



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Bernadin Pinqière

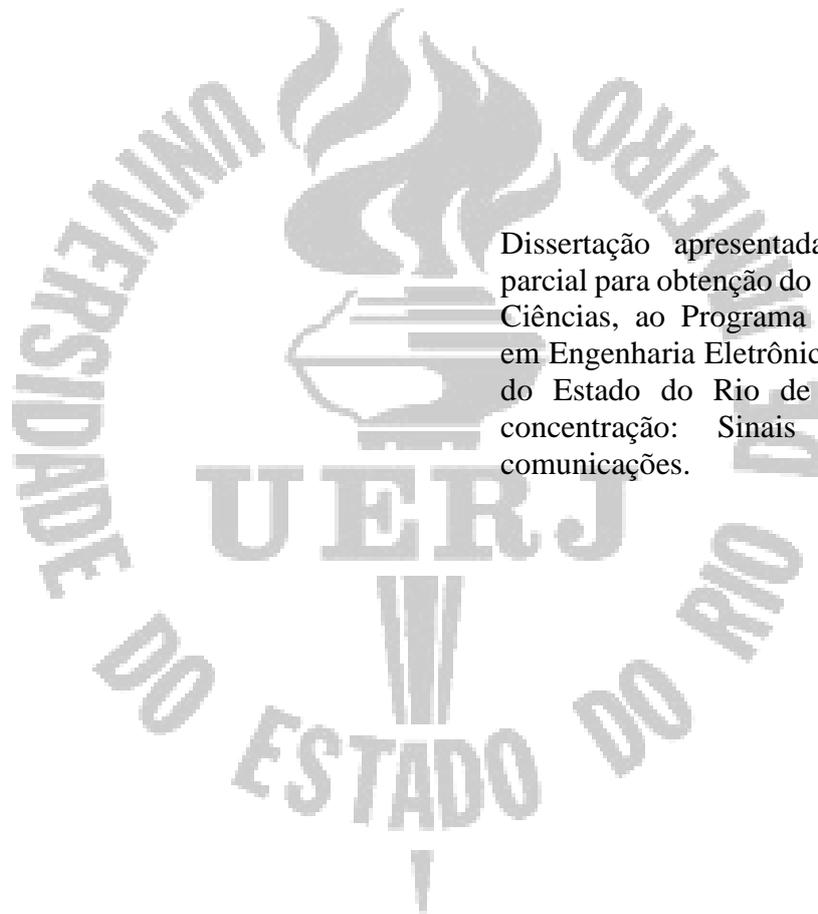
**Simulação de sistema de modulação de fase utilizando fibras ópticas
eletroopticamente modificadas pela técnica de *poling***

Rio de Janeiro

2020

Bernadin Pinquière

Simulação de sistema de modulação de fase utilizando fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica de *poling*



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e sistemas de comunicações.

Orientadores: Prof. Dr. Alexandre de Resende Camara
Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou

Rio de Janeiro

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

P657 Pinquière, Bernardin.
Simulação de sistema de modulação de fase utilizando fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica de poling / Bernardin Pinquière. – 2020.
73f.

Orientadores: Alexandre de Resende Camara, Michel Pompeu Tcheou.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Sistemas de transmissão de dados - Teses. 3. Fibras ópticas - Teses. 4. Moduladores (Eletrônica) - Teses. I. Camara, Alexandre de Resende. II. Tcheou, Michel Pompeu. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 621.39:535.399

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bernadin Pinquière

Simulação de sistema de modulação de fase utilizando fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica de *poling*

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sinais e Sistemas de Comunicações.

Aprovado em 12 de agosto de 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre de Resende Camara (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou (Orientador)
Faculdade de Engenharia - UERJ

Dr. Leonardo de Farias Araujo
Departamento de Física – PUC-Rio

Prof. Dr. Felipe da Rocha Henriques
CEFET - Petrópolis

Rio de Janeiro

2020

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a meu Pai, Delon Pinquière (*in memoriam*) por ter me dado a instrução necessária para eu chegar até aqui. Agradeço também a minha mãe, Bitholia Moise por seu amor, seu encorajamento e apoio constante que tem me dado força no meu caminho estudantil aqui no Brasil. Agradeço também a minhas irmãs Bernadette Pinquière, Deliane Pinquière, Nadège pinquière e Miguetty Pinquière pelos apoios contínuos. Agradeço também a meus familiares, por seus encorajamentos e apoios durante todo esse longo período de estudo.

Agradeço também a todos os amigos e colegas que tive oportunidade de conhecer durante esses períodos, por ter me encorajado e ajudado em cada etapa dessa caminhada.

Agradeço à Profa. Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho, da PUC-Rio por ceder parte dos equipamentos usados na parte experimental deste trabalho, bem como por permitir o uso do software COMSOL Multiphysics, usado na simulação do experimento.

Eu agradeço especialmente, ao meu Professor e orientador, Prof. Dr. Alexandre de Resende Camara, por sua plena dedicação na realização desse projeto e também por ter criado as condições necessárias para eu poder concluir esse projeto.

Quero agradecer também ao Prof. Dr. Michel Pompeu Tcheou, meu orientador pela sua contribuição e orientação na realização dessa dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

La persévérance, c'est ce qui rend l'impossible possible,
le possible probable et le probable réalisé.

Léon Trosky

RESUMO

PINQUIERE, B. *Simulação de sistema de modulação de fase utilizando fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica de poling*. 2020. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Este trabalho apresenta uma proposta para estudo das características de um canal de transmissão de dados feito com fibras ópticas modificadas eletroopticamente pela técnica de *poling*. Essa técnica é realizada para poder criar um coeficiente de não-linearidade não nulo aplicando simultaneamente um campo elétrico intenso e uma temperatura alta. Esse coeficiente é determinado pela mudança de fase interferência causada pela alta tensão no braço ativo do interferômetro, ou seja, a aplicação de tensão modula a fase da onda propagante. A primeira tentativa de realizar este estudo foi usando uma configuração experimental de um interferômetro Mach-Zehnder (MZI). Antes dos testes, um modulador comercial (OC-192, da JDS Uniphase) foi utilizado para calibrar o sistema. Em seguida, o modulador comercial foi substituído por uma fibra óptica modificada eletroopticamente. Devido à falta de equipamentos importantes, por exemplo, a falta de um amplificador elétrico que atinja 200 V e uma fonte de luz ASE (Emissão Espontânea Amplificada), a tentativa de estudar as propriedades desse sistema de modulação foi realizada através de simulações usando a plataforma COMSOL Multiphysics®. Foram utilizadas as características geométricas e ópticas de dois tipos de fibras reais (F051007-1C e SMF28) para construir o sistema MZI. Os resultados obtidos mostraram que não são esperadas alterações ou distorções nas ondas senoidais se a frequência delas for inferior a 10 GHz, o que é próximo ao valor teórico calculado para este sistema (9,1 GHz). Com base nesses resultados, concluiu-se que o modelo feito para a simulação do sistema experimental tem o potencial de ser uma ferramenta poderosa para realizar a estimativa de canal nesse tipo de sistema.

Palavras chaves: Fibras ópticas; Modulador; *Poling*; Mach-Zehnder; Estimativa de canal; Mudança de fase.

ABSTRACT

PINQUIERE, Bernadin. *Simulation of a phase modulation system using electrooptically modified optical fibers*. 2020. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

This work presents the study on the characteristics of a data transmission channel using optical fibers electrooptically modified by the poling technique. This technique is performed in order to create a non-zero non linearity coefficient by simultaneously applying an intense electric field and high temperature. This coefficient is determined by the change in phase of the interference caused by the high voltage in the active arm of the interferometer, i.e. the application of voltage modulates the propagating wave. The first attempt to perform this study was using an experimental setup of a Mach-Zehnder interferometer (MZI). Before the tests, a commercial modulator (OC-192, of JDS Uniphase) was used to calibrate the system. Then, the commercial modulator was replaced by an electrooptically modified optical fiber. Due to limitations in the available equipment, e.g, the lack of an electric amplifier that achieves 200 V and an ASE (Amplified Spontaneous Emission) light source, the attempt to study the properties of this modulation system was done through simulations using the platform COMSOL Multiphysics®. Here it was used the geometrical and optical features of two types of real fibers (F051007-1C and SMF28) to build the MZI system. The obtained results showed that no changes or distortions in the sinusoidal waves are expected if the frequency of the waves is below 10 GHz, which is close to the theoretical value calculated for this system (9.1 GHz). Based on these results, it was concluded that the model made for the simulation of the experimental system has the potential to be a powerful tool to perform the channel estimation in this type of system.

Keywords: Optical Fiber; Modulator; Interference; Mach-Zehnder; Poling; Channel estimation; Phase shift.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema básico de um sistema de comunicação óptico.....	16
Figura 2 - Histograma mostrando intensidade do tráfego de dados entre os anos de 2014 até 2019.....	17
Figura 3 - Esquema convencional de comunicação óptica.....	18
Figura 4 - Esquema de comunicação óptica usado no trabalho.....	18
Figura 5 - (a) Esquema experimental do Experimento de Young. (b) Representação geométrica para explicar seu resultado.....	31
Figura 6 - Esquema geométrico para explicar o Experimento de Young.....	32
Figura 7 - O Interferômetro de Michelson.....	34
Figura 8 - Padrões de interferência obtidos em um interferômetro de Michelson quando os espelhos estão alinhados (padrão circular) ou quando não estão perpendiculares entre si (padrão paralelo).....	34
Figura 9 - Esquema experimental do interferômetro Sagnac.....	35
Figura 10 - Esquema experimental do IMZ.....	36
Figura 11 - Esquema básico de um IMZ a fibra óptica.....	37
Figura 12 - Estrutura da cristalina e amorfa.....	39
Figura 13 - Início do processo do poling.....	40
Figura 14 - Campo elétrico (setas vermelhas) gravado após o processo do poling.....	41
Figura 15 - Esquema experimental para a demonstração do Efeito Kerr em fibras ópticas.....	44
Figura 16 – (a) Mudança de fase da luz versus tensão aplicada a fibra antes e depois do poling; (b) Mudança de fase da luz na região de $V_{app} = 0$ V.....	45
Figura 17 - Variação de fase para mesma variação de tensão senoidal antes e depois do poling.....	46
Figura 18 - Representação gráfica da modulação de fase.....	48
Figura 19 - Modulador Eletroóptico utilizado para calibração do interferômetro Mach-Zehnder.....	51
Figura 20 - Esquema experimental utilizado.....	52
Figura 21 - Resposta do sistema interferométrico à aplicação de tensão na forma (a) senoidal e (b) quadrada. Em ambos os casos, a frequência utilizada foi de 100 Hz.....	53
Figura 22 - Resposta dos sistema interferométrico à aplicação de tensão na forma quadrada nas frequências (a) 200 Hz e (b) 300 Hz.....	54

Figura 23 - Amplificador operacional inversor.	55
Figura 24 - Montagem do amplificador inversor com fator de ganho igual à 10.	55
Figura 25 - Sinais senoidais de entrada e saída vistos no osciloscópio.	56
Figura 26 - Sinais de entrada (curva amarela, $V_{pp} = 116 \text{ mV}$) e saída (curva azul, $V_{pp} = 9,60 \text{ V}$) do amplificador de fator de ganho igual à 100.	56
Figura 27 - Geometria do interferômetro Mack-Zehnder.	59
Figura 28 - Figura 2831: Seção transversal da fibra F051007-1C feita em um microscópio óptico.	61
Figura 29 – (a) Visão geral da geometria dividida nos elementos finitos. (b) Visão ampliada da região central da geometria.	62
Figura 30 - Respostas da aplicação de tensão senoidal ao braço ativo do interferômetro lidas no braço 3, nas frequências descritas na Tabela 3.	65
Figura 31 - Respostas da aplicação de tensão senoidal ao braço ativo do interferômetro, nas frequências descritas na Tabela 2, lidas no braço 4.	66

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Comparativo entre a atenuação de cabos coaxiais e fibras ópticas em diferentes taxas de transmissão de dados.	21
Tabela 2: Parâmetros característicos das fibras ópticas utilizadas no modelo.	60
Tabela 3: Parâmetros utilizados para determinar o intervalo de tempo entre medidas sucessivas em função da frequência da tensão aplicada aos eletrodos do braço ativo do interferômetro.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASE - *Amplified Spontaneous Emission*

BL - *Bit rate-length*

CATV - *Televisão por cabos*

dB - *Decibel*

dB/km - *Decibel/quilômetro*

Gbps - *Gigabits por segundo*

He-Ne - *Helium-neon*

Km - *Quilômetro*

LiNbO₃ - *Niobato de Lítio*

\vec{k} - *Vetor de onda em um meio*

k₀ - *Número de onda no vácuo*

l_c - *Comprimento de coerência*

Mbps - *Megabits por segundo*

mm - *Milímetro*

mV - *Milivolt*

ns - *Nanossegundo*

POF - *Plastic optical fibers*

\vec{P}_L - *Polarização linear*

\vec{P}_{NL} - *Polarização não-linear*

P.P.M - *Partes Por milhão*

V_{pp} - *Tensão senoidal da tensão*

V_π - *Tensão de meia onda*

W_c - Comprimento de coerência espacial

$\chi^{(2)}$ - Susceptibilidade elétrica de segunda ordem

δ - Diferença de fase

$\Delta\lambda$ - Largura de banda

λ - Comprimento de onda

μ_r - Permeabilidade magnética relativa

ϵ - Permissividade elétrica

ϵ_r - Permissividade elétrica relativa

ϵ_0 - Permissividade elétrica no vácuo

σ - Condutividade elétrica do material

ω - Frequência da luz

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	14
1	HISTÓRICO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS	20
1.1	Importância e aplicações das fibras ópticas no mercado de comunicações	20
1.2	Estado da Arte	22
2	TEORIA	26
2.1	Interferências de Ondas Eletromagnéticas	26
2.1.1	<u>Condições necessárias para que ocorra interferência</u>	28
2.1.1.1	Coerência.....	28
2.1.1.2	Polarização.....	29
2.2	Interferômetros	30
2.2.1	<u>Interferômetros de Divisão de Frente de Onda</u>	30
2.2.2	<u>Interferômetros por divisão de amplitude</u>	33
2.2.2.1	Interferômetro de Michelson.....	33
2.2.2.2	Interferômetro de Sagnac.....	35
2.2.2.3	Interferômetro de Mach Zehnder.....	36
2.3	Poling Térmico	37
2.3.1	<u>Os efeitos Kerr e Pockels</u>	42
2.3.1.1	Modulador eletroóptico.....	47
2.3.1.2	Atraso de onda.....	48
3	CONSTRUÇÃO DO INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER	51
4	O MODELO COMPUTACIONAL	58
4.1	<u>Funcionamento do COMSOL Multiphysics®</u>	58
4.2	<u>Modelagem do modulador óptico usado no programa</u>	60
4.3	<u>Resultados e Discussões</u>	62
5	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	72

INTRODUÇÃO

O uso da luz para a comunicação entre pessoas é amplamente difundido hoje em dia, sobretudo nos países tecnologicamente mais desenvolvidos. Entretanto, está longe de ser algo recente. Desde os tempos mais remotos, algumas civilizações usaram espelhos, fogo, sinais de fumaça para transmitir uma única informação. O meio de comunicação mais frequentemente usado pelos gregos era o de mensageiros, que percorriam dezenas de quilômetros para entregar informações importantes (HECHT, 2005).

Em 1794, o engenheiro francês Claude Chappe inventou o telegrafo óptico, sendo este um dos primeiros sistemas de comunicação moderna. Esse primeiro telégrafo óptico foi usado para ligar Paris e Lille, duas cidades francesas separadas por uma distância de 200 km. Isso foi considerado como um grande avanço. Porém, alguns obstáculos como a complexidade da rede, ou tempestades impediram o bom funcionamento do sistema (HRAGHI,2017).

Em seguida, outras invenções permitiram a transmissão de informações de forma ainda mais rápida, como, por exemplo, o telégrafo elétrico. Isso permitiu aumentar a velocidade de transmissão com novas técnicas de codificações, como, por exemplo, o Código Morse. A partir disso, as comunicações de longas distâncias começaram (BILLARD, 1966) a ser executadas com experiência do cabo telegráfico transatlântico, em 1806.

Alguns anos mais tarde, em 1876, acontece a invenção do telefone, que usou técnicas de transmissões analógicas variando corrente elétrica. Essa técnica dominou o sistema de comunicação por um século. Em seguida, a substituição dos pares de cobre pelo sistema de cabo coaxial aumentou consideravelmente a capacidade do sistema (BILLARD, 1966).

O primeiro sistema de cabo coaxial foi experimentado em 1940. Esse sistema apresentou limitações, por exemplo, uma alta perda. Um cabo coaxial que transmite pelo espaço livre, operando em 5GHz pode apresentar perda superior a 100dB/km. Um outro sistema de comunicação importante a destacar é o sistema de microondas. O primeiro sistema de microondas entrou em operação em 1948 com uma frequência de portadora de 4GHz (HRAGHI,2017). Nos sistemas radioelétricos da faixa de microondas, com antenas parabólicas de alto ganho, a perda por quilômetro é menor do que nos sistemas a cabos coaxiais. Desde então, os sistemas que usam cabos coaxiais e microondas foram desenvolvidos consideravelmente até conseguirem operar a uma taxa de bits de até 100Mb/s.

Ao longo do século 20, por meio de novas técnicas científicas, novos sistemas de comunicações foram descobertos. Entre eles se podem citar o desenvolvimento da informática, o desenvolvimento do laser, das fibras ópticas e componentes optoeletrônica. Em

1966, com Charles Kao, a invenção da estrutura de guia de ondas revestida conduziu às primeiras propostas sérias tratando-se do uso de fibras ópticas em um sistema de comunicação mesmo com perdas superiores 1000 dB/km. Essa proposta estimulou muitos esforços para reduzir a atenuação pela purificação do material. Assim, pode-se ver a utilidade do parâmetro de perda no desempenho de um sistema de Telecomunicações. Na década de 1960, essas perdas chegaram a exceder até 1000 dB/km (CAMARA,2015). Uma década depois, observaram-se perdas mais baixas na faixa de 20 dB/km na região de comprimento de onda perto de 1 μ m. Um outro exemplo é o laser semiconductor que gera um impulso luminoso com comprimento de onda de 1,3 μ m modulado por uma fonte cuja taxa não excede 5 Gbps (MYRÉN,2003).

O surgimento dos amplificadores ópticos em escala permitiu um grande avanço para o sistema de comunicações ópticas. Inicialmente, os sistemas ópticos utilizavam repetidores eletrônicos que recuperavam o sinal (TRONCO; AVILA, 2007). O funcionamento destes repetidores consiste em converter o sinal óptico para sinal elétrico. Como o repetidor conseguia recuperar o sinal e aumentar a distância, ele é considerado eficiente.

Além dos já citados, não se pode esquecer as comunicações via satélite (RODRIGUES, 2009). Se por um lado, os grandes custos que requerem a elaboração de satélites limitam esta tecnologia ao público, por outro, com a invenção do laser semiconductor, foi possível desenvolver fibras ópticas capazes de transmitir feixes de luz de lasers em longas distâncias. Esta tecnologia de comunicação sobre fibras ópticas é usada hoje em dia pelas empresas de telefonia para interligar as cidades e também os continentes. Quando se analisa o aspecto de custo em termos de infraestrutura, do processo de instalação e manutenção, por exemplo, a Internet, a comunicação via satélite fica atrás da fibra óptica. Assim, hoje em dia, as fibras ópticas são instaladas nas nossas casas (YU, 2015), representando um grande avanço nos sistemas de telecomunicação na medida que contribui em facilitar a comunicação entre as pessoas de forma rápida e eficaz.

Em função, desse avanço o sistema de comunicação óptica se torna um meio de comunicação muito usado no nosso dia a dia. Portanto é importante entender como é composto um sistema de comunicação óptico.

Um sistema de comunicação consiste em transmitir informação de um lugar para outro. Ele é definido por três parâmetros fundamentais: um emissor, a informação a ser transmitida e um receptor. A informação é transmitida por meio de um código que contém um significado e que descreva a informação na onda caracterizada por elementos como intensidade, amplitude, frequência, fase e polarização (AGRAWAL, 2014). Quando a portadora de sinais

diz respeito a ondas eletromagnéticas no espectro óptico, trata-se de sistema de comunicação óptica. A Figura 1 mostra um digrama de blocos que resume o funcionamento de um transmissor óptico. Esse bloco consiste em uma fonte óptica (por exemplo, um laser de diodo), um modulador e um acoplador de canal. O laser semiconductor ou um laser de diodo é usado como fonte óptica por causa de sua compatibilidade com um canal de comunicação de fibras ópticas.

Figura 1 - Esquema básico de um sistema de comunicação óptico.



Fonte: O AUTOR, 2020.

