 16 m e 0.25m) e osciloscópio digital Rigol (4 canais) - modelo DS1104B. Neste experimento o gerador de função fornece uma onda senoidal que será guiada pelos cabos coaxiais até a entrada do osciloscópio, permitindo assim a visualização da defasagem entre os sinais provenientes dos dois cabos coaxiais e a obtenção do Fator de Velocidade, de acordo com a mudança da frequência do sinal de

entrada, Figura 11.

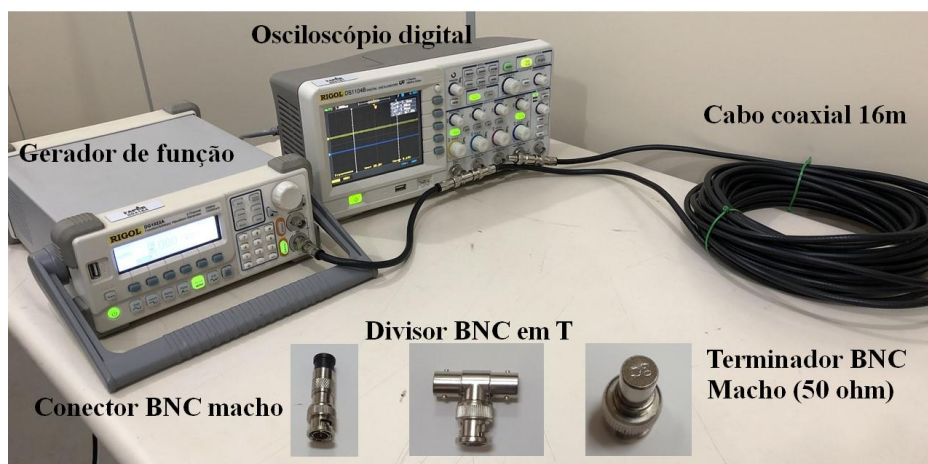


Figura -11: Esquema experimental para obtenção da Defasagem e Fator de Fase. Fonte: A autora.

Procedimentos experimentais:

- 1) Encaixar o cabo coaxial menor de um canal do gerador de função para um canal do osciloscópio (do gerador uma conexão simples e no osciloscópio na conexão T);
- 2) Encaixar o cabo coaxial maior do outro lado da conexão em T para uma outra conexão em T em um outro canal do osciloscópio;
- 3) Encaixar o terminador de 50 Ohm no lado da conexão T que falta;
- 4) Ligar o gerador de função e o osciloscópio;
- 5) Fazer a observação da defasagem para várias frequências.

Experimentalmente a defasagem entre o sinal de entrada e saída, pode ser convertida em graus, utilizando a equação 42, visto que no osciloscópio a defasagem é visualizada em unidade de medida de tempo ( $D_{osc}$ ), neste caso (ns) e o período (T) de um ciclo observado no osciloscópio.



42

$$\frac{D_{osc}}{T} = \frac{D_{Exp}}{360}$$

O Fator de Velocidade de cabos condutores com isolamento de ar fornece a relação entre a velocidade de fase do sinal no cabo e a velocidade do sinal da luz no ar, podendo ser obtido pela Equação 43, sendo ( $\Delta S$ ) a diferença entre os comprimentos dos cabos e  $c$  a velocidade da luz no vácuo (300 M m/s) (GOMES et. al, 2011).

$$FV = \frac{\Delta S}{D_{osc} * c} \quad 43$$

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Medidas de AN e obtenção dos modos de propagação na POF

Através do set up para as medidas de abertura numérica (NA ou AN), verificou-se qualitativamente dois modos de propagação da luz na POF, figura 12, denominados LP<sub>01</sub> (a) e LP<sub>02</sub> (b).

(a)

(b)



Figura -12: Visualização de dois modos de propagação da luz na POF, (a) LP<sub>01</sub> e (b) LP<sub>02</sub>. Fonte: A autora.

A partir dos índices de refração fornecidos pelo fabricante da POF,  $N_{\text{núcleo}} = 1,49$  e  $N_{\text{casca}} = 1,46$  e utilizando as equações 2 e 3, obtêm-se o número de modos de propagação da luz nesta fibra, resultando em  $1,02 \times 10^6$  modos. Experimentalmente, o número de modos foi obtido a partir da equação 39, que leva em consideração a medida de abertura numérica realizada. A partir dos dados experimentais, calculou-se a NA para esta fibra e os valores obtidos estão entre (0,47 – 0,49) para um conjunto de cinco medidas realizadas, resultando em um erro percentual  $\leq 6\%$  em relação ao valor teórico para esta fibra  $NA = 0,50$ . Estes valores de abertura numérica obtidos resultaram números de modos de propagação na fibra  $(2,61 – 2,83) \times 10^6$  e utilizando o valor teórico da NA resulta  $2,78 \times 10^6$ .

#### 4.2 Medidas casamento de impedância

A Figura 13 mostra o sinal senoidal com reflexão, proveniente de um não casamento de impedância. Este sinal mostra que quando não se utiliza o terminador de 50 Ohm para realizar o casamento de impedância característica do cabo, um sinal refletido é observado em relação ao sinal transmitido pelo cabo.

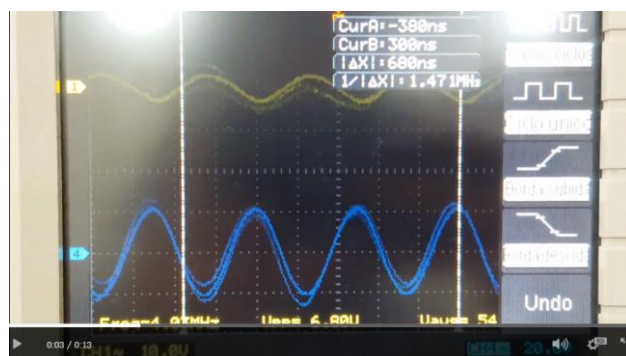


Figura -13: Visualização da onda incidente e refletida proveniente de um sinal propagando no cabo sem casamento de impedância realizada. Fonte: A autora.

