

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE**

**APLICAÇÃO DE INTERFERÔMETRO DE SAGNAC PARA DETECÇÃO DE
PERTURBAÇÕES MECÂNICAS E LOCALIZAÇÃO**

SÍLVIO FERREIRA GAGLIOTI

VITÓRIA

2014

SÍLVIO FERREIRA GAGLIOTI

**APLICAÇÃO DE INTERFERÔMETRO DE SAGNAC PARA DETECÇÃO DE
PERTURBAÇÕES MECÂNICAS E LOCALIZAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração em Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dra. Maria José Pontes

VITÓRIA

2014

SÍLVIO FERREIRA GAGLIOTI

**APLICAÇÃO DE INTERFERÔMETRO DE SAGNAC PARA DETECÇÃO DE
PERTURBAÇÕES MECÂNICAS E LOCALIZAÇÃO**

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dra. Maria José Pontes
Orientadora

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Examinador

Prof. Dr. Andrés Pablo Lopez Barbero
Examinador

Vitória - ES, 27 de Outubro 2014

A meus pais

“A direção dos balões e voo mecânico eram problemas insolúveis”

Santos Dumont

Agradecimentos

A motivação primordial para iniciar este trabalho, foi o idealismo. Muitos anos se passaram entre o término da faculdade e a retomada dos estudos no programa de mestrado, e durante todo este período, prevaleceu um desejo de completar certas lacunas de conhecimento que não puderam ser preenchidas em outras oportunidades. Para atingir este ponto, muita ajuda foi necessária e os principais benfeitores merecem uma citação.

Agradeço primeiramente à minha mãe, Maria Ferreira, que me sempre me deu forças quando mais precisei.

A meu pai, Álvaro Gaglioti que desde minha infância notou meu interesse em observar as válvulas através das fendas de ventilação da velha “TV GE máscara negra” para tentar entender como a imagem se formava, me ofereceu todo o apoio de que necessitei como sempre.

À Petrobrás que incentiva todos os funcionários a progredir em seus conhecimentos da melhor forma possível e que me contemplou com esta oportunidade, acreditando em meu potencial e reconhecendo minha competência.

Ao Prof. Antônio Frasson, que pacientemente me auxiliou nesta volta ao ambiente acadêmico, pois sem este auxílio tão providencial, tudo seria muito mais difícil.

À minha orientadora, Maria José, que me orientou e me apoiou sempre que necessário.

A meu co-orientador Prof. Marcelo Segatto e ao Prof. Moisés Ribeiro pelas preciosas e dicas.

De uma forma geral agradeço pela oportunidade de participar deste programa, que trouxe uma visão mais ampla do contexto tecnológico e acadêmico e gerou resultados surpreendentes, que vão muito além da contribuição técnica propriamente dita. No aspecto pessoal, fiz muitos amigos e conheci pessoas sensacionais que jamais esqueerei. Profissionalmente, foram enormes ganhos, pois aprendi tecnologias que em meu tempo de estudante não passavam de aplicações promissoras, algumas sequer eram mencionadas, pois o foco da entidade não era telecomunicações. Retomei o raciocínio acadêmico, a muito perdido em meio às atribuições cotidianas da engenharia aplicada.

Por fim, a todos que contribuíram de alguma forma, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Estrutura da fibra óptica.....	1
Figura 1.2 – Evolução da atenuação em fibras ópticas em função da frequência de operação [3].....	2
Figura 1.3 – Sensores extrínsecos [2].....	4
Figura 1.4 – Sensores intrínsecos [2]	5
Figura 2.1 – Interferômetro de Mach-Zehnder com espelhos	9
Figura 2.2 – Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras óptica	10
Figura 2.3 – (a) Problema de atenuação do sinal (fading), (b) Resposta do interferômetro a sinais de grande amplitude.....	13
Figura 2.4 – Imagem capturada de uma distorção do sinal detectado durante os experimentos	14
Figura 2.5 – Interferômetro de Sagnac	15
Figura 2.6 – Esquema sugerido para as montagens M1 e M2 sobrepostas. Diferem apenas com a inclusão da bobina de comprimento $2L$ em M2	18
Figura 2.7 – Esquema sugerido para a montagem M1	19
Figura 2.8 - Esquema sugerido para a montagem M2.....	19
Figura 3.1.1 – Montagem do interferômetro Mach-Zehnder.....	22
Figura 3.1.2 – Acoplamento do alto falante sobre a chapa metálica	23
Figura 3.1.3 – (a) um dos braços do interferômetro na parte superior da bancada e outro sobre a bancada; (b) os dois braços do interferômetro sobre a mesma superfície; (c) os braços do interferômetro em superfícies separadas (por exemplo, outra bancada)	24
Figura 3.2.1 – Área (hachurada) protegida pelas fibras (tracejado)	25
Figura 3.2.2 –Detalhe das fibras ópticas depositadas e encapsuladas em zigue- zague entre fitas adesivas	25
Figura 3.2.3 – A posição P foi inserida nas equações e a distância d_1 calculada, confirmando a validade da simulação. P é a distância entre o ponto onde a perturbação foi aplicada e a bobina. Figura 3.2.4 – Dispositivo para aplicação de perturbações mecânicas. Em (a), a posição inicial estável), em (b) o dispositivo está preparado para disparo no fim de curso e, em (c) a oscilação propriamente dita	26
Figura 3.2.4 – Dispositivo para aplicação de perturbações mecânicas. Em (a), a posição inicial estável), em (b) o dispositivo está preparado para disparo no fim de curso e, em (c) a oscilação propriamente dita	27
Figura 3.2.5 – Montagem M1.....	28
Figura 3.2.6 – Montagem M2.....	29
Figura 3.3.1 – Esquema do interferômetro híbrido Sagnac/Mach-Zehnder	31
Figura 3.3.2 – Montagem experimental - interferômetro híbrido Sagnac/Mach-Zehnder.....	31
Figura 4.1.1 – Espectro da Fonte 1.....	33
Figura 4.1.2 – Espectro	33
Figura 4.1.3 – sinal detectado (tempo).....	33
Figura 4.1.4 – Nível DC.....	33
Figura 4.1.5 – Nível AC.....	33
Figura 4.1.6 – Fonte laser 2.....	33
Figura 4.1.7: Espectro	34