O sistema de comunicação óptica mostrado na Figura 1 é composto por elementos como uma fonte de informação que gera as mensagens a serem transmitidas, o transmissor óptico que acopla a mensagem a um meio de transmissão, o receptor que recebe as mensagens e entregá-los ao destinatário e enfim o canal que é o meio que conecta o transmissor ao receptor.

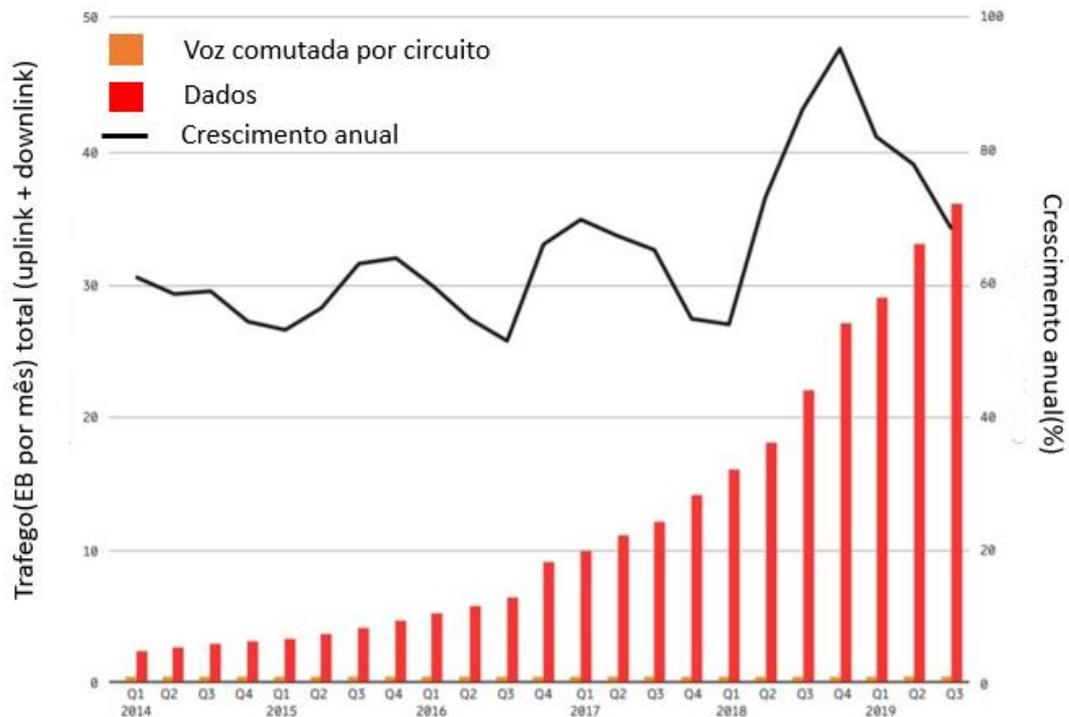
Um dos motivos principais de uso de sistema de comunicações ópticas é o fato que ele permite atingir uma alta taxa de bits, o que é um fator muito importante para os sistemas de comunicações. Os sistemas de telecomunicações com altas taxas de bits não transmitem somente a voz, mas também imagens e vídeos.

A Figura 2 apresenta a evolução do tráfego mensal de voz e dados nas redes móveis entre os anos de 2014 e 2019 (ERICSSON, 2019). Particularmente, a parte vermelha do gráfico representa o crescimento trimestral dos dados, o que explica o desenvolvimento e o uso de sistema da alta taxa de transmissão em sistema de comunicação usando fibras ópticas.

A quantidade exorbitante de dados transmitidos atualmente depende, principalmente, da eficiência e flexibilidade do meio em que as informações são transportadas além de sua capacidade em suportar conexões com variadas taxas e larguras de banda. Desta forma, as comunicações são realizadas de forma óptica, através das ondas eletromagnéticas, cujas frequências estão compreendidas na faixa de Megahertz e Terahertz (HRAGHI, 2017). O sistema de comunicação óptica mais comum é o que utiliza fibras ópticas, que compreendem

a faixa de Terahertz (alta frequência) na região do infravermelho do espectro eletromagnético.

Figura 2 - Histograma mostrando intensidade do tráfego de dados entre os anos de 2014 até 2019.



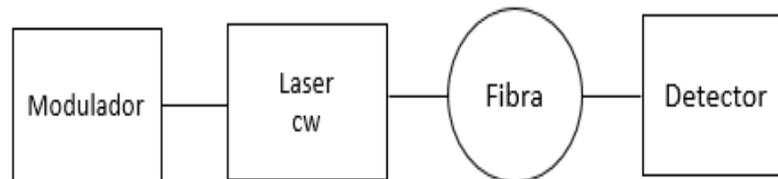
Fonte: <https://www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf>

As comunicações ópticas representam um grande avanço, não só pelas dimensões (micrométricas) do sistema, mas também pela enorme capacidade de transmissão de dados atualmente alcançada. Como comparativo, enquanto na tecnologia de cabos coaxiais o produto taxa de *bits*-distância (*bit rate-length*, BL) era de cerca de $10^4 \frac{\text{bits}}{\text{s}} \cdot \text{km}$, a adoção da tecnologia de fibras ópticas fez com que essa figura de mérito subisse para cerca de $10^9 \frac{\text{bits}}{\text{s}} \cdot \text{km}$ por volta da década de 1980. Estima-se que hoje, graças a adição de amplificadores ópticos ao sistema, bem como a evolução na fabricação de portadores e receptores seja superior à $10^{15} \frac{\text{bits}}{\text{s}} \cdot \text{km}$ (AGRAWAL, 2014).

O objetivo desse trabalho consiste em estudar a fibra óptica eletroopticamente modificada por *poling* como meio de transmissão mapeando sua característica no domínio da frequência. No entanto, diferentemente de um sistema de comunicação óptica convencional, onde a

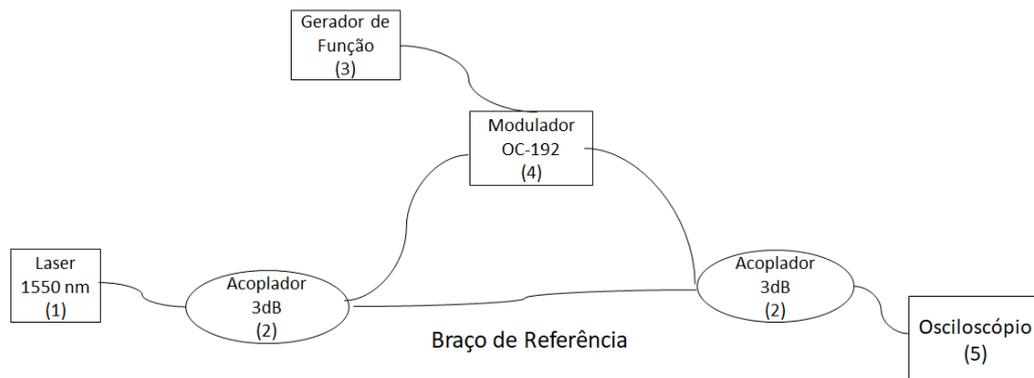
modulação é realizada na fonte, no modelo que é proposto nesse trabalho, o esquema do sistema apresenta uma modulação que ocorre diretamente na fibra. As Figuras 3 e 4 apresentam respectivamente o esquema convencional de um sistema de comunicação óptica e o sistema de comunicação proposto no trabalho.

Figura 3 - Esquema convencional de comunicação óptica



Fonte: O AUTOR, 2020

Figura 4 - Esquema de comunicação óptica usado no trabalho



Fonte: O AUTOR, 2020

No sistema da Figura 3, a modulação é realizada na fonte. O sinal que sai do laser passa pela fibra e é detectada na saída. Por sua vez, na Figura 4 que representa o modelo proposto, a modulação é realizada diretamente sobre a fibra. As funções de cada bloco desse esquema são explicadas mais detalhadamente no capítulo 3.

A aplicação do modelo proposto traz alguns benefícios bem significativos em relação ao sistema padrão. Um primeiro benefício que pode ser citado é que esse modelo permite aumentar a capacidade do sistema. Como nesse sistema, a modulação pode ser realizada diretamente na luz, é possível aplicar altas frequências. Isso facilita consequentemente o aumento da capacidade do sistema. Em seguida, pode se citar uma segunda vantagem que é a redução do custo do sistema. Ainda, por causa da possibilidade de fazer a modulação diretamente na luz, contrário ao sistema convencional, o uso de eletrônica pode ser desprezado nesse modelo, o que permite também o custo bem menor. Finalmente, o terceiro benefício a ser considerado é a possibilidade de reduzir o tamanho do sistema. É possível colocá-lo, por

exemplo, em uma pequena caixa (do tamanho de uma caixa de bombons). Isso permite, portanto, a construção de um sistema bem mais barato.

Segundo algumas literaturas, (MORAIS, 2003), (MYRÉN, 2005), (MYRÉN; MARGULIS, 2005) as fibras ópticas modificadas via *poling* térmico podem ser usadas como um eficiente canal de transmissão de dados. Entretanto, ainda não foi feito nenhum estudo mais profundo sobre as limitações em frequência que estes canais de transmissão que utilizam fibras ópticas modificadas por *poling* (também chamadas de “fibras *poled*”) têm. Portanto, nesse trabalho como foi mencionado anteriormente, um espaço significativo é atribuído a importância de tentar considerar as frequências para transmissão usando fibras ópticas modificadas por *poling*.

Esta Dissertação de Mestrado mostra as etapas realizadas na tentativa de se estudar as características de um canal de transmissão de dados feito utilizando fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica de *poling* térmico. O Capítulo 1 mostra a importância, as aplicações das fibras ópticas e os trabalhos já realizados sobre as fibras ópticas modificadas por *poling*. O Capítulo 2 trata da parte teórica que embasa o trabalho, mostrando, em detalhes, o fenômeno da interferência de ondas eletromagnéticas e como a técnica do *poling* térmico funciona. Na sequência, o Capítulo 3 mostra o sistema interferométrico que foi montado para tentar fazer o estudo do canal e os resultados obtidos. No Capítulo 4 é mostrada a tentativa da construção de um modelo para simular o experimento descrito no capítulo anterior feito através do Método dos Elementos Finitos e os respectivos resultados. Finalmente, o Capítulo 5 mostra as conclusões e perspectivas futuras deste trabalho e, finalizando este documento, estão as referências bibliográficas.

1 HISTÓRICO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Nesse capítulo serão apresentados numa primeira seção a importância e as aplicações das fibras ópticas no mercado de comunicação. Em seguida, serão apresentados alguns trabalhos realizados sobre as fibras ópticas modificadas por *poling*.

1.1 Importância e aplicações das fibras ópticas no mercado de comunicação

As comunicações ópticas possuem um vasto mercado. Um deles é o mercado de Telecomunicações quando se refere às redes telefônicas mundiais que existem e que são usadas para transmitir não somente sinais de voz, mas também dados de computador. Há uma forte tendência a usar cabos ópticos no atendimento às grandes empresas tais como Banco do Brasil, Unibanco e Shell que são atendidas por cabos ópticos com fibras destinadas para elas. Esse mercado se torna cada vez mais competitivo em relação ao dos cabos coaxiais. Por exemplo, com a introdução da rede óptica a grande escala em Telecomunicações, alguns defeitos encontrados na rede convencional como diafonia, baixa isolamento não se aplica a cabos ópticos sem esquecer que graças a grande capacidade de transmissão por fibras, um mesmo cabo pode ser reutilizado. Apesar das vantagens de usar a fibra óptica, os cabos coaxiais ainda são usados devido a sua facilidade de instalação. Por exemplo, é fácil de se conectar e expandir o cabo coaxial devido a sua flexibilidade (AGRAWAL, 2006).

Em relação a outros meios físicos de transmissão, as fibras ópticas apresentam algumas vantagens. Primeiramente, as fibras são fabricadas principalmente a partir de sílica (SiO_2 , dióxido de silício) e, para algumas aplicações bastante específicas, de plástico (POF, *plastic optical fibers*) (ARCAS, 2018). Por conta da abundante oferta desses materiais, o custo de produção da fibra óptica é significativamente mais baixo que o do cobre e dos outros materiais constituintes dos cabos coaxiais. Outra vantagem do uso das fibras ópticas em telecomunicações é que elas apresentam baixa atenuação. Com isso, durante a transmissão dos dados, há pouca distorção de informação. Isto permite a construção de um sistema de menor custo devido à economia feita pela menor necessidade de uso de repetidores regeneradores de sinal (AGRAWAL, 2014). Um comparativo entre a atenuação em cabos coaxiais e em fibras ópticas pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 - Comparativo entre a atenuação de cabos coaxiais e fibras ópticas em diferentes taxas de transmissão de dados.

Meio de Transmissão	Perdas na frequência equivalente à metade da taxa de transmissão (dB/km)		
	1,54 Mbps	6,312 Mbps	44,736 Mbps
Cabo coaxial de 0,95 mm de diâmetro	2,1	4,5	11
Fibra Óptica	3,5	3,5	3,5

Fonte: Adaptado de

https://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/Vantagensedesvantagensdasfibras.html

Além da baixa atenuação, as fibras são imunes a interferências eletromagnéticas e ruídos, não há possibilidade de faíscas ou curtos-circuitos em caso de rompimento e há a possibilidade de ampliação de banda sem a necessidade de quaisquer adaptações do sistema (por meio da multiplexação por comprimento de onda, por exemplo). Apesar de serem muito frágeis e apresentarem altas perdas quando o sistema é ramificado, ainda é altamente vantajosa a substituição de sistemas que usam cabos coaxiais por sistemas à fibra óptica (PEREIRA, 2008), (WIRTH, 2004).

Os sistemas de comunicações por fibras ópticas são utilizados em diversas áreas. Como primeiro exemplo, pode-se citar a rede telefônica. Nesta área, a fibra óptica é usada na interligação de centrais telefônicas urbanas (TRONCO; AVILA, 2007). Estas centrais não necessitam de longas distâncias, mas as fibras entram como forte opção porque possuem uma grande banda passante que lhes permite atender uma demanda crescente de serviços. Outra área importante é a rede digital de serviços integrados. Essa área pode ser entendida como um tipo de rede telefônica de comutação de circuitos que permite acessar redes de comunicações de pacotes. Ele é geralmente usado para transmissão digital de voz e dados sobre fios telefônicos de cobre. Ele oferece uma qualidade de voz muito melhor que o que pode fornecer um sistema analógico. Graças a sua grande capacidade de transmissão, as fibras ópticas podem suportar novos serviços de transmissão oferecidos pela rede digital de serviços integrados. Porém, a área precisa ainda ser bem dominada pelas fibras devido ao seu custo alto. As fibras ópticas também encontram aplicações em áreas como televisão por cabos (CATV). Esse interesse da fibra óptica para esse sistema pode ser explicado por sua grande capacidade de

transmissão e seu longo alcance sem repetidores. Para o mesmo sistema com cabos coaxiais, há necessidade de uma distância bem menor entre os repetidores (~1 km) por causa dos ruídos.

As fibras ópticas são também usadas em sistemas de sensores que podem ser aplicados na indústria, na medicina, por conta de suas dimensões micrométricas (TRONCO; AVILA, 2007), (ARMITAGE; LOHMANN, 1965). Na área da indústria, a fibra é usada, devido à sua resistência à diferentes condições físicas (PEREIRA, 2008). Mais uma aplicação é a área da medicina, onde há o uso do dispositivo *Fiberscope* para a observação e a iluminação do interior do corpo humano. Por fim, para a indústria automobilística, as aplicações se encontram no centro do motor e da transmissão (AGRAWAL, 2014). Dentre todas elas, a aplicação que foi explorada neste trabalho é a de sistemas de comunicações ópticas.

1.2 Estado da Arte

As fibras ópticas utilizadas na transmissão de informação via modulação de luz não têm as mesmas características de uma fibra óptica padrão, utilizadas nas redes de telefonia e Internet. Como os materiais feitos de fibras possuem uma estrutura atômica amorfa e anisotrópica que apresentam simetria de inversão, eles não apresentam efeitos ópticos não-lineares de segunda ordem uma vez que a susceptibilidade elétrica de segunda ordem $\chi^{(2)}$ é numericamente nula (MORAIS, 2003). Um exemplo de material com essa característica é a fibra óptica feita de sílica. A aplicação da técnica *poling* permite justamente quebrar a simetria de inversão desses tipos de materiais fazendo com que $\chi^{(2)}$ seja diferente de zero.

Desde a primeira observação da geração de segundo harmônico em fibras (MARGULIS *et al*, 2006), (TARASENKO; MARGULIS, 2007), tem havido muito interesse no processo de aplicação do *poling* em fibras para criar um coeficiente eletroóptico linear residual (MYRÉN *et al*, 2004). A maior parte dos trabalhos sobre *poling* em fibras ópticas envolve a aplicação de alta temperatura e alta tensão. Esta técnica, conhecida como *poling* térmico, é considerada a mais confiável e reprodutível para induzir uma não-linearidade de segunda ordem relativamente grande.

Dentre todos os importantes trabalhos encontrados (AN; FLEMING, 2007) (KIM, 2006) (MYRÉN, 2005) na literatura na intenção de aumentar o entendimento sobre os efeitos relacionados aos moduladores ópticos e principalmente os moduladores usando fibras ópticas eletroopticamente modificadas, alguns tiveram mais destaques no nosso trabalho em termos de proximidade ao assunto tratado.

Primeiramente, um trabalho que abordou a questão de *poling* que pode ser citado é um

trabalho no qual o objetivo é tentar criar uma não-linearidade de segunda ordem alta em fibra óptica com dois buracos com o núcleo no centro dos buracos. A fibra óptica usada nesse processo foi fabricada pelo método de deposição de vapor química modificada. Durante o experimento foram aplicadas uma temperatura de 320°C e uma tensão de 3,5 kV. Essa alta temperatura maior do normal (280°C) e alta tensão foi aplicada para poder acelerar o processo do *poling* (AN; FLEMING, 2007). O estado da fibra poled foi avaliada para diferentes períodos de tempo. Para um período de 10 minutos, foi observado que a camada de não-linearidade não atingiu o núcleo da fibra. Porém, num período de 40 minutos, a camada de não-linearidade moveu-se para o catodo, mas permaneceu confinada à uma camada estreita necessária para garantir que o campo elétrico congelado dentro desta região ainda seja suficientemente alto. Uma característica que chamou atenção é que apesar de que a camada de não-linearidade não atravessa toda região, o núcleo da fibra possui sinais de segundo harmônico. Isso se explica pela mobilidade dos íons de Na^+ e H^+ dentro da região do núcleo. Foi mostrado que um núcleo de fibra localizado no centro dos dois buracos dos eletrodos pode ser termicamente poled de forma eficaz. O valor máximo medido de não-linearidade dentro do núcleo foi medido para 0.26pm/V *poling* (AN; FLEMING, 2007). Em um tempo ainda maior de 60 minutos, foi verificado que a camada de não-linearidade quase atingiu o centro dos eletrodos e a não linearidade ficou mais baixo. A não-linearidade obtida fora do núcleo foi medido a 0.13 pm/V e dentro do núcleo, foi medido à 0.17pm/V. Em conclusão, foi notado que a grande distância entre o buraco do anodo e o núcleo da fibra deve permite diminuir a interação entre o núcleo e os eletrodos metálicos e assim minimizar a perda linear das fibras poled, o que torna tal fibra mais preferível às utilizadas anteriormente (onde os núcleos da fibra eram mais próximos do buraco do ânodo (AN; FLEMING, 2007). Como a distância entre o núcleo da fibra e o ânodo é grande, a interação entre o modo principal e os eletrodos de metal, a perda linear das fibras modificadas por *poling* diminuiu. No final, esta fibra mostrou alguma preferência em relação às fibras em que os núcleos estão mais próximos de buraco de ânodo.

Um outro trabalho que merece ser citado entre os relatórios sobre o *poling* é um trabalho onde foi aplicada a modulação em uma fibra eletroóptica com eletrodos internos de Pb-Sn (KIM, 2006). A característica dessa modulação foi explicada por um retardo de fase que é induzido por um campo elétrico devido ao Efeito Kerr eletroóptico dependente da polarização. O Efeito Kerr se trata de um Efeito eletroóptico que consiste em variar o índice de refração de um material com os campos elétricos intensos para obter uma mudança de fase. Esse conceito será abordado mais profundamente no capítulo 2. Essa mudança de fase foi medida por meio

de uma fonte incoerente e é causada pela variação do índice de refração (KIM, 2006). Para caracterizar o efeito eletroóptico da fibra, campo elétrico induziu uma mudança de fase em um interferômetro Mach-Zehnder. Por fim, foi observada uma diferença no nível da não-linearidade de segunda ordem entre as direções polarização TE e TM ao aplicar uma tensão DC de 6,5 kV.