A partir do casamento de impedância realizado com terminador de 50 ohm, observa-se o desaparecimento da onda refletida, resultando um coeficiente de reflexão nulo. Desta forma, pode-se atribuir a atenuação do sinal observado no cabo de 25 cm (sinal em amarelo – de cima) e cabo de 16 m (sinal em azul – de baixo) com o aumento da frequência de 0,5 MHz para 4,5 MHz característica deste cabo. Configurando que em maiores frequências acarreta uma maior atenuação do sinal, da mesma forma que o aumento na extensão do cabo resulta em uma maior atenuação para a mesma frequência de operação, figura 14.

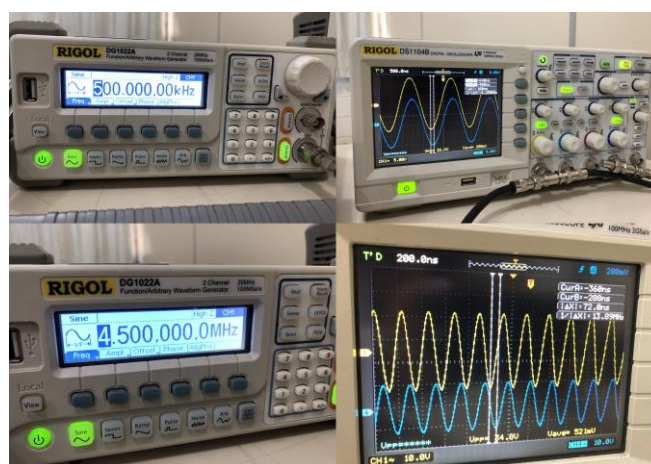


Figura -14: Sinal com casamento de impedância e atenuação observada com o aumento da frequência e extensão do cabo. Fonte: A autora.

### 4.3 Medidas de Fator de velocidade

A Tabela 2 mostra as medidas obtidas para o cálculo do fator de velocidade ( $V/c$ ), onde  $c$  é a velocidade do sinal eletromagnético no ar ( $c = 300 \text{ Mm/s}$ ). As medidas representadas pela defasagem obtida no pico ou vale entre o sinal do cabo maior e menor observado no osciloscópio é representada por  $D_{osc}$ , a partir de uma determinada frequência do sinal de entrada ( $F$ ). A velocidade do sinal ( $V$ ) foi obtida considerando a diferença entre os

comprimentos dos cabos coaxiais utilizados, ou seja 15,75 m, equação 43. A incerteza para o Osciloscópio é  $\pm 3\%$  do valor da medida.

*Tabela 2: Medidas obtidas para o cálculo de Fator de velocidade*

<b>Medidas</b>	$D_{osc}$ (ns)	V(Gm/s)	V/C (adimensional)	F (MHz)
<b>1</b>	160	0.10	0.33	0.5
<b>2</b>	120	0.13	0.44	1
<b>3</b>	96	0.17	0.56	1.5
<b>4</b>	96	0.17	0.56	2
<b>5</b>	96	0.17	0.56	2.5
<b>6</b>	96	0.17	0.56	3
<b>7</b>	80	0.20	0.67	3.5
<b>8</b>	80	0.20	0.67	4
<b>9</b>	72	0.22	0.74	4.5
<b>10</b>	72	0.22	0.74	5
<b>11</b>	72	0.22	0.74	5.5
<b>12</b>	72	0.22	0.74	6
<b>13</b>	64	0.25	0.83	6.5
<b>14</b>	64	0.25	0.83	7
<b>15</b>	72	0.22	0.74	7.5
<b>16</b>	72	0.22	0.74	8
<b>17</b>	72	0.22	0.74	8.5
<b>18</b>	72	0.22	0.74	9
<b>19</b>	72	0.22	0.74	9.5
<b>20</b>	72	0.22	0.74	10
<b>21</b>	72	0.22	0.74	10.5
<b>22</b>	72	0.22	0.74	11
<b>23</b>	72	0.22	0.74	11.5
<b>24</b>	72	0.22	0.74	12
<b>25</b>	72	0.22	0.74	12.5
<b>26</b>	72	0.22	0.74	13
<b>27</b>	64	0.25	0.83	13.5
<b>28</b>	72	0.22	0.74	14

A partir da tabela 2, observa-se que as medidas de 9 a 28 apresentaram maior estabilidade no fator de velocidade, e também maior flutuação nos valores associados entre as medidas 1 e 8. Acredita-se que as flutuações observadas em todas as regiões podem ser atribuídas a instabilidade da rede elétrica local. A Figura 15 mostra uma comparação entre o fator

de fase tabelado deste cabo (linha preta) e os valores obtidos experimentalmente (círculos vermelhos).

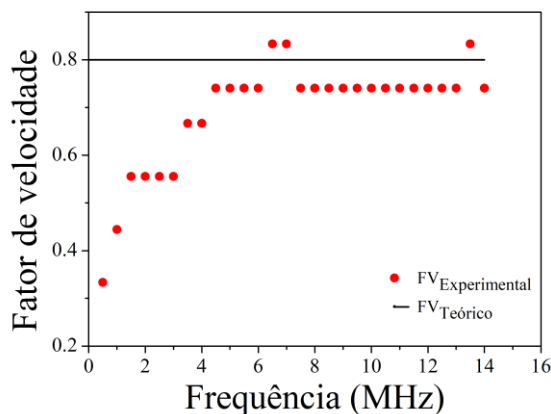


Figura -15: Fator de velocidade em função da frequência. Fonte: A autora.

A partir da figura 15 verifica-se que a região de menor flutuação do sinal ocorre para frequências acima de 4,5 MHz, sendo considerada então a melhor região de trabalho para este cabo, apresentando fator de velocidade de 0.74.