Figura 4.1.8 – Sinal detectado.....	34
Figura 4.1.9 – Nível DC.....	34
Figura 4.1.10 –Nível AC.....	34
Figura 4.1.11 – Fonte 3.....	35
Figura 4.1.12 – Nível espectro.....	35
Figura 4.1.13: Sinal detectado.....	35
Figura 4.1.14: Nível DC.....	35
Figura 4.1.15: Nível AC.....	35
Figura 4.1.16 – Influência da largura de banda sobre o sinal detectado.....	37
Figura 4.2.1 – Exemplo de resposta do sistema à perturbação mecânica aplicada.....	39
Figura 4.2.2 – Resultados das medições nas duas montagens, sendo o eixo “x”, a posição do ponto P onde foram aplicadas as perturbações mecânicas.....	43
Figura 4.2.3 – Sobreposição dos resultados práticos e previstos teoricamente (calculados) em função do ponto onde foram aplicadas as perturbações mecânicas.....	44

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Fibras ópticas e suas características.....	3
Tabela 1.2 – Evolução da atenuação em fibras ópticas em função da frequência de operação, conforme [2].....	5
Tabela 4.1.1 – Comparação dos resultados de desempenho das fontes laser no interferômetro.....	38

Simbologia

DFB – Distributed Feedback Laser

FBG – Fiber Bragg Grating

SMF – Single Mode Fiber

Resumo

Fibras ópticas podem ser utilizadas como sensores para medição de grandezas físicas como pressão, rotação, deslocamento mecânico, temperatura, intensidade de corrente elétrica, deformação mecânica, entre outros. Ao mesmo tempo, podem ser o meio de transmissão do sinal detectado até o sistema de aquisição e processamento. Esta solução tecnológica é conhecida como “sensor baseado em fibra óptica” e tem se tornado cada vez mais utilizada na indústria, a ponto de viabilizar aplicações consideradas impossíveis há alguns anos. Entre os segmentos da indústria que se beneficiam destas novas aplicações estão a indústria petroquímica, transmissão de eletricidade, telecomunicações e construção civil. Seguindo uma abordagem mais específica, há aplicações envolvem o uso de sensores interferométricos para detecção de perturbação ou intrusão em sistemas de segurança para proteção de perímetros ou monitoramento de áreas que exigem vigilância permanente. Tais soluções podem ser extrapoladas para sistemas de detecção de vazamento em dutos, que aliás são objeto de vários estudos. Em todos estes casos, apenas a detecção de sinais acústicos ou perturbações mecânicas não são suficientes, uma vez que é necessária sua localização em perímetros envolvendo grandes áreas. As características do interferômetro de Sagnac são as mais indicadas para esta necessidade, uma vez que sua resposta também é sensível à distância do ponto em que ocorre a perturbação. Com base neste cenário, este trabalho explora a aplicação do interferômetro de Sagnac para a detecção de perturbações mecânicas e localização em perímetros envolvendo grandes áreas. O experimento baseia-se em um modelo teórico conhecido que é aplicado em uma simulação e posteriormente comparado com os resultados obtidos em bancada. O interferômetro de Mach-Zehnder também é explorado com foco no uso potencial em um sistema combinado com um interferômetro de Sagnac. Há estudos visando novas aplicações e o refinamento da tecnologia, que a cada avanço, oferece novos desafios. Este é primeiro trabalho experimental no LabTel aplicando este tipo de sensor em fibra e serve como referência para trabalhos futuros e desenvolvimento de novas tecnologias.