Em 2005, um grupo de pesquisa sueco mostrou que era possível transmitir um filme ligando um leitor de DVD diretamente aos eletrodos criados em fibras ópticas microestruturadas que passaram por uma modificação eletroóptica através da técnica chamada *poling* térmico (MYRÉN; MARGULIS, 2005). Neste caso, a fonte de luz era um laser contínuo de comprimento de onda $\lambda = 1550$ nm que se propagava por um sistema interferométrico do tipo Mach-Zehnder (HECHT, 2005). Quando o leitor de DVD é ligado aos eletrodos da fibra, os sinais elétricos enviados por ele modulam a luz que está se propagando na fibra que constitui o braço ativo do interferômetro. Este sinal modulado interage com o sinal de referência gerando um padrão de interferência que é demodulado na saída do sistema por um fotodiodo ligado a uma televisão, onde era possível ver o filme. A conclusão que se chegou neste trabalho é que as fibras ópticas modificadas via *poling* térmico podem ser usadas como um eficiente canal de transmissão de dados. Entretanto, não foi feito nenhum estudo mais profundo sobre as limitações em frequência que estes canais de transmissão que utilizam fibras ópticas modificadas por *poling* têm.

A fibra modificada por *poling* se encontra em mais um trabalho que consiste em descrever um laser de anel baseado em uma fibra óptica a 980 nm. No processo, o modulador é inserido na cavidade para que a transmissão possa ser modulada aplicando uma tensão ao dispositivo. É a primeira vez que uma fibra modificada por *poling* é usada para modular um laser e nesse regime o laser produz pulsos abaixo de nanossegundos (MYREN, 2005). Foi também mostrado nesse trabalho que o modulador de fibra modificada por *poling* possui picos de transmissão que podem ser ajustados em 4 nm aplicando 200 V.

Por fim, em 2013, Marcelo Graziosi desenvolveu, pelo Royal Institute of Technology KTH seu trabalho de Mestrado sobre o sensor baseado nas fibras *poled* medindo tensão na faixa de quilovolts. Seu trabalho deu ênfase à possibilidade da fibra modificada por *poling* ser usada como elemento de detecção devido à fato que ele funciona como modulador de fase quando um campo elétrico é aplicado. Então, uma fibra modificada por *poling* de 1,2m foi inserida em um interferômetro de Sagnac (GRAZIOSI, 2013) para detectar sinal de tensão aplicada. Foram realizadas várias medidas para valores de frequências e de amplitude de tensão diferentes. A caracterização de parâmetros como a susceptibilidade não-linear de segunda

ordem, χ^2 e da tensão de meia onda, V_π foi apresentada (GRAZIOSI, 2013). A tensão senoidal com $V_{pp} = 170$ V e $f = 50$ Hz é aplicada através da fibra sem deixar contato com os eletrodos dentro da fibra e no final foi possível medir uma modulação óptica criada pelo campo elétrico gerado. Foi observada uma instabilidade do sistema que se expressa pela diferença dos resultados obtidos das medidas em momentos diferentes pelo mesmo valor de tensão aplicada em repetir o experimento. Um pequeno movimento da fibra modificada por *poling* provoca uma mudança na saída. Nesse contexto, a fibra pode ser colocada à uma placa aterrada e a placa usada para o *poling* pode ser usada como placa aterrada no interferômetro Sagnac, onde uma placa é alimentada e colocada no topo da fibra modificada por *poling* para aplicar o campo externo para as medições. Os resultados encontrados desse experimento são explicados mais detalhadamente do capítulo 2.

Depois de entender as aplicações de fibras ópticas no mercado e apresentar alguns trabalhos onde o *poling* foi aplicado para induzir o coeficiente de não-linearidade, é importante entender a física que está por trás da técnica *poling*. Nessa seção, será apresentada a teoria física em que se baseia essa técnica.

2 TEORIA

Para aumentar o entendimento do que foi feito e dos componentes e sistemas utilizados neste trabalho, faz-se necessária uma breve revisão sobre alguns pontos de Óptica básica. Como será mostrado em capítulo 3, o sistema que, em um primeiro momento, foi montado em laboratório, e em um segundo momento (devido a alguns problemas que serão listados posteriormente), foi simulado utilizando a Plataforma COMSOL Multiphysics[®], está baseado em um interferômetro Mach-Zehnder cujo braço ativo é a fibra óptica modificada por *poling*. Sendo assim, é preciso, inicialmente, uma revisão do fenômeno de interferência de ondas eletromagnéticas.

2.1 Interferência de Ondas Eletromagnéticas

Antes de entrar mais profundamente nas teorias sobre os fenômenos das ondas eletromagnéticas, é necessário entender sua importância no trabalho. Trata-se, então de uso de interferômetro, particularmente o interferômetro Mach-Zehnder que é um dispositivo que usa os fenômenos de interferência para realizar seus estudos. Durante as simulações realizadas a partir desse interferômetro, experiências relacionadas a interferências serão realizadas. Além disso, os fenômenos de interferência são elementos presentes nos estudos de ondas eletromagnéticas.

Vamos considerar duas fontes pontuais, S_1 e S_2 , de ondas monocromáticas em um meio homogêneo. Essas duas fontes são separadas por uma distância que é supostamente maior do que o comprimento de onda λ . Essas ondas são consideradas polarizadas linearmente e são definidas matematicamente como (HECHT,2005):

$$\vec{E}_1(z, t) = \vec{E}_{01} \cos(kz - \omega t + \phi_1) \quad (1)$$

$$\vec{E}_2(z, t) = \vec{E}_{02} \cos(kz - \omega t + \phi_2) \quad (2)$$

onde E_{01} e E_{02} são, respectivamente, as amplitudes das ondas provenientes de S_1 e S_2 , $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ é o número de onda, $\omega = kv$ é a frequência angular, v é a velocidade da luz no meio homogêneo, ϕ_1 e ϕ_2 são as fases iniciais e, z e t são, respectivamente, as variáveis espacial e temporal.

Quando \vec{E}_1 e \vec{E}_2 são lançadas no mesmo ponto do espaço, a onda resultante, calculada através do Princípio da Superposição (HECHT,2005), é dada por:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (3)$$

Como tratam-se de ondas eletromagnéticas cujas frequências são da ordem de 10^{14} Hz a 10^{15} Hz, a determinação do valor exato do módulo de \vec{E} torna-se inviável, na prática. Sendo assim, é mais usual medir a intensidade da onda \vec{E} . Por definição, a intensidade de uma onda é dada por (HECHT, 2005):

$$I = \langle \vec{S} \rangle_T \quad (4)$$

onde $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ é o Vetor de Poynting e a representação $\langle \vec{S} \rangle_T$ trata da média temporal do Vetor de Poynting. Sabendo que, para ondas planas, $\vec{H} = \frac{\vec{E}}{c\mu_0}$, onde c é a velocidade da luz no vácuo e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo, chega-se a conclusão de que:

$$I = \langle |\vec{E}|^2 \rangle_T \quad (5)$$

Substituindo-se (3) em (5) temos:

$$\langle |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 \rangle_T = \langle |\vec{E}_1|^2 \rangle_T + \langle |\vec{E}_2|^2 \rangle_T + 2 \langle \vec{E}_1 \vec{E}_2 \rangle_T \cos \delta \quad (6)$$

$$I = I_1 + I_2 + 2I_{12} \cos \delta \quad (7)$$

onde I_1 e I_2 são as intensidades das ondas \vec{E}_1 e \vec{E}_2 e δ é a diferença de fase entre elas.

A equação (7) é conhecida como a equação de interferência. O termo de interferência, $2I_{12} \cos \delta$, pode ser positivo ou negativo. Se $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \dots$, temos:

$$I = I_1 + I_2 + 2I_{12} \quad (8)$$

onde I é a intensidade total que atinge seu valor máximo e a interferência é dita totalmente construtiva. Por outro lado, caso $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \dots$, temos que:

$$I = I_1 + I_2 - 2I_{12} \quad (9)$$

onde I atinge seu valor mínimo e a interferência é dita totalmente destrutiva. Para outras diferenças de fase, a interferência é dita parcialmente construtiva. Em um caso particular, se $I_1 = I_2 = I_0$:

$$I = I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (10)$$

Caso as ondas estejam em fase, ou seja, $\delta = 0$, $I = 4I_0$. Isso significa que a intensidade total é 4 vezes maior que a intensidade de cada uma das ondas superpostas. Quando $\delta = \pm\pi$, a intensidade total é $I = 0$. Quando $\delta = \pm\pi/2, \pm 3\pi/2, \dots$, o termo de interferência desaparece e $I = 2I_0$, o que significa que a intensidade total é a soma das intensidades constituintes.

O uso do interferômetro no trabalho leva a estudar e entender melhor a teoria sobre o fenômeno de interferência. Para isso, foram consideradas duas ondas, que, quando vão no mesmo ponto do espaço, apresentam, uma onda resultante encontrada através do princípio da superposição. Dessa forma, como pode-se observar esse fenômeno? Existem algumas características que condicionam a ocorrência desse fenômeno.

2.1.1 Condições necessárias para que ocorra interferência

Algumas condições fundamentais para que o fenômeno de interferência possa ser observado. É necessário que os feixes que interagem sejam coerentes e polarizados. A seguir, serão brevemente discutidas essas duas propriedades.

2.1.1.1) Coerência

Dois feixes luminosos são ditos coerentes quando a diferença de fase entre eles permanece inalterada. A coerência é fundamental para o fenômeno da interferência pois, de acordo com a equação (6), o termo de interferência $\langle E_1 E_2 \rangle_T$ é a média efetuada durante o período de observação da função temporal que descreve as ondas eletromagnéticas em questão. Se \vec{E}_1 e \vec{E}_2 não tiverem uma diferença de fase constante, o termo de interferência tem valor nulo. Como o argumento de fase é dependente do espaço e do tempo, dois são os tipos de coerência possíveis (HECHT, 2005):

- i) Coerência temporal: Esta característica fornece a ideia de quão monocromática é a fonte luminosa. Quanto menor a largura de banda da fonte, maior será a correlação entre as fases de dois feixes na direção de propagação. Uma forma eficiente de quantificar a coerência temporal de uma fonte é saber qual a máxima distância que os feixes emitidos pela fonte podem percorrer mantendo sua relação de fase constante. Este parâmetro, chamado de comprimento de coerência, pode ser obtido através do espectro de emissão da fonte usando-se a seguinte relação:

$$l_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (11)$$

onde λ_0 é o comprimento de onda central da fonte e $\Delta\lambda$ é a largura de banda da fonte.

Para exemplificar, em um laser de He-Ne, o comprimento de coerência varia de 10 cm a

100 m. Estes valores contrastam com os de uma fonte típica de calor, por exemplo, uma lâmpada de filamento incandescente, para a qual este valor é de cerca de 1 μ m.

ii) Coerência espacial: A coerência espacial está ligada à uniformidade das frentes de onda através da medida da correlação de fase na direção transversal à direção de propagação da onda. Em geral, a forma mais utilizada para medir a coerência espacial de uma fonte luminosa é a formação de franjas de interferência pelo Experimento de Fendas Duplas de Young (SALEH;TEICH, 2019), cuja representação é mostrada na Figura 5. O parâmetro medido é o comprimento de coerência espacial, W_c , que informa qual é a máxima separação entre as franjas que ainda permite a visualização das franjas claras e escuras. Em geral W_c é igual ao diâmetro do feixe e tem como valor típico para lasers de 1 mm.

2.1.1.2 Polarização

A luz é um fenômeno ondulatório onde os campos elétricos e magnéticos são vetores perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação. Sendo transversais, podem apresentar ou não assimetrias relativamente à direção de propagação. Quando a luz apresenta tal assimetria dizemos que ela é polarizada, em caso contrário diz-se que é não-polarizada.

Quando a luz é dita não-polarizada, as componentes dos vetores do campo elétrico oscilam em direções aleatórias. Este é o tipo de luz encontrada na natureza e por este motivo é denominada luz natural. Já as componentes da luz polarizada oscilam em uma direção privilegiada, por exemplo, linearmente no eixo x.

Vamos supor uma onda eletromagnética que se propaga na direção do eixo z. A expressão geral que define seu campo elétrico é:

$$\vec{E} = E_x(t)\hat{x} + E_y(t)\hat{y} \quad (12)$$

$$\vec{E} = E_{x0} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_x)\hat{x} + E_{y0} \cos(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t + \phi_y)\hat{y} \quad (13)$$

Na equação (13), \hat{x} e \hat{y} são os vetores unitários nas direções x e y, k é a constante de propagação, ω é a frequência angular e ϕ_x e ϕ_y , são as fases relativas de cada componente à origem do sistema de coordenadas.

Além disso, três são os tipos de polarização que uma onda eletromagnética pode assumir: linear, circular ou elíptica, sendo a polarização elíptica o caso geral e as outras duas,

casos particulares. Os valores relativos das amplitudes E_x e E_y e das fases ϕ_x e ϕ_y definem a polarização da onda.

Os estados de polarização condicionam a ocorrência de interferência da forma demonstrada nas chamadas Leis de Fresnel e Arago (SALEH; TEICH, 2019), que surgiram como conclusão de seus experimentos, realizados em 1816. As leis são as seguintes:

- i) Dois feixes de polarizações lineares perpendiculares não interferem entre si;
- ii) Dois feixes de polarizações lineares paralelas interferem de maneira mais eficiente;
- iii) Dois feixes de polarizações lineares que derivem de componentes perpendiculares de luz natural não interferem entre si mesmo que os seus planos de vibração rotacionem até coincidirem. Em outras palavras, não existe possibilidade de que as componentes x dos feixes interfiram com as componentes y.

Uma vez atendidas as condições descritas acima, haverá interferência entre diferentes feixes. Para que esta interferência possa ser observada, faz-se necessário a montagem de um sistema óptico apropriado, conhecido como interferômetro.

2.2 Interferômetros

Os sistemas que fazem uso do fenômeno da interferência para realizar suas funções são chamados de interferômetros. Dentre os muitos tipos de interferômetros desenvolvidos ao longo da história, dois deles se destacaram: os interferômetros de divisão de frente de onda e os interferômetros de divisão de amplitude. No primeiro caso, o padrão de interferência é obtido de duas frentes de onda provenientes de uma frente de onda primária. Já no segundo caso, um feixe é dividido por um semiespelho e as partes interferem após cada uma percorrer um caminho óptico diferente.

2.2.1 Interferômetros de Divisão de Frente de Onda

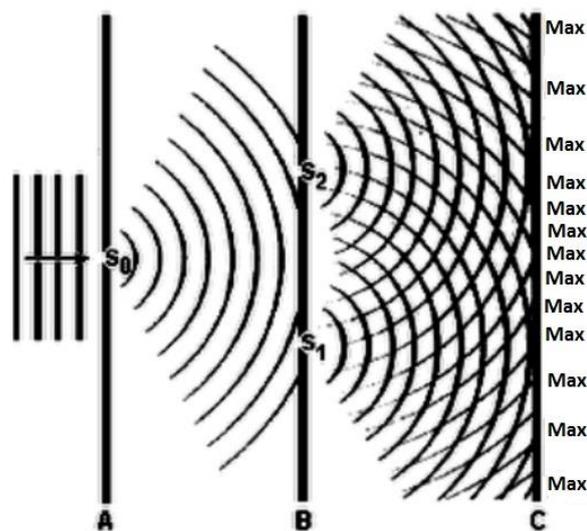
O exemplo mais conhecido deste tipo de interferômetro é o interferômetro de fendas duplas de Young, que será brevemente descrito abaixo.

Interferômetro de Young

A coerência das fontes de luz é parte protagonista do fenômeno de interferência. Foi exatamente esta questão que provocou o fracasso do cientista italiano Grimaldi, em 1665, em mostrar o surgimento das franjas claras e escuras quando dois feixes de luz solar eram sobrepostos (CREASE, 2006). Em uma sala completamente escura, Grimaldi fez com que a luz do sol entrasse na sala por dois minúsculos orifícios na janela, como se fosse uma enorme câmara escura. Como a luz solar é altamente incoerente, Grimaldi não conseguiu atingir seu objetivo.

Decorridos cerca de 140 anos, o cientista Thomas Young, baseando-se no experimento de Grimaldi, conseguiu corrigir o “defeito” do experimento realizado por Grimaldi e, finalmente, observou o padrão de interferência entre dois feixes. A modificação feita por Young no experimento de Grimaldi foi adicionar um anteparo contendo um único orifício antes do anteparo com dois orifícios originalmente usado (Figura 7). Isso fez com que a luz do sol ficasse espacialmente coerente iluminando de forma igual os dois orifícios subsequentes. Desta forma, Young finalmente pôde observar as franjas claras e escuras em um anteparo, ratificando a natureza ondulatória da luz (HALLIDAY, 2001).

Figura 5 - (a) Esquema experimental do Experimento de Young. (b) Representação geométrica para explicar seu resultado.



Fonte: <https://kullabs.com/class-12/physics/interference/path-difference-phase-difference-and-young-s-double-slit-experiment>

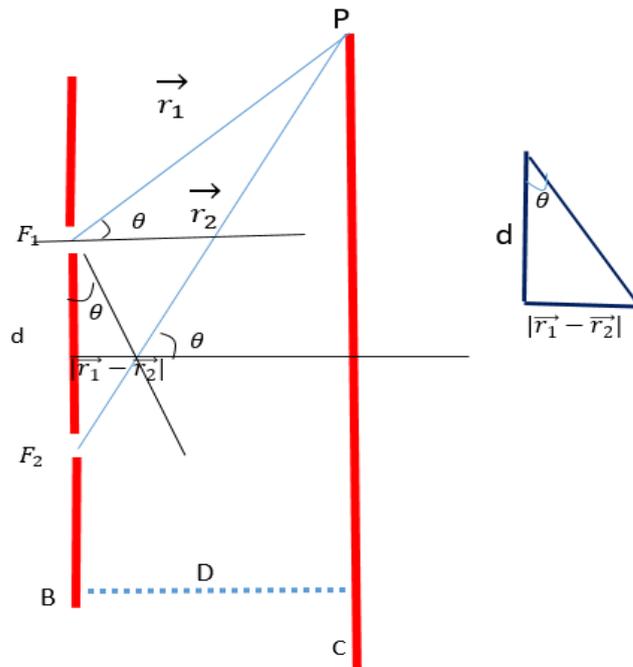
Fonte: O AUTOR, 2020

A Figura 5 mostra uma onda plana de luz monocromática incidindo em duas fendas F_1 e F_2 , cujos centros são separados por uma distância d . Ao atravessar as fendas, a luz é difratada produzindo uma figura de interferência no anteparo localizado adiante. O padrão de máximos e mínimos observados por Young são, portanto, causados pela diferença de caminho óptico percorrido pelos feixes provenientes das duas fendas. A Figura 6 mostra um esquema geométrico para encontrar o valor da diferença de caminho óptico entre os feixes.

A Figura 6 mostra os dois raios, representados pelos vetores \vec{r}_1 e \vec{r}_2 , originados, respectivamente, nos centros das fendas F_1 e F_2 , se encontrando em um ponto P sobre o anteparo fazendo um ângulo θ com um eixo perpendicular que passa pelo ponto médio das duas fendas. O anteparo e as fendas estão separados por uma distância D e as fendas estão separadas por uma distância d . Além disso, como $D \gg d$, podemos considerar que \vec{r}_1 e \vec{r}_2 são paralelos. Através da semelhança dos triângulos formados na figura, percebe-se que a diferença de caminho óptico entre os raios luminosos é dada por:

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = d \sin \theta \quad (14)$$

Figura 6 - Esquema geométrico para explicar o Experimento de Young.



Fonte: O AUTOR, 2020

Como mencionado anteriormente, se a franja é clara, ou seja, luminosa, a interferência é construtiva. Assim, $|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ deve ser igual a zero ou a um número inteiro m de comprimento de onda λ . Portanto, com esta informação e a equação acima, chega-se que:

$$\Delta L = m\lambda = d\sin\theta \quad (15)$$

para $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

No caso de uma franja escura, $|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ deve ser um múltiplo ímpar de metade do comprimento de onda, uma vez que a interferência deve ser destrutiva. Esta condição pode ser expressa na forma:

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = d\sin\theta \quad (16)$$

para $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

2.2.2 Interferômetros por divisão de amplitude

Quando uma onda luminosa incide numa superfície semiespelhada ou uma placa de vidro, a onda é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. Tanto a componente refletida quanto a componente transmitida possuem as amplitudes inferiores a amplitude da onda incidente. Pode-se assim dizer que a amplitude é, portanto, “dividida”.

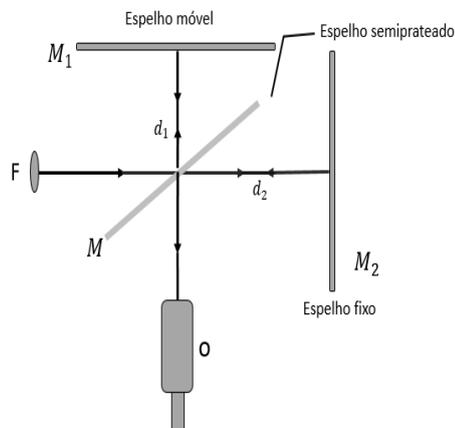
Se a coerência inicial entre ambas as componentes não tiver sido destruída após a divisão, e se for possível voltar a reunir as partes em um detector ou em um anteparo, obtém-se como resultado um padrão de interferência. Para isso, é importante que o comprimento de coerência seja superior a diferença entre o percurso efetuado por ambas ondas.