#### 4.4 Medidas de Defasagem

As medidas de defasagem experimental  $D_{\text{Experimental}}$  (graus) foram obtidas a partir da defasagem observada no osciloscópio  $D_{\text{osc}}$  com o auxílio da equação 42. A Tabela 3 mostra que com o aumento da frequência, ou seja, a redução do período dos ciclos, ocorre um aumento da defasagem em graus. A partir da equação 35 obtêm-se a defasagem teórica e, utilizando o Fator de Velocidade tabelado (0.80), verifica-se que com o aumento da frequência também ocorre o aumento da defasagem teoricamente esperada. A figura 16 mostra o aumento linear da defasagem à medida que ocorre o aumento da frequência. Novamente, é válido lembrar que a incerteza para o Osciloscópio é  $\pm 3\%$  do valor da medida.

Tabela 3: Medidas de defasagem

<b>Medidas</b>	<b>F (MHz)</b>	<b>D<sub>Experimental</sub> (graus)</b>	<b>D<sub>Teórica</sub> (graus)</b>
1	0.5	28.8	12
2	1	43.2	24
3	1.5	51.8	36
4	2	69.1	48
5	2.5	86.4	60
6	3	103.7	72
7	3.5	100.8	84
8	4	115.2	96
9	4.5	116.6	108
10	5	129.6	120
11	5.5	142.6	132
12	6	155.5	144
13	6.5	149.8	156
14	7	161.3	168
15	7.5	194.4	180
16	8	207.4	192
17	8.5	220.3	204
18	9	233.3	216
19	9.5	246.2	228
20	10	259.2	240
21	10.5	272.2	252
22	11	285.1	264
23	11.5	298.1	276
24	12	311.1	288
25	12.5	324.0	300
26	13	336.9	312
27	13.5	311.1	324
28	14	362.9	336

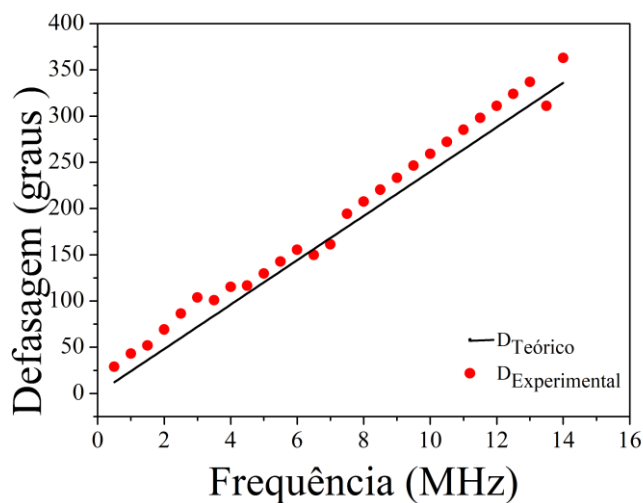


Figura -16: Defasagem do sinal em função da frequência. Fonte: A autora.

É possível perceber que a concordância dos valores de defasagem experimentais e dos valores teóricos está em uma faixa adequada.

## 5. CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado em guias de onda foi possível entender os princípios físicos envolvidos nesses experimentos, viabilizando ao professor explicar a diferença no guiamento do sinal entre fibra óptica plástica, vidro e cabos coaxiais. Em fibras ópticas mostra-se que a partir de um sinal eletromagnético de entrada geram-se diferentes modos de propagação da luz na fibra óptica multimodo e que o número de modos está diretamente relacionado com o diâmetro do núcleo da fibra. No estudo de cabos coaxiais mostra-se que um sinal elétrico AC de entrada no cabo transforma-se em um sinal eletromagnético no interior do cabo e que a este sinal também estão associados modos de

propagação eletromagnético transversal ao plano longitudinal deste guia. Em relação as fibras ópticas mostra-se a principal diferença entre GOF e POF, assim como as vantagens da POF para o guiamento de sinais em curtas distâncias em relação a GOF. Explica-se o princípio da reflexão interna total em fibras ópticas, com o auxílio da óptica geométrica e Lei de Snell, assim como a partir da óptica ondulatória pôde-se explicar a formação do campo evanescente entre a casca e o núcleo da fibra. Em cabos coaxiais pôde-se melhor entender o conceito de fase e defasagem do sinal, verificando-se que a partir de 4,5 MHz o sinal apresenta menor flutuação no fator de velocidade para este cabo, assim como um aumento linear na defasagem ocorre entre os sinais com a redução do período dos ciclos. Parâmetros ópticos foram obtidos com êxito: fibras ópticas apresentaram erros  $\leq 6\%$  na obtenção da AN e número de modos de propagação em relação aos valores teóricos. Em cabos coaxiais o Fator de Velocidade experimental (0,74) estão bem próximos ao valor esperado para este cabo coaxial (0,80) em frequências acima de 4,5 MHz, o que significa que os procedimentos experimentais estão de acordo com as teorias físicas associadas. Em suma, pretende-se que o produto gerado com este estudo, kits didáticos, sejam incorporados ao Laboratório de Óptica do Departamento de Física da UFRRJ, auxiliando assim o ensino da óptica experimental na graduação.



## REFERÊNCIAS

ATEF, M., ZIMMERMANN, H., *Optical Communication over Plastic Optical Fibers*. (Springer, 2013).

SMITH, P. H., *Electronic Applications of the Smith chart: in Waveguide, Circuit, and Component Analysis*, 2<sup>nd</sup> ed. (SciTech Publishing, Inc, 1995).

ARUMUGAM, M., *Optical Fiber communication – An overview*, PRAMANA Journal of Physics. **57**(849-869), (2001).

OSMAN, W. M., AL NABI, A. B., BILLAL, K. H., *Optical Fiber Review*, Journal of Electr. & Electron. Syst. **7**(249), DOI 10.4172/2332-0796.1000249 (2018).

PINHEIRO, J. M. S., *Sistemas de Transmissão e Meios Ópticos*, Escola de Eng. Elétr., Mec. e de Comp. da Univ. Fed. de Goiás (2002).

Plastic Optical Fiber: ESKA Optica Fiber Division. Marketed and Sold by Mitsubishi International Corporation, 2010. 1 p. Disponível em:

<[http://fiberopticpof.com/pdfs/Plastic\\_Fiber\\_Optics\\_&\\_Cable/ESKA\\_CK\\_Fiber\\_Optics\\_Illumination/CK\\_40\\_Product\\_Information.pdf](http://fiberopticpof.com/pdfs/Plastic_Fiber_Optics_&_Cable/ESKA_CK_Fiber_Optics_Illumination/CK_40_Product_Information.pdf)>. Acesso em: 18 mar. 2019.

KEISER, G., *Optical Fiber Communications*, 3<sup>rd</sup> ed., 622 (McGraw-Hill, 2000).

MISTSCHKE, F., *Fiber Optics: Physics and Technology*, Springer-Verlag, 299 p, 2009.

SOARES, L. M. B., *Fibras ópticas com cavidades Fabry-Perot para sensoriamento de temperatura, deformação longitudinal e campo magnético*, Dissertação de Mestrado, Publicação 1321746/CA, Dept. de Física da PUC-Rio (2015).

AGRAVAL, G. P., *Nonlinear Fiber Optics*, 3<sup>rd</sup> ed., 481 (Academic Press, 2001).

FOUROZAN, B. A., *Comunicação de dados e Redes de computadores*, 1145 (Mc Graw Hill, 2010).

COSTA, G. K. B., GOUVEA, P. M. P., SOARES, L. M. B.; PEREIRA, J. M. B., FÁVERO, F. C., BRAGA, A. M. B., MUHORAY, P. P., BRUNO, A. C., CARVALHO, I. C. S., *In-fiber Fabry-Perot interferometer for strain and magnetic field sensing*, OPTICS EXPRESS, v. 24, p. 14690-96, (2016).

WERNECK, M. M., LOPEZ, R. N., COSTA, G. K. B., RODRIGUEZ D. M. C., ARCAS, A. S., QUEIROZ, V. M., DUTRA, F. S., ALLIL, R. C., POF Biosensors Based on Refractive Index and Immunocapture Effect, 1st ed. Spain: Springer Verlag, **21**(20-40), (2016).

SOUSA, A. J., A importância da Física Experimental no processo de Ensino e aprendizado, Monografia de Licenciatura em Física, Instituto de Física da Univ. Fed. de Uberlândia (2010).

VELOSO, M. S. S. O., NETO, A. S. A., Panorama do uso de Laboratório Didático em Cursos de Ensino de Física, Modalidade a Distância, no País. CINTED-Novas Tecnologias na Educação, **12**(2), (2014).

SILVER, H. W (Editor). The ARRL HANDBOOK for Radio Communications. (The American Radio Relay League, Inc, 2011).

FILHO, J. P., Ondas Guiadas, 56 (2005), Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~pisso/ee754/Apostila%20Ondas%20Guiadas.pdf>>. Acesso em 10/01/2019.

FASSARELA, L., Lei de Snell Generalizada, Rev. Bras. Ens. Fís., **29**(215-224), (2007).

Corning SMF 28 Ultra Optical fiber, 2014. 2p. Disponível em: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf>

Acesso em: 18 mar. 2019.

LIAO, P. F., KELLEY, P. L. THEORY OF DIELECTRIC OPTICAL WAVEGUIDES, 2<sup>nd</sup> ed., 389p (Academic Press, 1991).

OKAMOTO, K., Fundamentals of Optical Waveguides, Academic Press., (57-158), (2006).

HECHT, E. OPTICS. 4<sup>th</sup> ed., 704p (Pearson Education, Inc, 2002).

DATALINK: Excelência em cabos. Disponível em: <https://www.afdatalink.com.br/produtos/1-telecomunicacoes-2/calculadora-da-atenuacao/> Acesso em: 22 Abr. 2019.

LEITHOLD, A. A., Tabela de cabos coaxiais. 2009. 6 p. Disponível em: <[https://sites.google.com/site/angeloleitholdpy5aal/home/pesquisas/wikipedia-edies-angeloleithold-at-2011/antenas-1/angelo-antonio-leithold-tabela-de-cabos-coaxiais-em\\_html](https://sites.google.com/site/angeloleitholdpy5aal/home/pesquisas/wikipedia-edies-angeloleithold-at-2011/antenas-1/angelo-antonio-leithold-tabela-de-cabos-coaxiais-em_html)>. Acesso em: 18 mar. 2019.

GOMES, D. O. S., SANTOS, W. S., SANTOS, A. C. F., AGUIAR, C. E., Medidas da velocidade de fase da luz em linhas de transmissão, Rev. Bras. Ens. Fis. **33**(3), 3307\_1-3 (2011).

MEC, Diretrizes Nacionais Curriculares para os Cursos de Física, Parecer nº CNE/CES 1.304/2001, 9 (2001).

SEVERO, S. L. S., REZENDE, F. O., A Gênese do conceito de velocidade de propagação no laboratório de ondas eletromagnéticas. COBENGE, 12 (2012)

## **ANEXO A**

As equações de Fresnel

Caso 1 – E perpendicular ao plano de incidência

Vamos considerar que  $E$  é perpendicular ao plano de incidência e  $B$  é paralelo a ele.

Lembrando que  $E = vB$ , temos que  $k \times E = vB$  e que  $k \cdot E = 0$ .

Como as componentes tangenciais de  $E$  são contínuas, temos que em qualquer ponto para qualquer  $t$ ,  $E_{0i} + E_{0r} = E_{0t}$  (1), onde os cossenos se cancelam.

Para continuar o raciocínio, é necessária outra condição de contorno para obtermos mais uma equação. Apesar da componente tangencial de  $E$  ser contínua nas bordas, a componente normal não é. Apesar disso, a normal de  $\epsilon E$  é a mesma em qualquer lado da interface. Consequentemente, a componente normal de  $B$  é contínua, assim como a componente tangencial  $\frac{B}{\mu}$ .