A seguir veremos um pouco mais sobre os três principais interferômetros desta categoria.

2.2.2.1) Interferômetro de Michelson

O primeiro interferômetro por divisão de amplitude que será apresentado foi construído por Michelson em 1881 (HECHT, 2005). A Figura 7 a seguir mostra esquematicamente a montagem do interferômetro de Michelson.

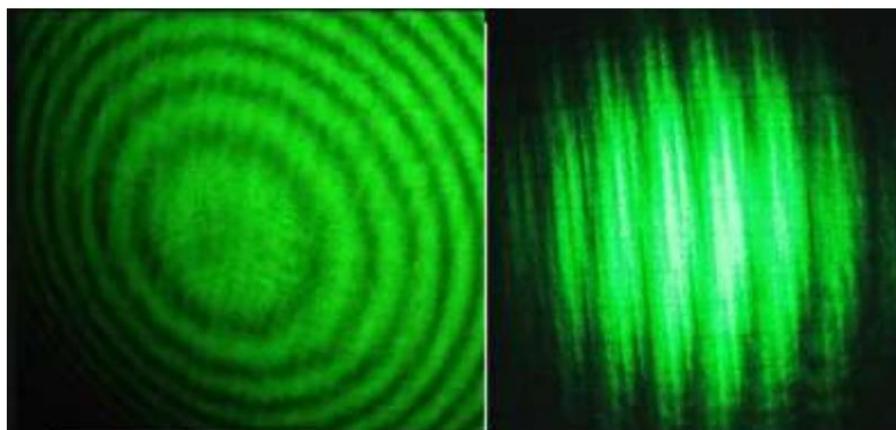
Figura 7 - O Interferômetro de Michelson



FONTE: O AUTOR, 2020

Na Figura 7, a luz parte da fonte F e incide no semiespelho (M), de espessura desprezível. A luz é então dividida em dois feixes que seguem respectivamente para os espelhos M_1 e M_2 , onde M_1 é móvel e M_2 é fixo. Após as reflexões nos respectivos espelhos, as ondas se reencontram em M, e são respectivamente transmitidas e refletidas em direção ao ponto de observação O, onde será visualizado o padrão de interferência. Caso o espelho M_1 seja movido, o caminho óptico de um dos feixes mudará, resultando na mudança do padrão de interferência observado. A Figura 8 mostra os dois possíveis padrões de interferência obtidos com este sistema.

Figura 8 - Padrões de interferência obtidos em um interferômetro de Michelson quando os espelhos estão alinhados (padrão circular) ou quando não estão perpendiculares entre si (padrão paralelo).



Padrão circular

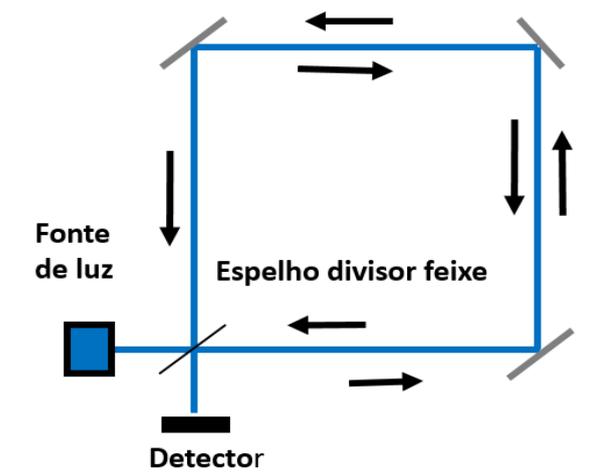
Barras paralelas

Fonte: CORDOVA, 2016.

2.2.2.2 Interferômetro Sagnac

O interferômetro Sagnac, cujo nome homenageia o físico francês Georges Sagnac, é um tipo de sistema que possui uma característica muito particular: é em formato de anel (HECHT, 2005), o que resulta em dois feixes absolutamente idênticos na entrada e na saída do sistema, conforme mostrado na Figura 9. No sistema mostrado, a montagem consiste em um divisor de feixe e dois espelhos, tal qual o interferômetro de Michelson. O feixe incidente é dividido em dois pelo divisor de feixes e percorrem caminhos idênticos, porém em sentidos opostos, até que se recombinam no mesmo ponto no divisor de feixes. Por esse motivo o interferômetro de Sagnac é conhecido como “interferômetro em anel”. Sendo assim, como é possível criar uma diferença de caminho óptico entre os feixes para que um padrão de interferência seja criado? A diferença de caminho óptico surge da introdução de um meio não-linear, por exemplo, uma fibra óptica eletroopticamente modificada ou um cristal de niobato de lítio, em um ponto do anel que não seja o ponto médio. Nesse caso, o feixe que percorre o anel no sentido horário irá experimentar a perturbação em um instante diferente do feixe que percorre o anel no sentido anti-horário.

Figura 9 - Esquema experimental do interferômetro Sagnac.



Fonte: O AUTOR, 2020.

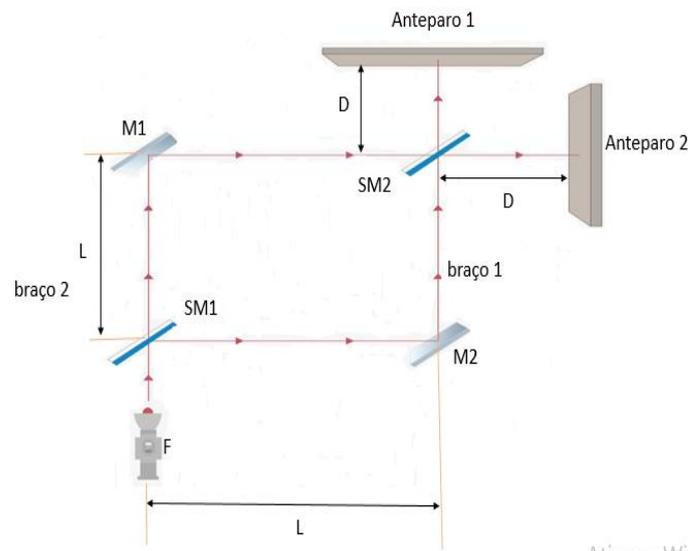
Um detalhe importante: na maioria dos interferômetros (sejam de divisão de frente de onda ou de divisão de amplitude) são necessários isolamentos de vibrações e de circulação de ar para obter franjas estáveis, uma vez que qualquer variação em um dos braços será registrada

na saída do interferômetro. No interferômetro de Sagnac, por outro lado, devido a sua configuração contrapropagante em anel, se alguma vibração perturbar um dos braços, os dois feixes experimentarão a perturbação, já que os feixes passam pelo divisor de feixes o mesmo número de vezes.

2.2.2.3 Interferômetro de Mach Zehnder

Finalmente, será apresentado o Interferômetro de Mach Zehnder (IMZ), que é o tipo de sistema interferométrico utilizado neste trabalho. Este interferômetro é usado por sua estrutura onde em um dos braços a existência de modulação de fase da luz provoca uma modulação na intensidade na saída do interferômetro. Este arranjo é um pouco mais complexo que os casos mostrados anteriormente, mas, ainda assim, relativamente simples de ser montado (HECHT, 2005). Para tal, um feixe luminoso, proveniente da fonte F é dividido por um semiespelho (SM_1), formando dois braços, um chamado de braço ativo (onde será gerada a diferença de caminho óptico, por exemplo, o braço 1) e outro chamado de braço de referência (fixo, sem qualquer mudança de características, por exemplo, o braço 2), conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema experimental do IMZ.



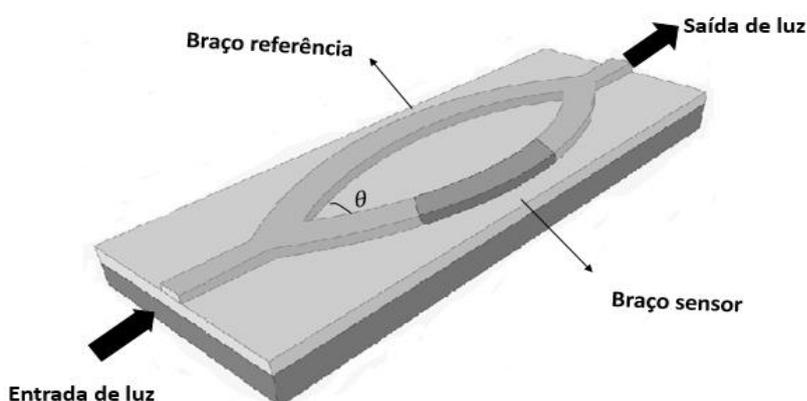
Fonte: O AUTOR, 2020.

Após a divisão no SM_1 , os feixes são refletidos, respectivamente, pelos espelhos M_1 e M_2 em direção ao segundo divisor, SM_2 , onde se encontram e são refletidos e transmitidos para os anteparos, gerando os padrões de interferência. No IMZ, o feixe incidente é decomposto em

dois feixes idênticos. Se o comprimento do braço L é o mesmo e se o ângulo de incidência nos espelhos é igual a 45° , os dois feixes possuem uma diferença de fase nula na saída do interferômetro. Modificando ligeiramente o ângulo de incidência da luz no espelho M_1 ou o comprimento do braço 1, obtém-se a modificação do padrão de interferência.

Como mencionado, neste trabalho foi feito, primeiramente montado em laboratório e no segundo momento de forma simulada, um interferômetro de Mach-Zehnder, usando fibra óptica. O IMZ com fibra óptica é um dispositivo cujo princípio de funcionamento consiste na separação de um feixe de luz em dois guias de onda idênticos através de um divisor de feixes chamado de junção Y. Cada um dos guias de onda recebe metade da intensidade de luz inserida na entrada do dispositivo. Em seguida, os feixes divididos se juntam na segunda junção Y, simétrica a primeira e são conduzidos pelo guia de saída. A Figura 11 mostra um esquema básico de um IMZ a fibra óptica.

Figura 11 - Esquema básico de um IMZ a fibra óptica.



Fonte: O AUTOR, 2020.

Quando consideramos um interferômetro ideal, ou seja, sem perdas de radiação e com caminhos ópticos iguais nos dois braços, a intensidade luminosa do feixe de saída é o mesmo do feixe de entrada. Isso ocorre, pois, os feixes de luz que se separam na primeira junção Y estão em fase, e os caminhos ópticos percorridos nos dois braços são iguais.

Quando o IMZ é utilizado como sensor, um dos braços serve como referência, ou seja, a luz se propaga pelo braço sem sofrer alterações. Já no segundo braço, chamado de braço ativo, ocorrerá uma ação externa, causada pela grandeza que se quer sensoriar, que provocará uma

mudança de fase na luz que o trafega que, por consequência, irá alterar a correlação de fase com o braço de referência. A intensidade da luz na saída do interferômetro é dependente dessa diferença de fase. A relação entre a intensidade de saída e a diferença de fase é dada por:

$$I = \frac{I_0}{2}(1 + \cos(\Delta\phi)) \quad (17)$$

Na equação 17, o termo I se refere a intensidade da luz na saída do interferômetro, I_0 é a intensidade da luz na entrada do interferômetro e $\Delta\phi$ é a diferença de fase da luz entre os dois braços. A diferença de fase que acontece nesse dispositivo pode ser relacionada com parâmetros que deseja-se calcular, como por exemplo, variações de pressão, temperatura ou tensão elétrica.

As mudanças causadas no índice de refração do braço ativo também resultam em mudanças de fase. Isso ocorre porque, se alterar o índice de refração do braço ativo, a luz que se propaga naquela região terá um adiantamento ou atraso em relação a luz que se propaga pelo braço referência por conta da mudança do caminho óptico. A diferença de fase introduzida no braço sensor é dada pela seguinte relação:

$$\Delta\phi = \beta \cdot L = k \cdot \Delta n \cdot L = \frac{2\pi\Delta n L}{\lambda} \quad (18)$$

Na equação 18, k é o número de onda, Δn representa a variação do índice de refração no braço ativo, L o comprimento do braço ativo e λ o comprimento de onda da luz incidente.

No caso deste trabalho, o braço ativo do IMZ é composto por uma fibra óptica eletroopticamente modificada pela técnica de *poling*, onde a mudança de fase na luz que a atravessa ocorre pela aplicação de tensão nos eletrodos criados dentro da fibra. Entretanto, inicialmente a mudança de fase da luz em uma fibra óptica é pouco sensível à aplicação de tensão elétrica. Por conta disso, a técnica de *poling* é aplicada e a fibra torna-se muito mais sensível a aplicações de tensão elétrica. O mecanismo por trás deste processo será explicado na próxima seção.

2.3 Poling Térmico

Para entender o processo do *poling* é importante ter uma noção da sílica que é um material fundamental utilizado na fabricação de fibras ópticas mais comuns. Ela é um material amorfo ou centrossimétrico e, por isso, não possui susceptibilidade não-linear de segunda ordem χ^2 , diferentemente dos cristais. A diferença entre a estrutura de um vidro e de um cristal como pode ser observada na Figura 12.

Figura 12 - Estrutura da cristalina e amorfa



Fonte: <https://br.images.search.yahoo.com/search/images,estrutura+silica+de+quartzo+e+de+vidro&fr=mc>

Por isso, ações como conversão de frequências ópticas ou a modulação da luz tornam-se difíceis de se realizar. Porém, como os Efeitos de segunda ordem não conseguem ser observados em vidros, usa-se, por exemplo, a técnica de *poling* para poder observar esses Efeitos de segunda ordem.

A aplicação do *poling* faz com que um campo elétrico quase permanente seja gravado na sílica, quebrando a simetria de inversão do material. Isso permite induzir um coeficiente não-linear χ^2 não nulo.

O *poling* térmico é baseado na aplicação simultânea de um campo elétrico muito intenso e de alta temperatura na fibra óptica. Primeiramente, as fibras ópticas utilizadas neste processo não são de sílica tão pura quanto uma fibra utilizada em telecomunicações. Sendo assim, a alta temperatura irá aumentar a mobilidade das impurezas na matriz e a aplicação de um campo elétrico intenso direcionará o movimento dessas impurezas (MORAIS,2003).

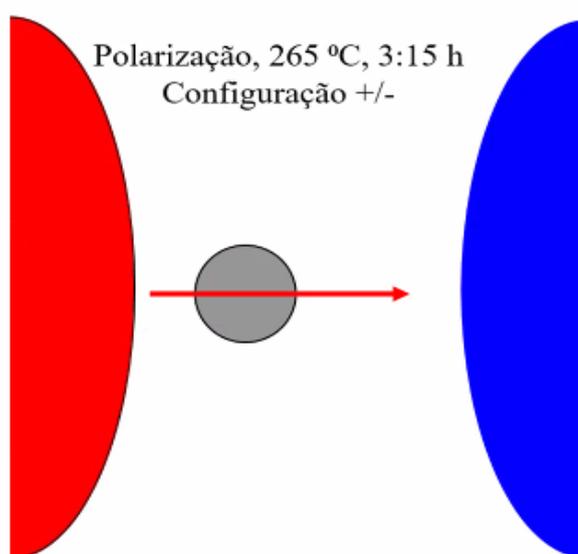
As Figuras 13 e 14 ajudam a explicar o processo do *poling*. A Figura 13 mostra o que seria a seção transversal de uma fibra óptica com dois buracos e o núcleo entre eles, onde o núcleo não é o ponto médio entre os dois buracos. Além das duas microestruturas, este tipo de fibra tem outra característica diferente quando comparada a uma fibra usada em telecomunicações: enquanto que a fibra de telecomunicações é feita de sílica com alta pureza (>99%), a fibra microestruturada usada para *poling* possui um certo grau de impurezas (na casa de algumas (p.p.m.) para que a quebra de simetria de inversão pela gravação de um campo elétrico seja alcançada. No caso específico da fibra óptica utilizada neste trabalho, as

impurezas são íons de lítio e sódio (propositalmente adicionadas) e íons hidrogenados (produzidos naturalmente no processo de fabricação das fibras ópticas).

Voltando à Figura 13, no buraco à esquerda do núcleo se encontra o potencial positivo e no buraco à direita, o potencial nulo. Uma vez que o campo elétrico \vec{E} é estabelecido, graças à temperatura alta, os íons de lítio e de sódio se movem na direção do campo elétrico deixando elétrons para trás. Esses elétrons serão neutralizados pelos íons hidrogenados que entrarão muito lentamente na fibra (eles se movem com 0,1% da velocidade dos íons de lítio e sódio nas mesmas condições de temperatura). Sendo assim, nem todas as cargas negativas serão neutralizadas, restando uma fina camada de elétrons, cuja posição desejada é imediatamente após o núcleo da fibra, como mostrado na Figura 14.

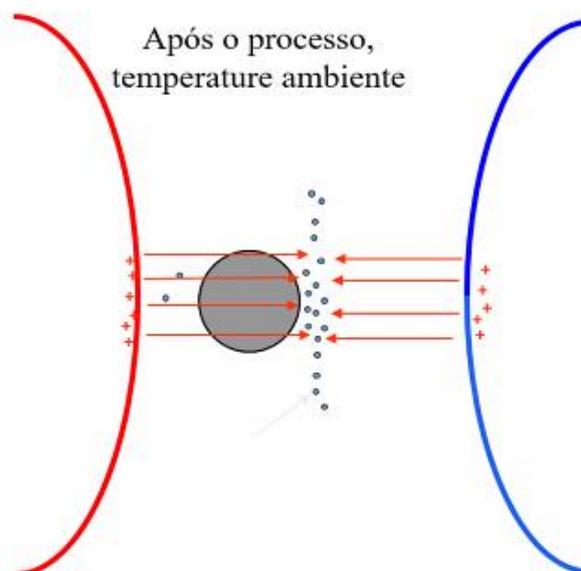
A Figura 14 mostra o resultado final do processo de *poling*. Após o tempo apropriado (para esta fibra, três horas e quinze minutos), o processo é interrompido, primeiramente fazendo com que a fibra volte à temperatura ambiente e, depois disso, interrompendo-se a aplicação de alta tensão nela. Sem a alta temperatura e o campo elétrico, a camada de elétrons imediatamente após o núcleo fica “congelada” e, por indução eletrostática, causa o aparecimento de cargas positivas nas bordas dos buracos. Com isso, tal qual um capacitor de placas paralelas, um campo elétrico é gravado no interior da fibra óptica.

Figura 13 - Início do processo do poling.



Fonte: CAMARA, 2015.

Figura 14 - Campo elétrico (setas vermelhas) gravado após o processo do poling.



Fonte: CAMARA, 2015.

A ideia do *poling* surgiu quando a comunidade científica recebeu o testemunho de Osterberg e Margulis em 1986 da geração do segundo harmônico numa fibra óptica. Eles descobriram que uma exposição prolongada da fibra a luz intensa produzia um crescimento de radiação verde (segundo harmônico). Isto despertou o interesse para a área do *poling* e desde então, os cientistas começaram a mostrar mais interesse no assunto. Chegou-se à conclusão que a intensidade da radiação infravermelha induzia uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica (MORAIS, 2003). Esta modulação de índice permitia acertar na fase entre os modos propagantes da radiação fundamental e do segundo harmônico. Disso, concluiu-se que o mecanismo responsável pela modulação de índice era um campo elétrico induzido que criava a tal estrutura periódica responsável pela geração do segundo harmônico. Como os valores da não-linearidade induzidas foram entre terceira e quarta ordens de grandeza inferiores às de alguns cristais não-lineares, a experiência de Osterberg e Margulis não teve grande interesse científico. Porém, ela inspirou Bergot *et al* na sua experiência quando eles aplicaram ao núcleo de uma fibra óptica, um campo elétrico externo na presença da radiação infravermelha intensa. A eficiência da geração do segundo harmônico foi melhorado em duas ordens de grandeza (MORAIS, 2003). Em 1991 Myrén et

al já conseguiram um coeficiente não-linear de segunda ordem da ordem de 1 pm/V com a técnica do *poling*. Esta experiência marcou definitivamente a evolução do *poling* térmico

Como mencionado, as fibras ópticas são pouco sensíveis à aplicação de tensão elétrica, o que se reflete na baixa mudança de fase de uma onda que esteja se propagando nela. Neste caso, a mudança de fase é regida pelos efeitos eletroópticos (Kerr e Pockels) descritos a seguir.