A continuidade da componente tangencial de  $\frac{B}{\mu}$  exige que

$$-\frac{B_i}{\mu_i} \cos \theta_i + \frac{B_r}{\mu_r} \cos \theta_r = -\frac{B_t}{\mu_t} \cos \theta_t \quad (2)$$

Onde a componente tangencial do campo magnético aponta no sentido negativo do  $x$ , assim como a onda incidente. Os lados esquerdo e direito da equação são as magnitudes de  $\frac{B}{\mu}$  paralelo a interface de incidência e do meio de transmissão, respectivamente.

$$B_i = E_i/v_i \quad (3)$$

$$B_r = E_r/v_r \quad (4)$$

$$B_t = E_t/v_t \quad (5)$$

Considerando que  $v_i = v_r$  e  $\theta_i = \theta_r$ , podemos escrever (2) como

$$\frac{1}{\mu_i v_i} (E_i - E_r) \cos \theta_i = \frac{1}{\mu_t v_t} E_t \cos \theta_t \quad (6)$$

Com isso, obtemos

$$\frac{n_i}{\mu_i} (E_{0i} - E_{0r}) \cos \theta_i = \frac{n_t}{\mu_t} (E_{0t}) \cos \theta_t \quad (7)$$

Combinada com a equação 1, temos

$$\left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}}\right)_{\text{perpendicular}} = \frac{\frac{n_i \cos \theta_i - \frac{n_t \cos \theta_t}{\mu_t}}{\mu_i}}{\frac{n_i \cos \theta_i + \frac{n_t \cos \theta_t}{\mu_t}}{\mu_i}} \quad (8)$$

$$E \left(\frac{E_{0t}}{E_{0i}}\right)_{\text{perpendicular}} = \frac{2 \frac{n_i \cos \theta_i}{\mu_i}}{\frac{n_i \cos \theta_i - \frac{n_t \cos \theta_t}{\mu_t}}{\mu_i}} \quad (9)$$

As expressões, que são gerais e aplicáveis em qualquer meio linear, isotrópico e homogêneo, são as equações de Fresnel.

Quando  $\mu_i \approx \mu_t \approx \mu_0$ , a forma comum das equações é

$$r_{perpendicular} \equiv \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{perpendicular} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (10)$$

$$t_{perpendicular} \equiv \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{perpendicular} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (11)$$

Onde  $r_{perpendicular}$  é o coeficiente de reflexão da amplitude e  $t_{perpendicular}$  é o coeficiente de transmissão da amplitude.

Caso 2 – E paralelo ao plano de incidência

Um par similar de equações pode ser derivada considerando as condições de contorno quando E é paralelo e há continuidade das componentes tangenciais de E.

$$\text{Temos } E_{0i} \cos \theta_i - E_{0r} \cos \theta_r = E_{0t} \cos \theta_t \quad (12)$$

Analogamente, a continuidade das componentes tangenciais de  $\frac{B}{\mu}$  nos dá

$$\frac{1}{\mu_i v_i} E_{0i} + \frac{1}{\mu_r v_r} E_{0r} = \frac{1}{\mu_t v_t} E_{0t} \quad (13)$$

Sabendo que  $\mu_i = \mu_r$  e  $\theta_i = \theta_r$ , podemos combinar essas equações e obter mais duas equações de Fresnel.

$$r_{paralelo} \equiv \left( \frac{E_{0r}}{E_{0i}} \right)_{paralelo} = \frac{\frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{\mu_t} - \frac{n_i \cos \theta_t}{\mu_i}}{\frac{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}{\mu_i} + \frac{n_t \cos \theta_i}{\mu_t}} \quad (14)$$

$$t_{paralelo} \equiv \left( \frac{E_{0t}}{E_{0i}} \right)_{paralelo} = \frac{2 \frac{n_i \cos \theta_i}{\mu_i}}{\frac{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i}{\mu_i} + \frac{n_t \cos \theta_t}{\mu_t}} \quad (15)$$

Quando os meios que formam a interface são dielétricos, são essencialmente não-magnéticos e os coeficientes de amplitude se tornam:

$$r_{paralelo} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (16)$$

$$t_{paralelo} = \frac{2n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_t + n_t \cos \theta_i} \quad (17)$$

Usando a Lei de Snell para simplificar, as equações de Fresnel se tornam:

$$r_{perpendicular} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (18)$$

$$r_{paralelo} = +\frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (19)$$

$$t_{perpendicular} = +\frac{2 \sin\theta_t \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (20)$$

$$t_{paralelo} = +\frac{2 \sin\theta_t \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (21)$$

## **ANEXO B**

**Certificado de apresentação do trabalho na 3ª Conferência de Física de Países de Língua Portuguesa em São Tomé e Príncipe, no período de 30/05/2019 – 01/06/2019.**



## CERTIFICADO

Certifica-se que o(a) Senhor(a) **Wanessa Afonso de Andrade (ANDRADE, W. A.)**

apresentou o(a) Poster com apresentação com título

**AQUISIÇÃO QUANTITATIVA E QUALITATIVA DE PARÂMETROS ÓPTICOS EM GUIAS DE ONDA**

no(a) 3ª Conferência de Física de Países de Língua Portuguesa - 3CFCLP em São Tomé e Príncipe, de 30/05/2019 a 01/06/2019

---

*São Tomé e Príncipe, 01 de Junho de 2019*

Pe' A Comissão Organizadora

*Luana Conceição Abreu e Silva*

Pe' A Comissão Científica

*Manuel Kenhor*

**Certificado de aceite e Resumo estendido submetido a 71ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência no período de (21-27) /07/ 2019 na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) – Campo Grande, MS.**

**71ª Reunião Anual da SBPC**

Ref.: Parecer sobre trabalho submetido à 71ª Reunião Anual da SBPC.