2.3.1 Os efeitos Kerr e Pockels

Tanto o Efeito Kerr quanto o Efeito Pockels tratam da variação do índice de refração de um material com os campos elétricos intensos. Em nosso dia-a-dia não é possível observar nenhum efeito óptico dito não-linear, uma vez que a intensidade da luz é relativamente baixa. Por isso, dizemos que são efeitos ópticos lineares. Entretanto, se a intensidade da luz que interage com determinados materiais é grande, o comportamento desses materiais pode ser significativamente alterado. Para tentarmos entender melhor o que acontece, devemos recorrer às Equações de Maxwell e a algumas relações chamadas constitutivas. Do Eletromagnetismo temos:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (19)$$

onde \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico e \vec{P} é o vetor de polarização. O vetor de polarização pode ser escrito em função do campo elétrico da seguinte forma:

$$\vec{P} = \varepsilon_0 [\chi^{(1)} \cdot \vec{E} + \chi^{(2)} : \vec{E}\vec{E} + \chi^{(3)} : \vec{E}\vec{E}\vec{E} + \dots] \quad (20)$$

onde $\chi^{(1)}$, $\chi^{(2)}$ e $\chi^{(3)}$ são as susceptibilidades de primeira, segunda e terceira ordens, respectivamente. Quando a luz é pouco intensa, os termos de ordem superior em (20) podem ser negligenciados e a polarização é puramente linear (depende apenas da primeira potência do campo elétrico). Sendo assim, podemos reescrever (20) da seguinte maneira:

$$\vec{P} = \vec{P}_L + \vec{P}_{NL} \quad (21)$$

onde \vec{P}_L é a polarização linear e \vec{P}_{NL} é a polarização não-linear (inclui apenas os termos de ordem superior). Substituindo (20) em (19):

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \varepsilon_0 [\chi^{(1)} \cdot \vec{E} + \chi^{(2)} : \vec{E}\vec{E} + \chi^{(3)} : \vec{E}\vec{E}\vec{E} + \dots] \quad (22)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} [1 + \chi^{(1)} + \chi^{(2)} : \vec{E} + \chi^{(3)} : \vec{E}\vec{E} + \dots] \quad (23)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \quad (24)$$

onde $\varepsilon = 1 + \chi^{(1)} + \chi^{(2)} : \vec{E} + \chi^{(3)} : \vec{E}\vec{E} + \dots$ é a permissividade elétrica do material.

De forma geral, os valores das susceptibilidades de ordem superior são muito pequenos. Tipicamente, para fibras ópticas de sílica, $\chi^{(2)} = 0$ e $\chi^{(3)} = 2,0 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$. Portanto, representam apenas uma pequena perturbação no valor da permissividade linear, desde que o campo elétrico aplicado ao material seja suficientemente forte. Sendo assim,

$$\varepsilon = \varepsilon_L + \Delta\varepsilon \quad (25)$$

Em grande parte dos materiais encontrados na natureza a relação entre sua permissividade elétrica e o seu índice de refração é dada por:

$$\varepsilon = n^2 = (n_0 + \Delta n)^2 \quad (26)$$

$$\varepsilon = n_0^2 + 2n_0\Delta n + (\Delta n)^2 \quad (27)$$

Tal qual $\Delta\varepsilon$, Δn também é uma pequena perturbação no índice de refração ($n_0 \gg \Delta n$). Portanto, a equação (27) pode ser reduzida à:

$$\varepsilon = n_0^2 + 2n_0\Delta n \quad (28)$$

$$\Delta n = \frac{\varepsilon - n_0^2}{2n_0} \quad (29)$$

$$\Delta n = \frac{\varepsilon - \varepsilon_L}{2n_0} \quad (30)$$

Utilizando a equação (30) conclui-se que a variação de índice de refração de um material é dada por:

$$\Delta n = \frac{1}{2n_0} [\chi^{(2)}E + \chi^{(3)}E^2 + \dots] \quad (31)$$

Em fibras ópticas, pelos motivos já citados, a variação é dada por:

$$\Delta n = \frac{1}{2n_0} [\chi^{(3)}E^2] \quad (32)$$

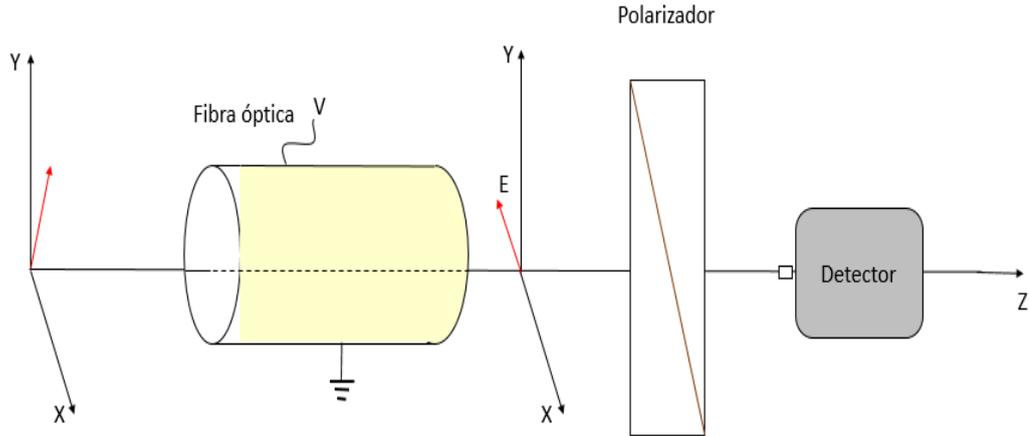
onde os termos de ordem superior a 3 são desprezíveis.

Quando a mudança de fase é proporcional ao quadrado do campo elétrico, trata-se do **Efeito Kerr**. O valor de Δn em fibras ópticas pode variar de 10^{-6} até 10^{-4} dependendo da geometria da fibra óptica.

No caso em que o material não é centrossimétrico, $\chi^{(2)}$ é diferente de zero e a mudança de fase torna-se dependente da primeira potência do campo elétrico. Quando isso acontece, estamos no regime do **Efeito Pockels**.

Para exemplificar estes efeitos, vamos considerar o esquema experimental mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema experimental para a demonstração do Efeito Kerr em fibras ópticas.



Fonte: O AUTOR, 2020.

Seja uma luz polarizada, representada pelo campo elétrico \vec{E} , que incide em uma fibra óptica. Na saída da fibra óptica, é colocado um polarizador cujo ângulo inicial de polarização faz 90° com a polarização da luz, quando a tensão aplicada à fibra é igual a 0 V. Isso faz com que o detector, em um caso ideal, acuse intensidade nula. Conforme a tensão aplicada a fibra aumenta, a intensidade da luz que chega ao detector também aumenta, chegando a um valor máximo. Como já visto, a mudança de fase na fibra óptica é dada por:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot L \quad (33)$$

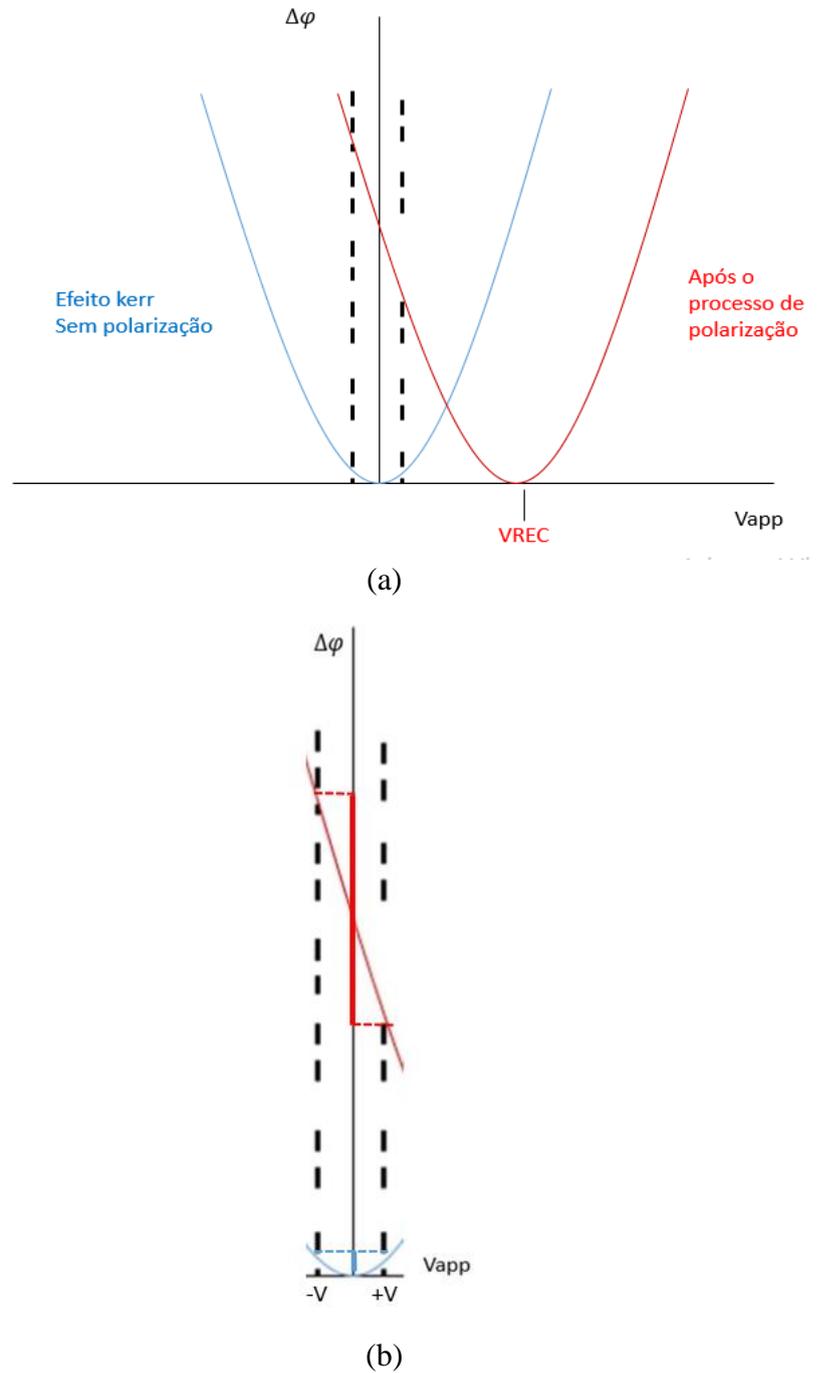
Para explicitar como a fase da onda muda em função do campo elétrico aplicado na fibra, deve-se substituir (32) em (33).

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{1}{2n_0} [\chi^{(3)} E^2] \cdot L \quad (34)$$

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{\lambda n_0} [\chi^{(3)} E^2] \cdot L \quad (35)$$

As Figuras 16 e 17 explicam de forma mais detalhada o processo de mudança de fase antes e depois do *poling*.

Figura 16 – (a) Mudança de fase da luz versus tensão aplicada a fibra antes e depois do poling; (b) Mudança de fase da luz na região de $V_{app} = 0$ V.



Fonte: CAMARA, 2015.

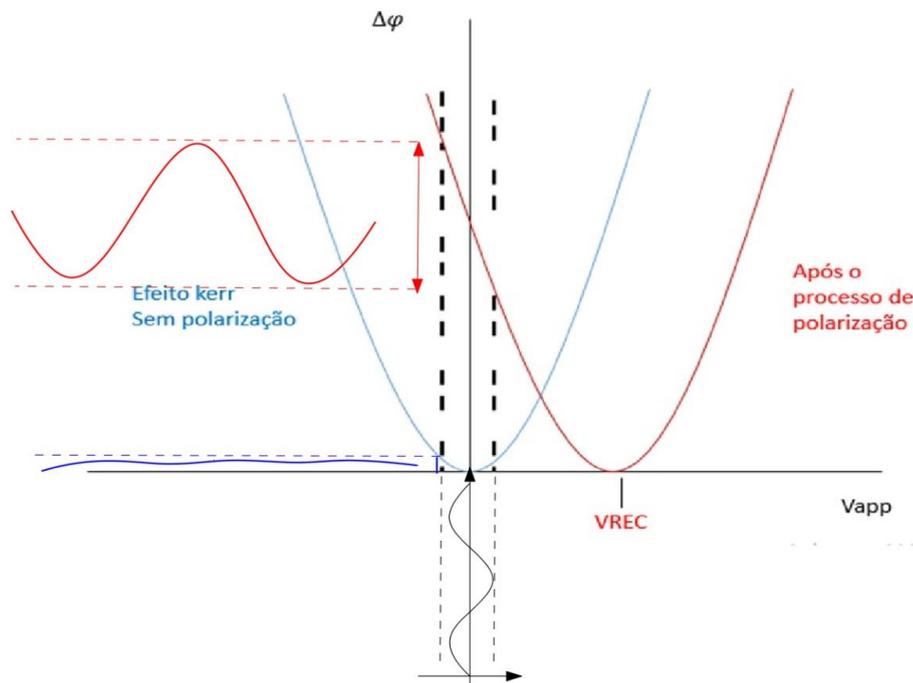
A Figura representa 16(a) mostra a variação de fase antes e depois do *poling* quando é aplicada uma tensão DC. O No eixo y, o traço azul representa a mudança de fase antes e o traço vermelho representa a mudança depois. Como pode-se observar na Figura 16(b), a mudança de fase em torno de 0 V antes do poling não é significativa, enquanto que, depois de poling, a mudança de fase é relevante.

Neste trabalho, o tipo de tensão aplicada é tensão senoidal. Portanto, como é mostrado na Figura 17, ao aplicar a tensão senoidal na entrada, antes do *poling*, o sinal senoidal na saída não é significativo. No entanto para o mesmo sinal aplicado, o sinal de saída depois do *poling* é muito mais significativo.

Para que o valor máximo de intensidade no detector seja atingido, é necessário que seja amplificada uma tensão à fibra óptica que cause uma variação de $\pi \text{ rad}$ na fase da luz que propaga por ela. Lembrando que $E = \frac{V}{d}$ e supondo que a fibra do esquema mostrado na Figura 20 tenha 2 m de comprimento, índice de refração linear igual a 1,449, o sistema esteja operando em $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ e que os eletrodos internos estão separados por $d = 25 \mu\text{m}$, a tensão aplicada para gerar uma variação de $\pi \text{ rad}$ na fase da onda é:

$$V_{\pi} = 0,824 \text{ kV} \quad (36)$$

Figura 17 - Variação de fase para mesma variação de tensão senoidal antes e depois do *poling*.



Fonte: O AUTOR, 2020.

Portanto, para que haja uma mudança de $\pi \text{ rad}$ na fase da onda nesta situação hipotética, é necessário que se aplique $(0,824 \text{ kV})^2 = 0,679 \text{ (kV)}^2$. Como visto na seção anterior, a técnica de *poling* grava um campo elétrico, conseqüentemente uma tensão, no

interior da fibra óptica. Vamos supor que ao fim do *poling* a tensão gravada na fibra seja de 3 kV . Logo, o ponto inicial de mudança de fase acontece com 9 kV^2 , ou seja, para atingir-se agora a variação de $\pi \text{ rad}$, são necessários $9,679 \text{ kV}^2$. Lembrando que a tensão total é igual à soma das tensões gravada e aplicada, temos que:

$$V_T^2 = (V_{REC} + V_{Apl})^2 = 9,679 \text{ kV}^2 \quad (37)$$

resultando em:

$$V_{Apl} = 111 \text{ V} \quad (38)$$

Este resultado mostra que, nesta situação, ao invés do operador do sistema ter que utilizar 824 V , ele poderá utilizar apenas 111 V para realizar a mesma função, trazendo segurança para quem opera o sistema e menor custo de execução.

Devido às facilidades relatadas sobre o uso de fibras ópticas, as fibras modificadas eletroopticamente pelo processo de *poling* estão sendo largamente utilizadas em sistemas interferométricos (GRAZIOSI, 2013). Se a tensão aplicada aos eletrodos da fibra traz a informação que quer ser transmitida, o impulso elétrico irá modular a luz que está se propagando no sistema e a luz passa a ser a portadora da informação. Este sistema é chamado de **modulador eletroóptico** (MURARO JUNIOR, 2008).

2.3.1.1 Modulador eletroóptico

Segundo Saleh e Teich (SALEH ; TEICH, 2019), quando um raio de luz atravessa um campo elétrico de um comprimento L , onde há um campo elétrico E aplicado, esse campo produz uma mudança de fase, conforme mencionado anteriormente. O campo elétrico pode ser aplicado em direção perpendicular da direção à propagação de luz (modulador transversal) ou na direção paralela à direção da propagação da luz (modulador longitudinal). Nesse caso, $d = L$. Como o cristal é anisotrópico (construção geométrica de elipsóide) e o valor de coeficiente Pockels depende das direções da propagação e do campo elétrico aplicado (SALEH ; TEICH, 2019), o valor de V_π (a tensão necessária para ocorra atraso na fase de onda) varia em função de valores de poucos quilovolts para moduladores longitudinais e de centenas de volts para moduladores transversais.

A velocidade de operação de um modulador eletrooptica é limitada pelos efeitos elétricos e capacitivos e pelo tempo de transição da luz através do material. Se o campo elétrico $E(t)$ varia significativamente dentro do tempo de transição da luz (T), a viagem da onda óptica será sujeita a campos de elétricos diferentes como ele atravessa o cristal (SALEH ; TEICH, 2019). A fase modulada é aplicada a um certo tempo t será proporcional ao campo elétrico médio

$E(t)$ ao tempo variando de $t-T$ a t . Conseqüentemente, a largura de banda limitada do modulador é $\frac{1}{T}$. Para reduzir esse tempo, pode-se aplicar uma tensão V à um terminal do cristal enquanto os electrodos funcionam como linha de transmissão. Quando a velocidade da propagação da onda elétrica corresponde à propagação da onda óptica, os efeitos de tempo de transição podem ser eliminados. Geralmente, os moduladores comerciais, operam na faixa de centenas de MHz, porém a velocidade do modulador pode operar na faixa de GHz.

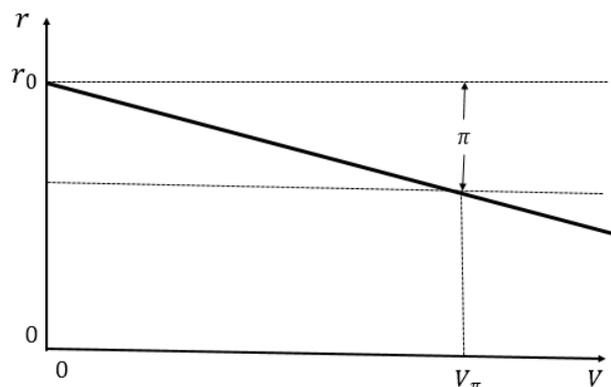
2.3.1.2 Atraso de onda

Suponha que em um determinado meio encontram-se dois modos normais linearmente polarizados que se propagam com velocidades diferentes ($c_0/n_1, c_0/n_2$). Se, na presença de um campo elétrico \vec{E} estável, esse meio apresenta os efeitos Pockels, então, os dois índices de refração sofrem alterações e conseqüentemente depois da propagação numa certa distância, os dois modos sofrem um atraso de fase. O campo elétrico pode ser obtido a partir de uma tensão V entre as duas superfícies do meio separado por uma distância d como pode-se observar no gráfico da Figura 18 (SALEH; TEICH, 2019). Esse atraso é dado pela seguinte equação:

$$r = r_0 - \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (39)$$

onde $r_0 = k_0(n_1 - n_2)L$ é o atraso de fase na ausência do campo elétrico e V_π como já definida anteriormente, é a tensão necessária para obter o atraso de fase π . A representação gráfica da modulação de fase é mostrada na figura 18.

Figura 18 - Representação gráfica da modulação de fase.



O atraso de fase não afeta a intensidade do raio de luz. No entanto, se um modulador de fase é inserido em um dos braços do interferômetro, este pode funcionar como modulador de intensidade. Um bom exemplo disso é um interferômetro Mach-Zehnder. Pode-se construir um modulador de intensidade Mach-Zehnder na forma de um dispositivo óptico integrado. A sua entrada e a sua saída geralmente são carregadas por fibras ópticas. Eles geralmente operam a uma velocidade mínima na faixa de GHz. Porém, para a modulação a faixa pode passar de 25 GHz.