Parecer emitido em: **27/03/2019**

Ciência do parecer pelo autor em: **04/05/2019**

1) Autor(es):

Wanessa Afonso de Andrade  
Marcelo Azevedo Neves  
Greice Kelly Bezerra da Costa

2) Autor que submeteu o trabalho:

WANESSA AFONSO DE ANDRADE

3) Título do trabalho:

INVESTIGANDO PARÂMETROS ÓPTICOS EM FIBRA ÓPTICA E CABO COAXIAL

Área: 1. Ciências Exatas e da Terra - 05. Física - 07. Física de Matéria Condensada

Inscrição do trabalho: 4178

Prezado(a) Autor(a),

Temos a satisfação de informar que o trabalho, acima referido, foi ACEITO para apresentação na Sessão de Pôsteres, durante a 71ª Reunião Anual da SBPC, que será realizada de 21 a 27 de julho de 2019, na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul- UFMS, em Campo Grande/MS.

Consulte no site <http://ra.sbcnet.org.br/campogrande/inscricao-e-envio-de-resumo/> as normas para preparação e alocação do pôster.

O trabalho somente será publicado nos Anais/Resumos se o pôster for apresentado de acordo com as normas, na Sessão de Pôsteres, pelo autor-apresentador.

Os Anais/Resumos estarão disponíveis no site da SBPC, a partir de outubro/2019.

Agradecemos sua participação.

Comissão Organizadora Central  
71ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência  
<http://ra.sbcnet.org.br/campogrande/>



1.05.07 – Física da Matéria Condensada.

## INVESTIGANDO PARÂMETROS ÓPTICOS EM FIBRA ÓPTICA E CABO COAXIAL

Wanessa A. de Andrade<sup>1\*</sup>, Marcelo A. Neves<sup>2</sup>, Greice K.B. da Costa<sup>3</sup>

1. Estudante de Licenciatura em Física, Instituto de Ciências Exatas - Departamento de Física da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (ICE-DEFIS-UFRRJ)
2. Professor e Pesquisador do ICE-UFRRJ - Departamento de Física
3. Professora e Pesquisadora do ICE-UFRRJ - Departamento de Física/Orientador

### Resumo

Neste trabalho mostra-se o ensino direcionado para a área da óptica e fotônica na graduação, através de experimentos confeccionados com cabo coaxial e fibra óptica para aquisições quantitativa e qualitativa dos seguintes parâmetros ópticos: Modos de propagação da luz, abertura numérica, velocidade de fase e defasagem. Desta forma, apresentam-se dois set up experimentais, sendo o primeiro composto por luz laser He-Ne com alinhamento em espaço livre focalizada na entrada da fibra óptica plástica e um anteparo localizado na saída de luz da fibra, possibilitando a visualização dos modos de propagação da luz e abertura numérica da fibra, assim como o cálculo destes. O segundo é formado por gerador de função, cabo coaxial e osciloscópio, permitindo a visualização da defasagem, atenuação de uma onda senoidal guiada por um cabo coaxial e obtenção da velocidade de fase.

**Palavras-chave:** Modos de propagação de luz, Abertura numérica, velocidade de fase.

### Introdução

As fibras ópticas são guias de onda cilíndricas confeccionadas com um material dielétrico, geralmente sílica ou plástico, possuindo uma estrutura básica composta por um revestimento, casca e núcleo, cujo diâmetro do núcleo varia de acordo com o número de modos de propagação do sinal na fibra. Uma fibra padrão de telecomunicação (Monomodo), possuem um núcleo com diâmetro variando entre (6-10)  $\mu\text{m}$  e são amplamente utilizadas no ramo das telecomunicações e sensoriamento remoto [1], enquanto fibras com diâmetros superiores (Multimodos) são utilizadas em sensoriamentos de curtas distâncias.

Os cabos coaxiais são guias de onda com estrutura distinta a das fibras ópticas. De forma geral são compostos por um núcleo torcido ou sólido produzidos de um material condutor, geralmente cobre que, por sua vez, são revestidos por um material isolante. O material isolante é envolto por um filme metálico com a função de blindagem contra ruídos, assim como a de completar a ligação do circuito, sendo posteriormente revestido pelo mesmo material isolante utilizado para revestimento do núcleo e finalizado com um invólucro plástico. Os cabos coaxiais foram bastante utilizados em redes de telefonia, TV a cabo e redes de LANs Ethernet, que estão sendo substituídos por fibras ópticas [2].

O estudo de fibras ópticas possuem grande relevância e originalidade na área da Física experimental, pois sensores a fibra óptica encontram-se atualmente em destaque por estarem substituindo sensores tradicionais em virtude de suas vantagens intrínsecas, entre as quais podemos citar: custo, peso, confiabilidade, tempo de resposta, precisão, faixa dinâmica, passividade e imunidade eletromagnética. Tais características tornam estes sensores de grande interesse e com vasto campo em diversas áreas, tais como, bélica, elétrica, petróleo e gás, construção civil, medicina, segurança pública, entre outras [3-4]. Esta tecnologia foi transferida parcialmente da indústria dos componentes usados nas telecomunicações, e vem demonstrando uma operação versátil em muitos setores, caracterizados pela sensibilidade e pelo baixo custo, promovendo assim os sensores ópticos a uma solução favorável nas aplicações necessárias do mundo atual.

### Metodologia

As configurações experimentais foram confeccionadas da seguinte forma: Uma luz laser He-Ne, comprimento de onda em 632,8 nm e com alinhamento em espaço livre focalizada por uma lente convergente com distância focal de 10 cm na entrada da fibra óptica plástica CK40 da ESKA [5], com 15 cm de comprimento, 1 mm de diâmetro e um anteparo localizado na saída de luz da fibra, Figura 1.



Figura 1: Obtenção de abertura numérica e números de modos de propagação em uma fibra óptica.

Neste experimento inicia-se o processo de aprendizagem de como fazer um alinhamento óptico em espaço livre da luz laser, ou seja, sem conectores para acoplamento desta, de forma que alterações neste alinhamento resultem em visualizações de diferentes modos de propagação da luz no anteparo. A partir da medida de distância entre anteparo e saída de luz da fibra ( $L$ ), assim como o diâmetro do modo de propagação da luz visualizado no anteparo ( $a$ ), calcula-se a abertura numérica da fibra ( $AN$ ), que fornece o ângulo de aceitação da fibra para o acoplamento de luz, sendo este o ângulo limite para os quais os raios penetrando no núcleo da fibra óptica satisfaçam a condição de reflexão interna total, Equação 1.

$$AN = \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4L^2}} \quad (1)$$

2. O número de modos de propagação suportados pela fibra pode ser obtido pela Equação

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} b (AN) \quad (2)$$

Onde:  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz laser e  $b$  é o raio do núcleo da fibra.

O segundo experimento é formado por gerador de função da marca Rigol - modelo DG1022A (2 canais), 2 cabos coaxiais RG58XX com impedância de 50 Ohms (comprimentos de 16 m e 0.25m) e osciloscópio digital Rigol (4 canais) - modelo DS1104B, Figura 2. Neste experimento o gerador de função fornece uma onda senoidal que será guiada pelos cabos coaxiais até a entrada do osciloscópio, permitindo assim a visualização da defasagem entre os sinais provenientes dos dois cabos, de acordo com a mudança da frequência do sinal de entrada.

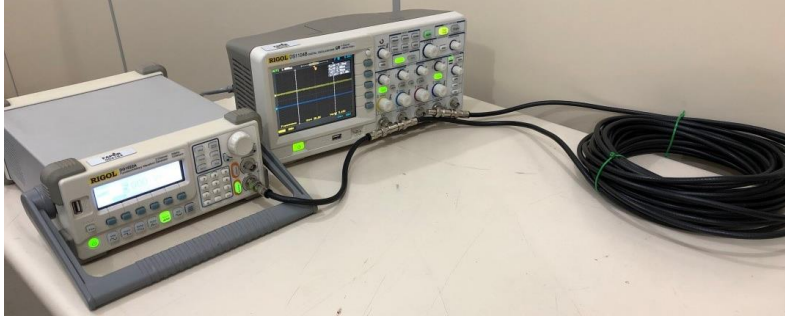


Figura 2: Obtenção da velocidade de fase e defasagem no cabo coaxial

A velocidade de fase (VF) de um cabo corresponde a razão entre o sinal elétrico transmitido pelo cabo e a velocidade da luz no ar. Neste caso a velocidade do sinal transmitido foi obtido pela relação entre a diferença dos comprimentos dos cabos e o tempo de defasagem observada no osciloscópio.

A defasagem ( $D_{Teórica}$ ) entre o sinal de entrada e saída dos cabos coaxiais, pode ser obtida teoricamente a partir da Equação 3.

$$D_{Teórico} = \frac{360 L}{VF * X} \quad (3)$$

Onde:  $L$  é o comprimento físico do cabo e  $X$  é o comprimento de onda no ar, proveniente da relação entre a velocidade da luz no ar e a frequência do sinal a ser utilizado no gerador de função.

Experimentalmente a defasagem entre o sinal de entrada e saída, pode ser obtida da Equação 4.

$$\frac{D_{osc}}{T} = \frac{D_{Exp}}{360} \quad (4)$$

Onde:  $D_{osc}$  é a defasagem visualizada no osciloscópio e  $T$  é o tempo de um ciclo

### Resultados e Discussão

No experimento destinado a obtenção de abertura numérica e números de modos de propagação em fibra óptica, a partir do alinhamento otimizado na Fig. 1, ou seja, de forma a se obter uma imagem bem focalizada no anteparo, mede-se a distância entre anteparo - saída de luz da fibra ( $L$ ) e diâmetro do modo de propagação da luz visualizado no anteparo ( $a$ ), aplicando essas medidas na eq. 1, obtiveram-se valores de abertura numérica  $AN = [0.47- 0.49]$  próximos ao tabelado 0.50 [5], apresentando erro  $\leq 6\%$ . A partir da AN obtida experimentalmente, núcleo da fibra  $b = 490 \mu\text{m}$  e do comprimento de onda da luz laser  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , calculou-se o número de modos de propagação nesta fibra usando a eq. 2, resultando em  $V = [2.28 - 2.38] \times 10^3$  modos, próximo ao valor teórico para  $AN = 0.50$ ,  $b = 490 \mu\text{m}$  e  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,  $V = 2.36 \times 10^3$  modos. De acordo com a variação no alinhamento da luz laser na entrada do núcleo da fibra ou mudanças no comprimento da fibra, promove-se uma alteração no ângulo de propagação da luz no eixo da fibra, conseqüentemente alguns modos podem ser visualizados no anteparo, conforme mostrado na figura 3.

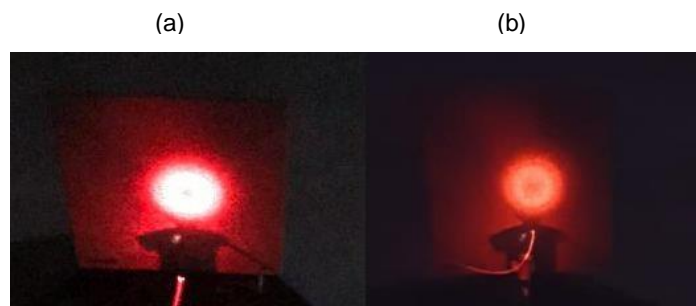


Figura 3: Modos de luz linearmente polarizados: (a) Modo fundamental  $LP_{01}$  e (b)  $LP_{02}$ .

Os modos de propagação da luz são linearmente polarizados LP em fibras ópticas, visto que as componentes do campo na direção de propagação são menores em relação às componentes perpendiculares. A propagação da luz na fibra é governada pelas equações de Maxwell, cujos modos visualizados na figura 3 foram atribuídos aos modos linearmente polarizados  $LP_{01}$  e  $LP_{02}$ , que são caracterizados nas soluções das equações de Maxwell através da existência de componentes de campo elétrico e magnético na direção de propagação da luz, sendo assim associados aos modos  $HE_{11}$  e  $HE_{12}$ , respectivamente.

No experimento destinado a obtenção da velocidade de fase e defasagem no cabo coaxial, observa-se na Figura 4 que a defasagem entre os sinais de saída foi constante e igual a 72ns, em (a) para uma frequência de 4.5MHz e em (b) para uma frequência de 11MHz. Observa-se que aumentando a frequência, o período do ciclo diminui, porém, a defasagem permanece estável.