Um exemplo de trabalhos usando moduladores é a dissertação de Mestrado de Marcello Graziosi que já foi abordado brevemente no capítulo 1 (GRAZIOSI, 2013). Nesse trabalho uma fibra de 1,2 m fabricada por *poling* é inserida em um interferômetro Sagnac para detecção de um sinal de tensão. Foram realizadas várias medições em diferentes frequências e amplitudes de tensão. Diferentes métodos são mostrados para caracterizar o parâmetro do *poling* como por exemplo, $\chi^{(2)}$ e V_{π} . Um modelo matemático é apresentado para descrever a resposta electroóptica do sensor e corresponde com os resultados experimentais. Em um primeiro tempo, uma tensão sinusoidal de $V_{pp} = 170$ V e frequência de 50 Hz é aplicada através da fibra sem fazer qualquer contato com os eletrodos dentro da fibra. Por meio de um campo elétrico, uma modulação óptica foi criada. O sistema usado mostrou uma certa instabilidade. Uma medição de mesma tensão aplicada dá um resultado diferente. Isso ocorre devido ao estado de polarização da luz que não é mantido através do interferômetro Sagnac. Quando é usada uma configuração de placa paralela, o grande desafio é conseguir alinhar a tensão aplicada com a tensão gravada. Qualquer movimento da fibra sob a placa, permite uma certa mudança a saída medida. Em seguida, a fibra pode ser fixada à placa quente aterrada e a mesma placa usada para *poling* pode ser usada como placa aterrada no interferômetro Sagnac, onde uma segunda placa é alimentada. Pode-se definir o ponto de partida (quando nenhuma tensão é aplicada) com toda a luz em reflexão e nenhuma luz em transmissão, controlando o estado de polarização. Nesta condição a modulação foi considerada acima de zero e ao invés de oscilar entre a intensidade máxima e mínima, a intensidade detectada vai de zero a intensidade máxima. Isso significa que o sinal óptico possui uma frequência que é o dobro da frequência da tensão aplicada, então o amplificador pode ser usado para filtrar um segundo harmônico. Um sinal com o dobro da frequência da voltagem foi visto no laboratório para frequências mais altas. O ponto não muito interessante desse procedimento é que a amplitude óptica é reduzida por um fator de 2, então é preciso medir uma modulação maior a 50 Hz.

Portanto, conseguiu-se uma melhoria graças ao parâmetro V_{π} menor, no caso de fibra com o pólo mais longo, por exemplo. Isso permitiu aumentar o sinal de saída.

Durante o processo foi considerado que primeiramente a luz é modulada por uma tensão de pulso curto que possui uma duração (largura) onde é constatado um atraso de tempo Δt . Em seguida, ocorre uma segunda modulação nas bases dos dados iniciais esse atraso foi calculado em $\Delta t = 39\mu s$. Depois é usado um sinal elétrico senoidal e um transformador de tensão para poder aumentar a amplitude da tensão aplicada (GRAZIOSI, 2013). Essa tensão é contínua. Considerando que não ocorre interferência entre o raio de luz que é alterado por essa tensão e o raio de luz que não sofre influência dessa tensão, isso provoca uma mudança de fase nas luzes nos dois sentidos antes da interferência. Por isso, a relação entre o atraso e a frequência do sinal aplicado se torna importante. Portanto essa frequência é obtida da seguinte forma:

$$v = 1/39\mu s = 26kHz$$

Quando a tensão aplicada possui a mesma frequência do que o atraso e quando os dois feixes de luzes interferem, os dois experimentam a mesma amplitude de tensão, portanto, a mesma fase. Isso explica que não há modulação da luz e os sinais ópticos de transmissão de reflexão são os mesmos como se não tivesse tensão aplicada.

Por meio do capítulo 2 foi possível entender a parte teórica no qual se baseia o trabalho e que envolve bem particularmente o fenômeno da interferência de ondas eletromagnéticas e também a técnica do *poling* térmico. Uma vez dominada essa teoria, passou-se à prática que será apresentada no capítulo 3 onde é mostrada a montagem do sistema interferométrico para fazer o estudo do canal e são explicados os resultados obtidos desses experimentos.

3 CONSTRUÇÃO DO INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER

Como mencionado, o objetivo deste trabalho é estudar a fibra óptica eletroopticamente modificada pela técnica *poling* como canal de transmissão mapeando suas características, dentre elas, limitações em frequência, por exemplo. Inicialmente, houve uma tentativa de realização deste estudo através do uso de um interferômetro do tipo Mach-Zehnder. Primeiramente, a fim de se testar os dispositivos envolvidos na construção do experimento e também de proteger as amostras de fibras modificadas por *poling*, foi utilizado um modulador eletroóptico comercial (OC-192, da JDS Uniphase), como mostrado na Figura 19.

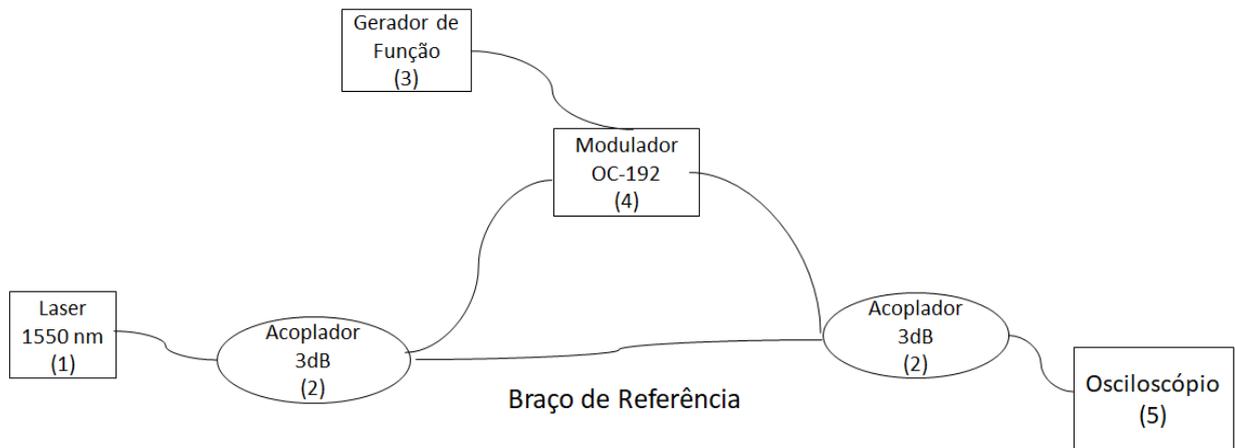
Figura 19 - Modulador Eletroóptico utilizado para calibração do interferômetro Mach-Zehnder.



Fonte: O AUTOR, 2020.

O OC-192 é um modulador que opera em 10 Gbps para $\lambda = 1550$ nm. Ele funciona baseando no Efeito Pockels (descrito no capítulo 2) onde o elemento ativo é um cristal de LiNbO_3 (Niobato de Lítio), elemento de alto coeficiente não-linear ($\chi^{(2)} = 5,6 \text{ pm/V}$) para $\lambda = 1550$ nm. Além disso, a tensão necessária para variar a fase da onda eletromagnética que o atravessa em π rad é $V_\pi = 5,0 \text{ V}$. A representação do esquema experimental utilizado é mostrada na Figura 20.

Figura 20 - Esquema experimental utilizado.

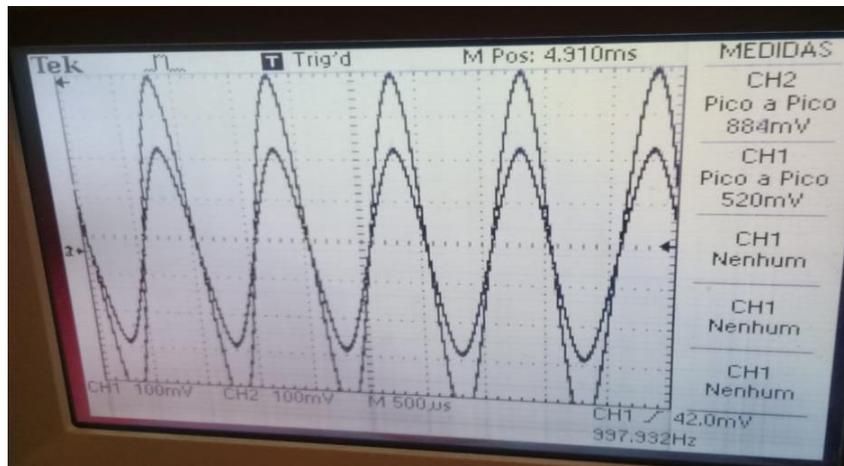


Fonte: O AUTOR,2020

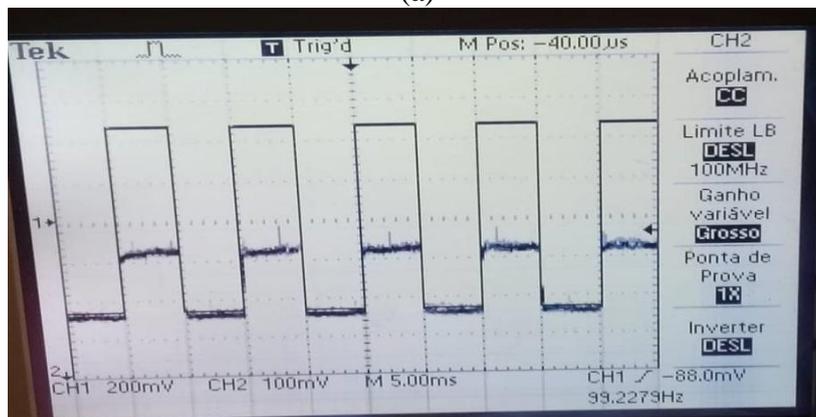
No esquema mostrado na Figura 20, a luz contínua vinda de um diodo laser operando em $\lambda = 1550$ nm passa pelo primeiro acoplador de 3 dB e é dividida em duas partes iguais. A primeira, passa pela fibra de referência e chega ao segundo acoplador de 3 dB. A segunda parte, por sua vez, passa pelo modulador eletroóptico antes de também chegar ao segundo acoplador de 3 dB, onde se juntará à luz vinda do braço de referência. O padrão de interferência resultante deste encontro é lido em um osciloscópio.

Quando uma tensão for aplicada ao modulador, a fase da onda eletromagnética que o atravessa mudará e, conseqüentemente, o padrão de interferência observado no osciloscópio mudará. Para possibilitar melhor visualização do efeito, ao invés de uma tensão contínua ser aplicada ao modulador, foram aplicadas primeiramente uma tensão senoidal e posteriormente uma tensão “quadrada”, com tensão pico a pico constante, usando-se um gerador de funções, cuja saída fornece uma tensão máxima pico a pico $V_{pp} = 5$ V. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 21.

Figura 21 - Resposta do sistema interferométrico à aplicação de tensão na forma (a) senoidal e (b) quadrada. Em ambos os casos, a frequência utilizada foi de 100 Hz.



(a)

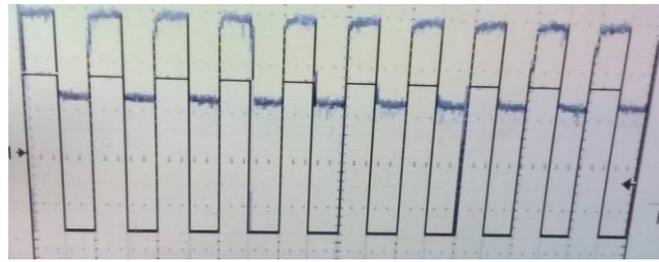


(b)

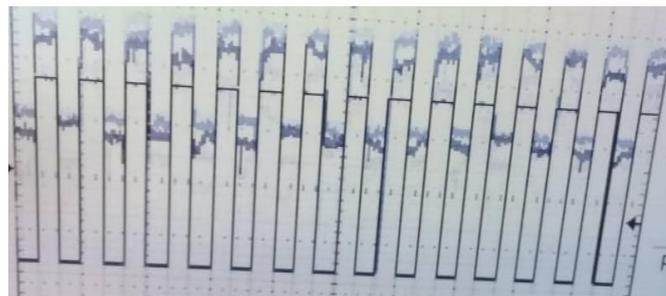
Fonte: O AUTOR,2020

Nas Figuras 21(a) e 21(b), é possível observar que a resposta do sistema, quando comparamos os sinais vindos diretamente do gerador de função (mais intensos) e os sinais saídos do interferômetro (menos intensos), está em fase com o sinal de modulação além de não apresentar significativas distorções apesar da queda de intensidade. A fim de entender melhor as limitações deste sistema que utiliza o modulador comercial, utilizando a tensão “quadrada”, foi feito um teste para diferentes valores de frequências. Os resultados são mostrados na Figura 22.

Figura 22 - Resposta dos sistemas interferométricos à aplicação de tensão na forma quadrada nas frequências (a) 200 Hz e (b) 300 Hz.



(a)



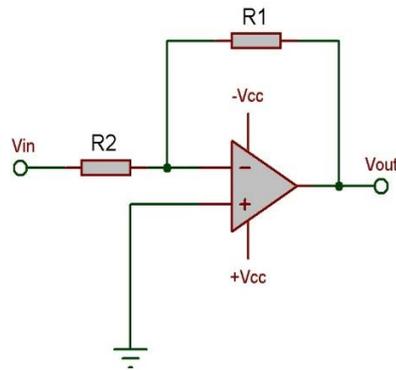
(b)

Fonte: O AUTOR,2020

Como é possível observar na Figura 22, ao aumentar a frequência para 200 Hz, o sinal começou a apresentar distorções, que foram acentuadas na frequência de 300 Hz. Isso se deve ao fato de que o tempo resposta do cristal de NbLiO_3 à aplicações de tensão é maior que o tempo entre pulsos para frequências acima de 100 Hz. Como a ideia é usar um modulador completamente feito a fibra eletroopticamente modificada, foi feita a troca do modulador comercial pelo modulador feito a fibra modificada pela técnica *poling* (CAMARA, 2015).

O experimento utilizando o modulador feito de fibra modificada por *poling* apresentou dois grandes problemas. Para começar, como o parâmetro V_π deste tipo de modulador é consideravelmente mais elevado que o dos moduladores comerciais (no caso do modulador utilizado neste trabalho, $V_\pi = 140 \text{ V}$), a tensão que necessita ser aplicada no modulador para haver significativa mudança de fase da onda que o atravessa e provocar mudanças no padrão de interferência observado é significativamente maior. Sendo assim, o sinal vindo do gerador de função teria que ser amplificado e, infelizmente, o laboratório não dispunha de um amplificador comercial. Sendo assim, foi montado o modelo esquemático de um amplificador operacional, como é mostrado na figura 23.

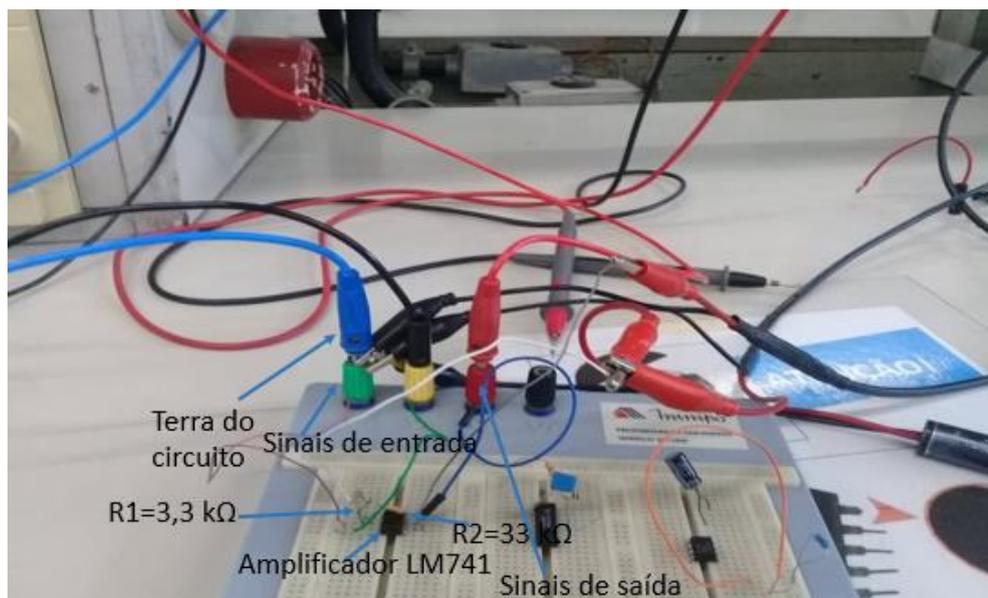
Figura 23 - Amplificador operacional inversor.



Fonte: O AUTOR,2020

A Figura 24 mostra a montagem do circuito para obtenção da amplificação desejada. O processo da montagem do amplificador, em uma primeira etapa, fez uso de um amplificador operacional inversor de relação 1 para 10 como teste. É importante lembrar que um amplificador inversor é um circuito cuja entrada positiva está na terra e o sinal se aplica na entrada negativa através de um resistor R1 (3,3 k Ω) e com uma realimentação na saída através de um R2 (33 k Ω). Assim, o ganho relativo a esse tipo de circuito é: $G = -R2/R1$. Portanto o ganho esperado para esse circuito com esses valores de resistência é de 10.

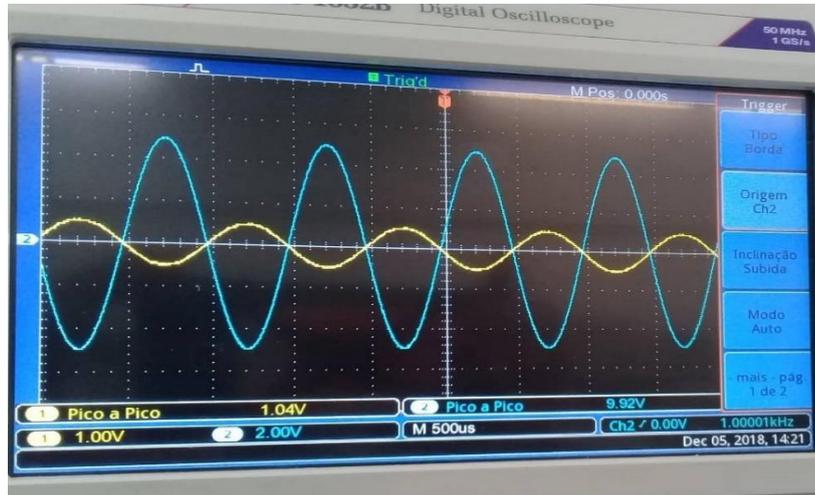
Figura 24 - Montagem do amplificador inversor com fator de ganho igual à 10.



Fonte: O AUTOR,2020

A Figura 25 mostra os sinais de entrada (curva amarela) e saída (curva azul) do amplificador em um osciloscópio.

Figura 25 - Sinais senoidais de entrada e saída vistos no osciloscópio.



Fonte: O AUTOR,2020

Como o gerador de função utilizado fornece, no máximo, 5 V, a magnificência de 10 vezes no sinal ainda seria insuficiente. Sendo assim, os resistores R1 e R2 foram trocados de tal forma que o fator de ganho fosse igual à 100. A Figura 26 mostra o resultado.

Figura 26 - Sinais de entrada (curva amarela, $V_{pp} = 116 \text{ mV}$) e saída (curva azul, $V_{pp} = 9,60 \text{ V}$) do amplificador de fator de ganho igual à 100.



Fonte: O AUTOR,2020

Após o amplificador estar pronto, foram feitas as primeiras tentativas de elevação da tensão próximo dos 200 V para aplicar na fibra óptica eletroopticamente modificada. Entretanto, a tensão máxima de saída obtida foi de 12 V. Isso se deve ao fato de que a amplitude do sinal de

saída está limitada à tensão de alimentação do amplificador operacional utilizado, que é de 12 V. Sendo assim, o amplificador operacional deveria ter sido trocado por um outro tipo dispositivo. Entretanto, por limitações financeiras, até o momento isto não foi possível.

O outro problema importante que surgiu neste experimento foi a instabilidade do sinal de interferência observado no osciloscópio quando a modulação do sinal não estava acionada. Isso aconteceu pois o comprimento de coerência do laser utilizado é maior que o comprimento total do interferômetro. Como o sistema possui múltiplos conectores, em cada junção uma parte da luz é refletida e, por estarem em fases diferentes (fator que depende do ponto onde ocorreu a reflexão), a interferência entre elas muda constantemente, variando a intensidade do sinal na saída do sistema. Para contornar este problema, deve-se usar uma fonte de baixo comprimento de coerência como, por exemplo, uma fonte ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Por serem fontes de luz emitidas via decaimentos espontâneos do meio ativo, os feixes são incoerentes e as interferências entre as várias porções de luz refletidas em cada conexão são totalmente destrutivas, mantendo o sinal de saída do sistema estabilizado. Por falta de recursos financeiros, não foi possível realizar tal experimento.

Por conta de todas essas limitações, a conclusão do experimento para fazer a estimação de canal em sistemas que usam fibras ópticas modificadas pela técnica de *poling* ficou inviabilizada a curto e médio prazos. Sendo assim, optou-se por simular o sistema, utilizando o método dos elementos finitos, através da plataforma COMSOL Multiphysics®. O modelo e os resultados obtidos até o momento serão apresentados no capítulo 4.

4 O MODELO COMPUTACIONAL

Este capítulo explica o processo da modelagem computacional de um canal de transmissão composto por um modulador eletroóptico usando o software COMSOL Multiphysics[®]. Este é um software que usa o método dos elementos finitos para resolver os mais variados problemas, de áreas como Física, Química, Engenharia, por exemplo, em uma dimensão (1D), duas dimensões (2D) ou três dimensões (3D) (SATO, 2015), (COMSOL, 2013). Primeiramente, será mostrada, de forma detalhada, a Física por trás do modelo, mostrando como o COMSOL funciona. Depois, será mostrada a geometria do modulador e, por fim, os resultados obtidos. Esta parte do trabalho foi efetuada em colaboração com o Laboratório de Optoeletrônica da PUC-Rio, sob responsabilidade da Profa. Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho.