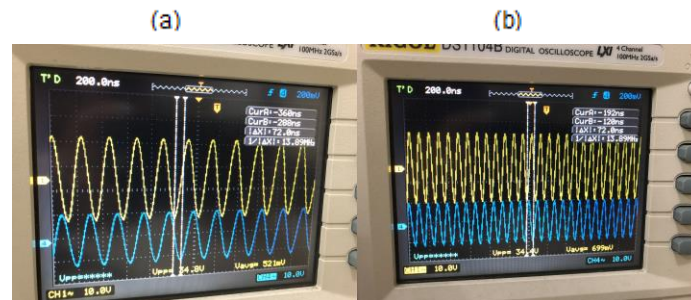


Figura 4: Defasagem entre os sinais de saída: (a) Onda com frequência de 4.5 MHz e defasagem de 72ns, (b) Onda com frequência de 11MHz e defasagem de 72ns.

A Figura 5 mostra uma grande instabilidade no fator de velocidade abaixo de 4MHz (a) e uma defasagem entre o sinal de entrada e saída do cabo coaxial com variação linear e progressiva de acordo com o aumento da frequência do sinal utilizado (b).

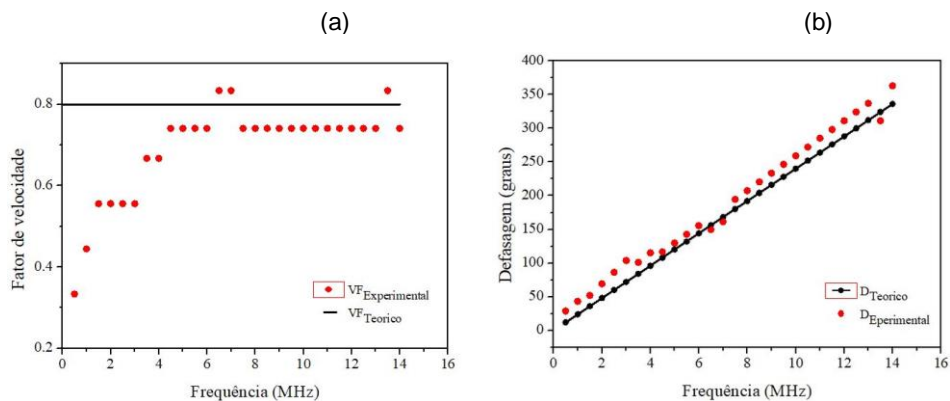


Figura 5: (a) Fator de velocidade em função da frequência e (b) Defasagem entre o sinal de entrada e saída em função da frequência utilizada.

Observa-se que o fator de velocidade a partir de 4MHz torna-se mais estável e próximo ao valor tabelado de 0.80 para o cabo RG58XX [6], assim como a defasagem entre o sinal de entrada e saída experimental apresenta grande concordância com a defasagem teórica.

### Conclusões

Conclui-se que a obtenção de alguns parâmetros ópticos de fibra óptica e cabo coaxial através de dois set ups ópticos foram realizados com êxito. As medidas realizadas com a fibra óptica possibilitam o entendimento desta como guia de onda, assim como o aprendizado sobre modos

de propagação da luz e abertura numérica. Os valores de abertura numérica e números de modos de propagação obtidos estão em acordo com os valores teoricamente esperados para esta fibra. As medidas realizadas com o cabo coaxial mostraram originalmente que a velocidade de fase apresenta uma estabilidade na transmissão de sinais em frequências a partir de 4,5 MHz e com defasagem entre sinal de entrada e saída variando linearmente e em acordo com os dados teóricos.

### Referências bibliográficas

[1] F. MISTSCHKE, Fiber Optics: Physics and Technology, Springer-Verlag, 299 p, 2009.

[2] B. A. FOUROZAN, Comunicação de dados e Redes de computadores, Mc Graw Hill, 1145 p, 2010

[3] G.K.B. COSTA; P. M. P. GOUVEA; L. M. B. SOARES; J. M. B. PEREIRA; F. C. FÁVERO; A. M.B. BRAGA; P. P. MUHORAY; A. C. BRUNO; I. C. S. CARVALHO. In-fiber Fabry-Perot interferometer for strain and magnetic field sensing. OPTICS EXPRESS, v. 24, p. 14690-96, 2016.

[4] M.M. WERNECK; R. N. LOPEZ; G.K.B. COSTA; D. M. C. RODRIGUEZ; A. S. ARCAS; V. M. QUEIROZ; F. S. Dutra; R. C. ALLIL. POF Biosensors Based on Refractive Index and Immunocapture Effect. 1. ed. Spain: Springer Verlag, v. 21. 20-40p, 2016.

[5] Plastic Optical Fiber: Eska Optica Fiber Division. Marketed and Sold By Mitsubishi International Corporation, 2010. 1 p. Disponível em:  
<[http://fiber opticpof.com/pdfs/Plastic\\_Fiber\\_Optics\\_&\\_Cable/ESKA\\_CK\\_Fiber\\_Optics\\_Illuminati on/CK\\_40\\_Product\\_Information.pdf](http://fiber opticpof.com/pdfs/Plastic_Fiber_Optics_&_Cable/ESKA_CK_Fiber_Optics_Illuminati on/CK_40_Product_Information.pdf)>. Acesso em: 18 mar. 2019.

[6] A. A. LEITHOLD. Tabela de cabos coaxiais. 2009. 6 p. Disponível em:  
<[https://sites.google.com/site/angeloleitholdpy5aal/home/pesquisas/wikipdia-edies-angeloleithold-at-2011/antenas-1/angelo-antonio-leithold-tabela-de-cabos-coaxiais-em\\_html](https://sites.google.com/site/angeloleitholdpy5aal/home/pesquisas/wikipdia-edies-angeloleithold-at-2011/antenas-1/angelo-antonio-leithold-tabela-de-cabos-coaxiais-em_html)>. Acesso em: 18 mar. 2019.