4.1 Funcionamento do COMSOL Multiphysics[®]

A Física do modelo apresentado neste trabalho está baseada na solução do COMSOL Multiphysics[®] para os problemas de óptica ondulatória, mostrando a propagação da luz na fibra óptica, e da eletrostática, que cuida da variação da fase da luz que atravessa o braço ativo do interferômetro (fibra modificada por *poling*) quando uma tensão externa é aplicada a ele. A premissa básica para a escolha destes módulos é o fato de que o dispositivo óptico tem dimensões muito maiores do que o comprimento de onda da luz. Por se tratar de um modelo onde a luz, representada por seu campo elétrico, é unidirecional, a equação a ser resolvida pelo COMSOL Multiphysics[®] com relação à propagação da luz na fibra, oriunda das Equações de Maxwell, é:

$$(\vec{\nabla} - i\vec{k}) \times \mu^{-1} \left((\vec{\nabla} - i\vec{k}) \times E_1 \right) - k_0^2 \left(\epsilon_r - \frac{i\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) \vec{E}_1 = 0 \quad (40)$$

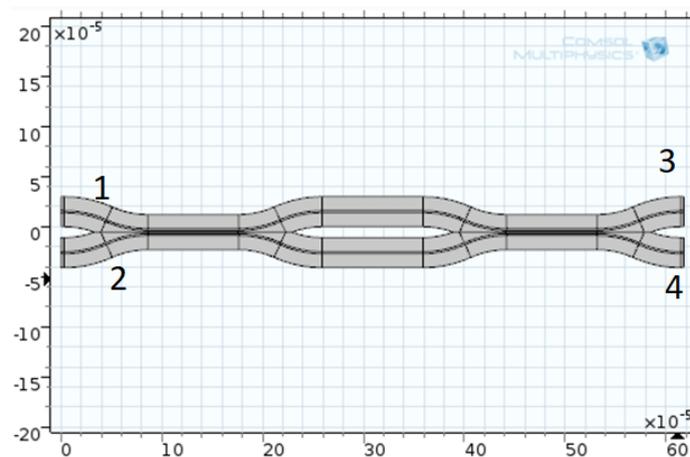
onde \vec{k} é o vetor de onda em um meio de índice de refração maior que 1,0, k_0 é o número de onda no vácuo, μ_r é a permeabilidade magnética relativa, ϵ_r é a permissividade elétrica relativa, σ é a condutividade elétrica do material, ω é a frequência da luz e ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo. O campo elétrico total é definido por:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}} \quad (41)$$

Nesta simulação, o campo elétrico \vec{E} é escrito como produtos de uma função “envoltória” que varia lentamente, dada por \vec{E}_1 , e uma função de fase que varia rapidamente, dada pelos termos exponenciais. Uma vez que a função de fase já é previamente estabelecida, o programa irá resolver a equação de onda para a função “envoltória”.

A geometria do interferômetro Mack-Zehnder, que pode ser vista na figura 27, é baseada no esquema mostrado na Figura 20.

Figura 27 - Geometria do interferômetro Mack-Zehnder.



FONTE: O AUTOR, 2020.

Para que o software possa fazer corretamente os cálculos, é necessária a aplicação de algumas condições de contorno. São elas:

i) inicialmente, a tensão nos eletrodos é nula bem como todo o sistema é eletricamente neutro. Como já mencionado, a mudança de caminho óptico no braço ativo do interferômetro é causada por aplicação de tensão aos eletrodos presentes no braço ativo;

ii) a luz entrará no sistema por uma das portas à esquerda (1 e 2, na Figura 28) e poderá sair do sistema pelas duas portas a direita (3 e 4, em relação ao centro geométrico do desenho)

iii) a malha utilizada (representando os infinitésimos dr que o programa utilizará para resolver a equação de onda) deve ter tamanho máximo igual a 20% do comprimento de onda da luz incidente. Quanto menor a malha, mais preciso será o resultado, porém a necessidade de maior capacidade computacional aumenta conforme a malha é mais fina.

Como mencionado, a resolução da equação (5) ($I = \langle |\vec{E}|^2 \rangle_T$) fornece como resultado apenas sobre como a luz se propaga no interior da fibra óptica. Para que se possa estudar o efeito da tensão aplicada nos eletrodos presentes na fibra na propagação da onda pelo braço

ativo do interferômetro (consequentemente alterando o padrão de interferência, retratado pela quantidade de luz que sai do sistema pelas portas 2 e 4), se faz necessário incluir o problema de eletrostática em adição ao problema anterior (óptica ondulatória). Neste caso, o COMSOL irá fornecer as soluções para a seguinte equação:

$$E = -\nabla V \quad (42)$$

As soluções dessa equação serão usadas pelo COMSOL para calcular a variação da fase da onda que passa pelo braço ativo do interferômetro, conforme a equação (40).

4.2 Modelagem do modulador óptico usado no programa

Após ajustar os comprimentos dos braços do interferômetro a fim de otimizar a intensidade da luz que sai por cada um dos braços e de definir as condições de contorno do problema, as características dos componentes utilizados na construção do sistema interferométrico foram colocadas no modelo. Dois são os tipos de fibra óptica utilizados: no braço ativo, a fibra modelo F051007-1C, produzida pela Rise, Suécia e, no restante do interferômetro, a fibra SMF28, produzida pela empresa Corning. Essas duas fibras são usadas porque o modelo de interferômetro Mach-Zehnder usado pode ser considerado como um sensor que possui dois braços. A Fibra F051007-1C é o braço de referência, ou seja, onde não ocorre alteração na propagação da luz, enquanto, a outra fibra é o braço ativo onde tem a presença de uma ação externa que provoca a mudança de fase na luz. As características de cada uma são informadas na Tabela 2.

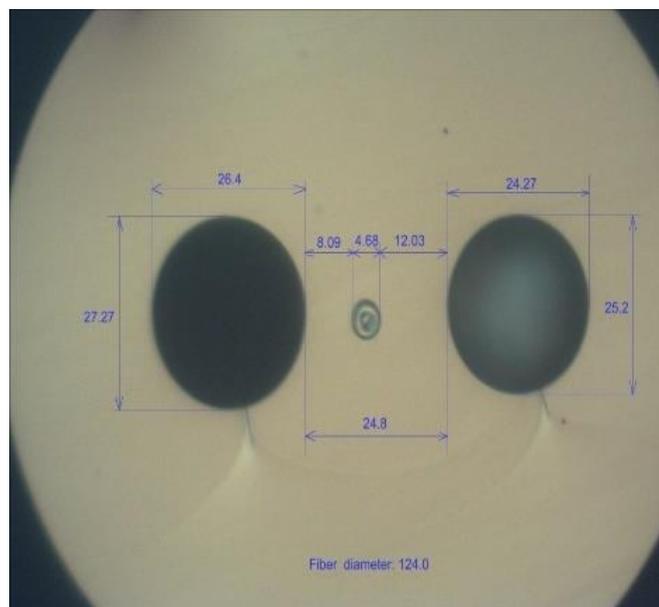
Tabela 2: Parâmetros característicos das fibras ópticas utilizadas no modelo.

	SMF28	F051007-1C
Índice de refração do núcleo	1,442	1,4677
Índice de refração da casca	1,449	1,4628
$\chi^{(2)}$ (Susceptibilidade de 2ª ordem)	0	0,20 pm/V
Diâmetro da casca	125 μm	124,0 μm
Diâmetro do núcleo	8 μm	4,68 μm

Outras características relevantes para o modelo são dadas pela própria geometria da fibra F051007-1C, cuja imagem da seção transversal pode ser vista na figura 28. Os eletrodos são

levemente elipsóides, cujas dimensões dos eixos maiores e menores são, respectivamente, 27 μm e 26,40 μm para o eletrodo a esquerda do núcleo e 25,20 μm e 24,27 μm para o eletrodo a direita do núcleo. Além disso, a distância entre os eletrodos é de 24,80 μm . Este parâmetro é fundamental pois influencia diretamente no valor do campo elétrico que pode ser aplicado à fibra. Por fim, as distâncias entre o núcleo e os eletrodos a direita e a esquerda são, respectivamente, 8,09 μm e 12,03 μm , medidos entre as bordas.

Figura 28 - Figura 2831: Seção transversal da fibra F051007-1C feita em um microscópio óptico.



FONTE: CAMARA, 2015.

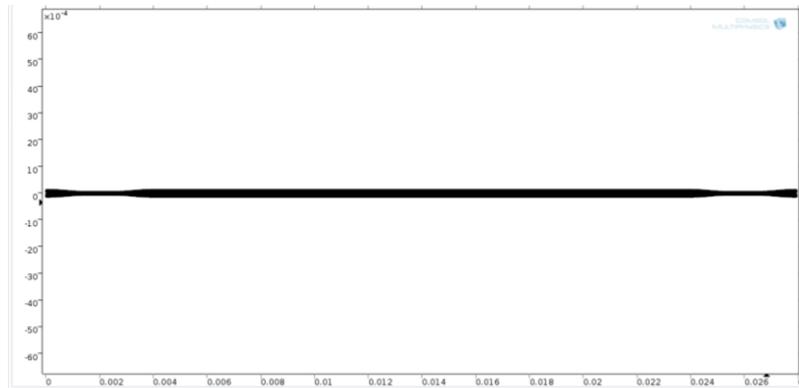
Além disso, a tensão aplicada aos eletrodos tem forma senoidal (cuja frequência será o fator variável) e tem amplitude $V_0 = 100 V$.

Uma vez que a geometria está desenhada e todas as condições iniciais e de contorno do problema estão devidamente sinalizadas, é hora de dividir o sistema nos chamados elementos finitos, gerando uma malha, como pode ser visto na figura 29.

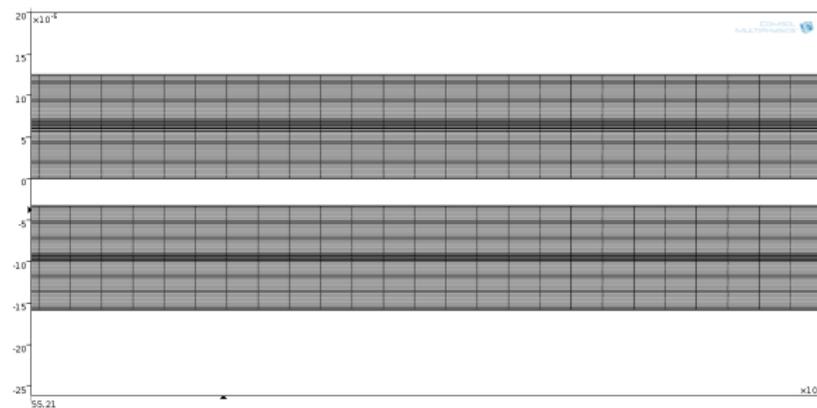
O fato deste modelo utilizar o módulo de óptica ondulatória obriga que o tamanho máximo de cada divisão dentro da malha seja de $0,1\lambda$. Neste caso, portanto, como a portadora opera em $\lambda = 1550 \text{ nm}$, o tamanho máximo de cada divisão é 155 nm. Por conta do tamanho bastante reduzido de cada divisão em comparação ao tamanho total do sistema, uma grande capacidade de processamento é exigida do computador para que o modelo forneça seus resultados. Por conta disso, como será visto na seção seguinte, o sistema simulado é menor que

o sistema real, diminuindo o tempo de processamento que, ainda assim, ficou demorado (por volta de 2 horas).

Figura 29 – (a) Visão geral da geometria dividida nos elementos finitos. (b) Visão ampliada da região central da geometria.



(a)



(b)

FONTE: O AUTOR, 2020.

4.3 Resultados e Discussões

Os estudos para estimar as propriedades do canal que utiliza a fibra óptica modificada por *poling* começam por identificar a existência de uma frequência de corte, ou seja, a partir de qual faixa de frequência o sistema apresenta perdas significativas na qualidade de transmissão da informação. Para tal, podemos considerar que os eletrodos existentes na fibra desempenham papel bastante similar ao de eletrodos em um guia de onda RF, onde a sílica, constituinte da fibra óptica, funciona como um substrato dielétrico. Em seus estudos sobre a técnica de *poling*, Niklas Myrén (MYRÉN, 2005), desenvolveu um sistema cujo objetivo era a transmissão de dados em frequências inferiores à 10 kHz. Usando uma fibra de dimensões completamente diferentes da que foi usada neste trabalho, ele determinou experimentalmente que a frequência

de corte do seu sistema, que utilizava um componente de 30 cm de comprimento era superior a 100 MHz. Portanto, a faixa em que ele pretendia trabalhar estava bastante adequada.

Uma vez que nesta parte do trabalho o sistema é simulado, é necessária uma outra forma para se estimar a frequência de corte do sistema estudado. Isto é feito tratando-se a fibra como um capacitor em carga com capacitância característica, e resistência, por unidade de comprimento. O tempo total de carga do circuito equivalente determina uma outra limitação à frequência máxima de modulação do sinal. A capacitância por unidade de comprimento deste sistema pode ser calculada por (MANASSAH, 2001):

$$\frac{C}{l} = \frac{\pi \varepsilon}{\cosh(D/2a)} \quad (43)$$

onde $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ é a permissividade elétrica da sílica, $\varepsilon_r = 3,78$ é a permissividade relativa da sílica, a é o raio dos eletrodos e D é a distância entre eles. Para a fibra F051007-1C, cujas dimensões são mostradas na Tabela 2, isto significa uma capacitância por unidade de comprimento aproximadamente igual a $68,3 \text{ pF}/m$. Logo, como o dispositivo utilizado tem 24 cm de comprimento, a sua capacitância é estimada como $C = 16,4 \text{ pF}$.

A constante de tempo de um capacitor em carga em um circuito RC é calculado pela seguinte relação:

$$\tau = RC \quad (54)$$

onde R é a resistência total do sistema e C é a capacitância do sistema. Como, neste dispositivo, os eletrodos têm o mesmo metal utilizado no dispositivo construído por Myrén (MYRÉN, 2005), para o cálculo de τ foi utilizado o mesmo valor de resistência por unidade de comprimento ($\frac{R}{l} \approx 1000 \frac{\Omega}{m}$). Sendo assim, para o modulador utilizado neste trabalho, $R = 240 \Omega$. De posse de R e C , calcula-se a constante de tempo deste sistema RC, obtendo-se $\tau = 3,94 \text{ ns}$.

Finalmente, o tempo de carga total pode ser calculado como:

$$t = 2,2\tau = 8,67 \text{ ns} \quad (45)$$

Logo, a frequência máxima estimada para este sistema é de 115 MHz. Em outras palavras, espera-se que em uma transmissão de dados com modulação em frequência inferior à 115 MHz não apresente quaisquer distorções (para $l = 24 \text{ cm}$).

Apesar das capacidades do computador utilizado, a simulação do sistema real ficou inviabilizada, devido à imensa quantidade de elementos finitos. Como no modelo proposto $\lambda = 1550 \text{ nm}$, a dimensão máxima que cada elemento que compõe a malha pode ter é 155 nm. O sistema real, levando em consideração o comprimento dos acopladores, tem cerca de 50 cm de fibra óptica. Logo, em uma simulação 2D, o número total de elementos finitos é da ordem

de $\frac{50 \text{ cm} \cdot 125 \text{ } \mu\text{m}}{\frac{(155 \text{ nm})^2}{2}} = 8 \cdot 10^9$ elementos. Sendo assim, em um primeiro momento, optou-se por utilizar um sistema reduzido à 3 cm de comprimento. Desse jeito, o tempo de processamento do modelo era de cerca de duas horas. Refazendo os cálculos do valor da frequência limite para $l = 2,7 \text{ cm}$, chega-se ao valor de $f_{lim} = 9,1 \text{ GHz}$.

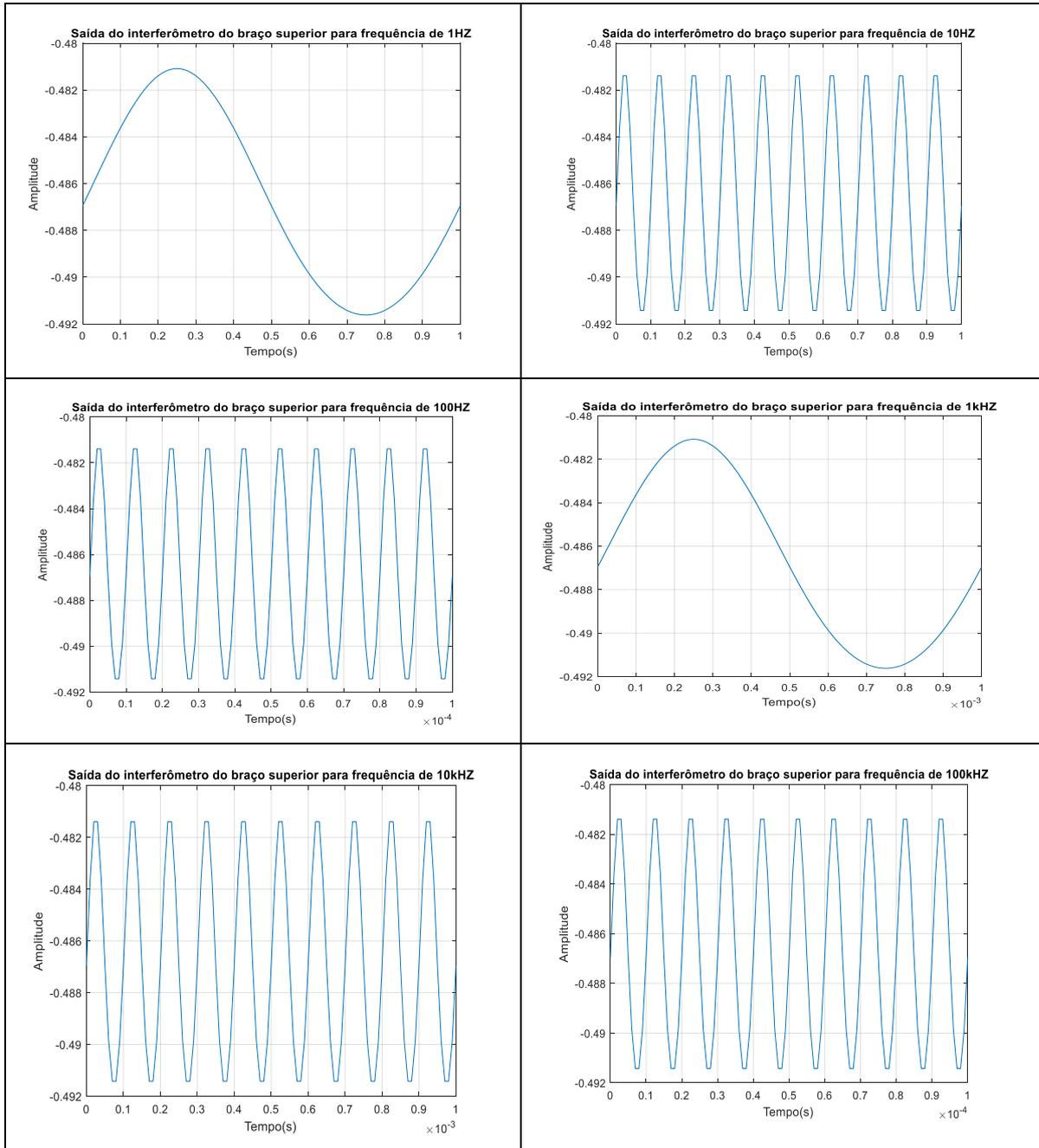
As simulações do comportamento do sistema em relação da frequência foram feitas a passos de um centésimo do tempo máximo de aplicação da tensão, conforme mostra a Tabela 3.

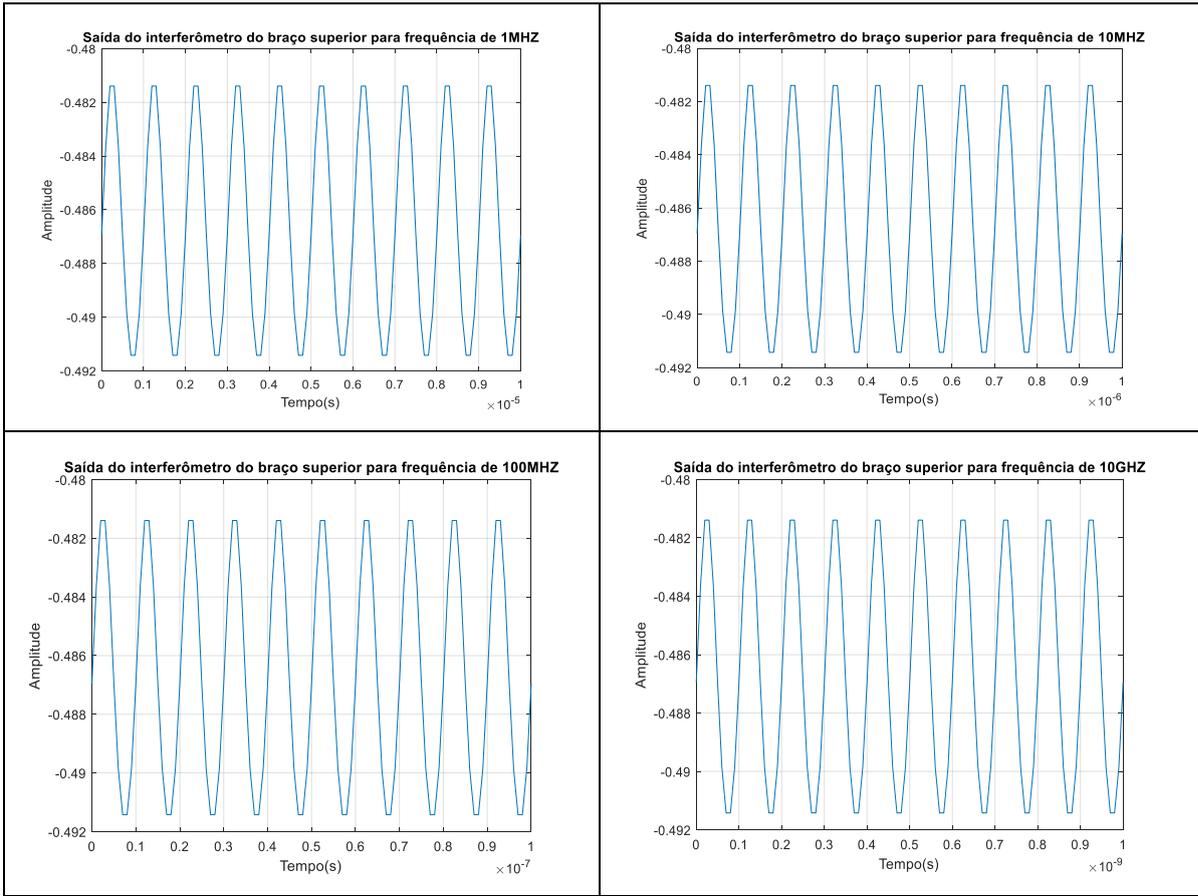
Tabela 3: Parâmetros utilizados para determinar o intervalo de tempo entre medidas sucessivas em função da frequência da tensão aplicada aos eletrodos do braço ativo do interferômetro.

Frequência de modulação (Hz)	Intervalos de tempo (s)	Tempo total (s)
1	10^{-2}	1
10	10^{-3}	1
100	10^{-4}	10^{-2}
1000	10^{-5}	10^{-3}
10 k	10^{-6}	10^{-4}
100 k	10^{-7}	10^{-5}
1 M	10^{-8}	10^{-6}
10 M	10^{-9}	10^{-7}
100 M	10^{-10}	10^{-8}
10 G	10^{-12}	10^{-10}

As Figuras 30 e 31 mostram as respostas do interferômetro simulado para cada uma das frequências mostradas na Tabela 3 para os braços superior (3) e inferior (4) do interferômetro, respectivamente.

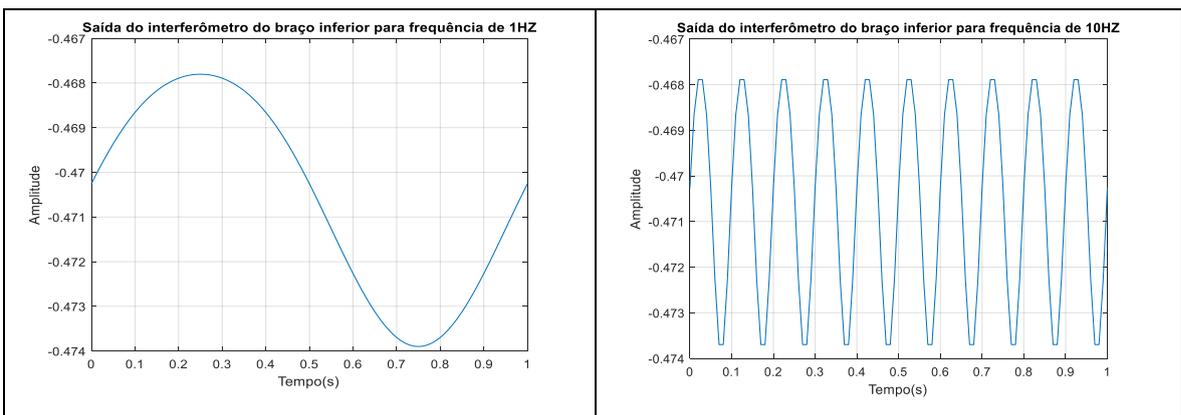
Figura 30 - Respostas da aplicação de tensão senoidal ao braço ativo do interferômetro lidas no braço 3, nas frequências descritas na Tabela 3.

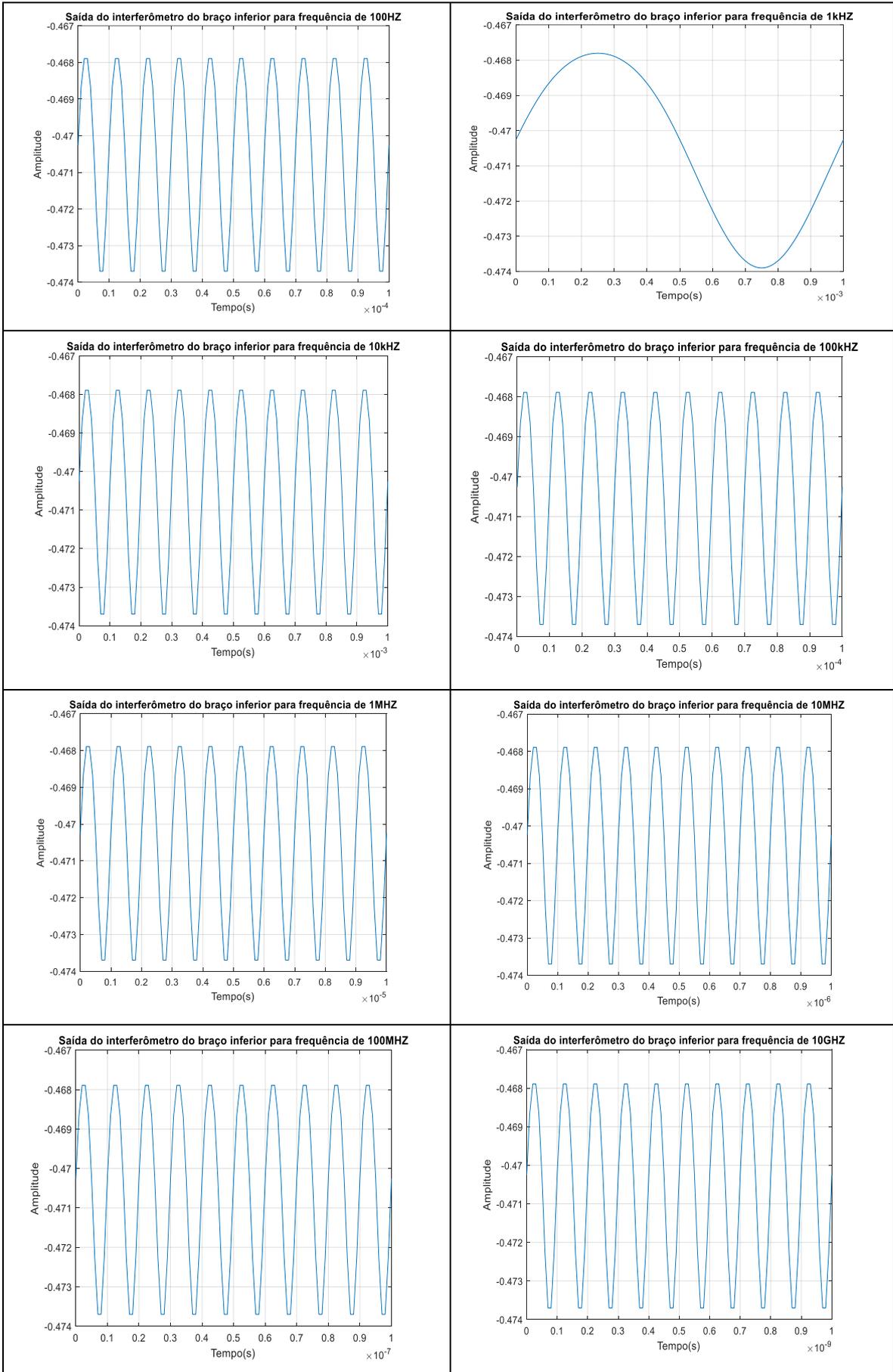




FONTE: O AUTOR, 2020.

Figura 31 - Respostas da aplicação de tensão senoidal ao braço ativo do interferômetro, nas frequências descritas na Tabela 2, lidas no braço 4.





FONTE: O AUTOR, 2020.

Os resultados mostrados nas Figuras 30 e 31 confirmam a expectativa de que nenhuma distorção nos pulsos deve ser vista neste sistema simulado quando as frequências de modulação da portadora são inferiores à 9,1 GHz, como calculado anteriormente. Entretanto, os resultados para $f = 10$ GHz também não apresentaram distorções. Como o valor da frequência limite é estimado e muito próximo de 10 GHz, pode-se considerar que este resultado é aceitável. Além disso, alguns dos resultados apresentam um aspecto “quadrado” no pico. Isto pode ser explicado pelo intervalo de tempo das coletas, o que se reflete na quantidade de pontos medidos. Reduzindo em uma ordem de grandeza o intervalo de tempo que caracteriza os passos da simulação e, conseqüentemente, multiplicando por um fator 10 o número de pontos, este problema pode ser resolvido. Porém, é válido lembrar que o aumento do número pontos coletados exige maior capacidade de processamento do computador ou fará com que o tempo de aquisição dos dados seja consideravelmente aumentado. De qualquer maneira, o modelo construído para simular o sistema experimental demonstrou potencial para ser uma ferramenta poderosa na construção de sistemas interferométricos que utilizam fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica de *poling*. Como os resultados obtidos do sistema simulado confirmam a teoria para frequências de modulação da portadora inferiores a 10GHz, pode-se dizer que a fibra modificada pela técnica de *poling* consegue ser usada como um canal de transmissão de dados .

5 CONCLUSÕES

Essa dissertação apresentou um estudo sobre o uso de fibras ópticas eletroopticamente modificadas pela técnica *poling* como um canal de transmissão de dados mapeando sua característica no domínio da frequência. Durante o processo, a primeira iniciativa foi realizada por meio do uso de um interferômetro do tipo Mach-Zehnder. O primeiro passo desta tentativa foi utilizar um modulador eletroópticamente comercial (OC-192, da JDS Uniphase) para a calibração do experimento. Esse modulador, cujo o elemento ativo é um cristal de niobato de lítio, tem o funcionamento descrito pelo Efeito Pockels e opera em 10 Gbps para um comprimento de onda, $\lambda = 1550$ nm. Além disso, o parâmetro de caracterização deste componente é $V_{\pi} = 5,0V$. Para esse experimento é montado um esquema experimental que permite ler o padrão de interferência resultante em um osciloscópio no segundo acoplador entre as partes da luz vindo do modulador e as vindo da fibra de referência. Ao aplicar uma tensão senoidal e uma tensão quadrada sucessivamente, ambas em uma frequência de 100Hz, não foram observadas quaisquer distorções nos pulsos ópticos na saída do interferômetro. Porém, para frequências acima disso, os pulsos mostraram deformações. Este fato pode ter ocorrido seja porque o tempo de resposta do cristal de $NbLiO_3$ à aplicação de tensão é maior que o tempo entre pulsos para frequência maior que 100Hz, seja porque o detector utilizado não é rápido o suficiente para fazer a leitura corretamente.

Quando o modulador comercial foi trocado por um outro modulador feito à fibra eletroopticamente modificada, duas grandes limitações do sistema ficaram evidentes: a primeira foi a tensão a ser aplicada no modulador para que ocorresse mudança de fase. Por ser cerca de vinte vezes maior, seria necessário amplificar muito o sinal vindo do gerador e uma tentativa de se construir o amplificador foi feita. Como a amplitude de saída está limitada à tensão de alimentação do amplificador operacional, a tensão máxima obtida foi de 12 V. A segunda limitação importante do sistema experimental está ligada com a instabilidade do sinal de interferência observado no osciloscópio. Isso ocorre devido ao fato que o comprimento de coerência do laser utilizado é maior que o comprimento total do interferômetro. Neste caso, uma fonte de luz incoerente como um ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) solucionaria esta questão. Entretanto, devido ao fato de que não houve suficiente verba para a aquisição dos equipamentos necessários nem houve quem pudesse emprestá-los, não foi possível concluir o experimento e resolveu-se, então, fazer este estudo de forma simulada, utilizando

o método dos elementos finitos, através da plataforma COMSOL Multiphysics®. Esta etapa do trabalho foi feita em colaboração com o Laboratório de Optoeletrônica (LOpEI) da PUC-Rio, sob coordenação da Profa. Dra. Isabel Cristina dos Santos Carvalho.

Um dos ganhos proporcionados nesta etapa do trabalho foi a possibilidade de se ter contato, pela primeira vez, com uma plataforma que permite simular uma gama enorme de problemas em diversas áreas como Medicina, Física, e Engenharia, por exemplo. O modelo de MZI criado usando o COMSOL Multiphysics®, se fosse feito em tamanho real, necessitaria de grande capacidade de processamento dos dados. Apesar do computador existente no LOpEI ter boa capacidade de processamento, ainda assim cada simulação levaria quase um dia inteiro para gerar resultados. Isso se deve ao fato de que o modelo de óptica ondulatória com o qual foi produzido o modelo exige que cada elemento finito que compõe a malha tenha, no máximo 10% do comprimento de onda da luz incidente. A quantidade de elementos finitos em que uma geometria de cerca de 30 cm, em 2D, é imensa, já que cada elemento teria tamanho máximo de 155 nm. Sendo assim, optou-se por reduzir o sistema para cerca de 2,7 cm para que o tempo total do processamento das informações fosse reduzido a algo próximo de duas horas. Porém, um trabalho futuro em resposta à esse problema pode ser o aumento do tamanho da geometria do sistema mais próximo do real e uso de valores de frequências acima de 10GHz durante a simulação. Nessas condições, o modelo produziu resultados bastantes consistentes com a estimativa teórica quando o sinal elétrico senoidal usado para a modulação da luz que trafega no braço ativo do sistema (fibra eletroópticamente polarizada). Considerando a fibra F051007-1C como um capacitor de placas paralelas, foi calculado que a frequência limite deste sistema é de 9,1 GHz para $l = 2,7 \text{ cm}$. Como esperado, os resultados mostraram que não foi possível observar qualquer distorção nos pulsos para as frequências de modulação das portadoras abaixo de 9,1 GHz. Porém, apesar de que os resultados para $f = 10 \text{ GHz}$ também não apresentaram distorção, pode-se assumir que o resultado é aceitável pelo fato que esse valor é próximo da frequência limite estimado. Pode se concluir, portanto que o modelo feito para a simulação do sistema experimental apresenta um potencial para ser uma ferramenta poderosa para se estudar canais de transmissão de dados construídos em um sistema interferométrico que utilizam fibras ópticas eletroópticamente modificadas pela técnica *poling*.

O trabalho apresentado aqui permite ainda ser estendido. Se os equipamentos necessários forem conseguidos, será possível a conclusão do estudo de forma experimental utilizando o modulador feito pelo Prof. Alexandre Camara. Além disso, é possível construir a

estrutura para que novas fibras ópticas possam passar pela técnica de *poling*, e, conseqüentemente, mais moduladores serem estudados da mesma forma. Com relação a parte de simulações, além de tentar aumentar a geometria desenhada para que os estudos possam ser realizados em uma situação mais próxima da real, seria possível otimizar o sistema, seja em termos de que tipo de interferômetro usar, seja, principalmente, na otimização da geometria da fibra óptica que será modificada a fim de que a modificação permita valores maiores que os atuais do coeficiente não-linear de segunda ordem, o que diminuiria o valor de V_{π} facilitando, conseqüentemente, o estudo e posterior uso deste tipo de componente nas diversas aplicações mencionadas.

REFERÊNCIAS

- ERICSSON, Ericsson Mobility Report, Relatório Técnico, Nov. 2019.
<https://www.ericsson.com/4acd7e/assets/local/mobility-report/documents/2019/emr-november-2019.pdf>. Acessado em 18/03/2020
- AGRAWAL, G. Sistemas de comunicação por fibra óptica. Elsevier Brasil, 2014.
- AGRAWAL, G. Nonlinear fiber optics, 4th Edition, Academic Press, 2006
- AN, H.; FLEMING, S. Creating large second-order nonlinearity in twin-hole optical fibre with core at the centre of the two holes. Electronics Letters, v. 43, n. 4, p. 206-207, 2007.
- ARCAS, A.S. e al. Surface plasmon resonance and bending loss-based U-shaped plastic optical fiber biosensors. Sensors, v. 18, n. 2, p. 648, 2018.
- ARMITAGE, J. D.; LOHMANN, A. W. Theta modulation in optics. Applied Optics, v. 4, n. 4, p. 399-403, 1965.
- WIRTH, A. Fibras Óticas - Formação e aperfeiçoamento profissional, Axcel Books, 2004
- MURARO JUNIOR, A. Projeto ótimo de moduladores eletroópticos, Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, Fevereiro, 2008
- BILLARD, J. Mise au point-Les modulateurs électro-optiques. Revue de Physique Appliquée, v. 1, n. 4, p. 311-324, 1966.
- KIM, B.H. et al. All fiber polarimetric modulation using an electro-optic fiber with internal Pb-Sn electrodes. Optics express, v. 14, n. 23, p. 11234-11241, 2006.
- CAMARA, A.D.R. Biossensor e Dispositivo Eletro-óptico em Fibras Óticas Especiais Tese de Doutorado, PUC-Rio, Janeiro, 2015
- CORDOVA, H. P. Construção de um interferômetro de Michelson e Aplicações no Ensino de Óptica. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- COMSOL, Introduction to COMSOL Multiphysics, December, 2013, version4.4
- CREASE, R.P. Os 10 Mais Belos Experimentos Científicos, Ed. Zahar, 200 pp., 2006.
- GRAZIOSI, M. Optical Fiber For Measuring High Voltages, Master degree, Stockholm, Sweden, 2013
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- HECHT. E., Optica, 3ª ed., Fundação Calouste Gulbekian, 2005.

HRAGHI, A. Application of Mach-Zehnder Modulator for High Speed Optical Communication Network, Tese de Doutorado, 2017

MARGULIS, W.; TARASENKO, O.; MYRÉN, N. Electrooptical fibers. In: Photonics North 2006. International Society for Optics and Photonics, 2006. p. 634319.

MYRÉN, N.; MARGULIS, W.. All-fiber electrooptical mode-locking and tuning. IEEE photonics technology letters, v. 17, n. 10, p. 2047-2049, 2005.

MYRÉN, N. Poled Fibers Devices, Tese de Doutorado, Royal Institute of Technology, 2005.

MYRÉN, N.; MARGULIS, W. Time evolution of frozen-in field during poling of fiber with alloy electrodes. Optics Express, v. 13, n. 9, p. 3438-3444, 2005.

MYRÉN, N. et al. Wide wedge-shaped depletion region in thermally poled fiber with alloy electrodes. Optics express, v. 12, n. 25, p. 6093-6099, 2004.

PEREIRA, R. J. G., Fibras Ópticas e WDM, 2008. https://www.gta.ufrj.br/grad/08_1/wdm1/index.html. Acessado em 19/03/2020

RODRIGUES, M. P. Técnicas de estimação de canal para sistemas de satélites. 2009. Tese de Doutorado. FCT-UNL.

MORAIS, R.P. Poling em fibras ópticas, Tese de Doutorado, Universidade de Porto, 2003

TRONCO, T.R.; AVILA, L.F. Fundamentos de Comunicações Ópticas, Apostila de Curso, 1a ed., Abril 2007

SALEH, B.E.A; TEICH, M.C. Fundamentals of photonics, John Wiley, 2019

SATO, S.S. Simulação Multifísica utilizando Método dos Elementos Finitos Auxiliando Iterativamente a Fabricação de Moduladores Eletro-ópticos em Substratos de $Bi_4Ge_3O_{12}$, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, SP, 2015

TARASENKO, O.; MARGULIS, W. Electro-optical fiber modulation in a Sagnac interferometer. Optics letters, v. 32, n. 11, p. 1356-1358, 2007.

YU, Dawei et al. Characterization and mitigation of phase-modulation-dependent loss of liquid crystal on silicon. Optics Letters, v. 40, n. 7, p. 1484-1487, 2015.