Abstract

Optical fibers can be applied as sensors for pressure, rotation, movement, temperature, electric flow, strength, stress, and so on. It can also be used as a transmission medium for the detected signal up to the acquisition system and data processing module. This technological solution known as “fiber optical sensors” is becoming more attractive even in applications considered impossible few years ago. Among the industry segments that take advantage of such new solutions are petroleum, electricity, telecommunications and the construction area. There are specific applications for intrusion detection in security systems that benefit from interferometry. In this case, Michelson or Sagnac interferometers are extensively explored. Such solutions can be enhanced for leakage detection systems in oil pipes, as already reported. However, when huge areas require the monitoring systems, acoustic signals or mechanical disturbances detection is not sufficient to sense intrusion or localization. The Sagnac interferometer features fits better in such systems, since its response also depends on the distance where the mechanical disturbance is applied. In this scenario, this work explores the application of the Sagnac interferometer for mechanical disturbances detections and localization around well-defined perimeters. The experimental results are compared with simulation results obtained after implementing a reported modeling. Mach-Zehnder interferometer is also set in order to test its potential use on a combined Mach-Zehnder/Sagnac system. New applications and technology enhancement can be explored. This is a first experimental work applying this kind of fiber sensor at LabTel and serves as a reference for future developments.

SUMÁRIO

Dedicatória.....	i
Citação	Erro! Indicador não definido.
Agradecimentos	Erro! Indicador não definido.i
Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas	Erro! Indicador não definido.
Simbologia.....	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Sumario.....	viii
1. Introdução	1
2. Aspectos Teóricos.....	7
2.1 Interferômetro de Mach-Zehnder	7
2.1.1 Interferometria de Duas Ondas	8
2.2 Interferômetro de Sagnac.....	14
3. Montagem Experimental	21
3.1 Detecção de Perturbações Mecânicas através do Interferômetro de Mach-Zehnder	21
3.2 Aplicação do Interferômetro de Sagnac para Detecção de Perturbações Mecânicas e Localização	24
3.3 Interferômetro Híbrido Sagnac/Mach-Zehnder para Sensorização de Perturbações Distribuídas	29
4. Resultados e Discussão.....	32
4.1 Interferômetro de Mach-Zehnder.....	32
4.2 Interferômetro de Sagnac	38
5. Conclusões.....	46
Referências Bibliográficas.....	48
Anexo I	49
Anexo II.....	51
Anexo III.....	52
Anexo IV	54
Anexo V.....	56

1. Introdução

Em 1880, Alexander Graham Bell criou o “fotofone”. Foi a primeira tentativa de transmitir informações através da luz. A ideia era captar a luz solar e modulá-la através de um diafragma, mas esta solução não atingia mais de duzentos metros de alcance. Uma grande desvantagem deste sistema era a transmissão da luz através do ar e, portanto, sujeita a perdas e distorções provocadas pela atmosfera [1].

A primeira tentativa de transmitir a luz através de um meio cristalino ocorreu em 1910, por Hondros e Debye [1,2]. Tratava-se de uma barra de vidro com índice de refração de 1,5 e sem casca. As perdas obtidas foram tão altas que este meio de transmissão mostrou-se impraticável até que em meados de 1950, visando desenvolver melhores endoscópios, foi desenvolvido o guia de onda com núcleo e casca projetados com materiais semelhantes e índices de refração ligeiramente diferentes. Esta nova solução tornou possível reduzir drasticamente a espessura do guia de onda e as respectivas perdas. Em 1966, pouco depois da invenção do laser, Hockham e Wertz conduziram os primeiros experimentos com fibras ópticas para telecomunicações [1]. A Figura 1.1 ilustra a estrutura de uma fibra óptica composta pelo núcleo que é recoberto pela casca.

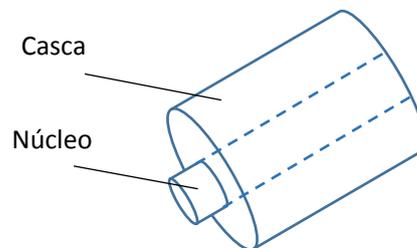


Figura 1.1 – Estrutura da fibra óptica

Inicialmente o material utilizado era sílica (Si), mas foram adicionados novos elementos à sílica, e novos materiais compostos foram obtidos, melhorando consideravelmente seu desempenho. A Figura 1.2 mostra a evolução no desempenho de fibras ópticas em termos de atenuação. As fibras mais modernas apresentam composição material otimizada e as perdas são consideravelmente menores que as fibras produzidas antes dos anos 1980.

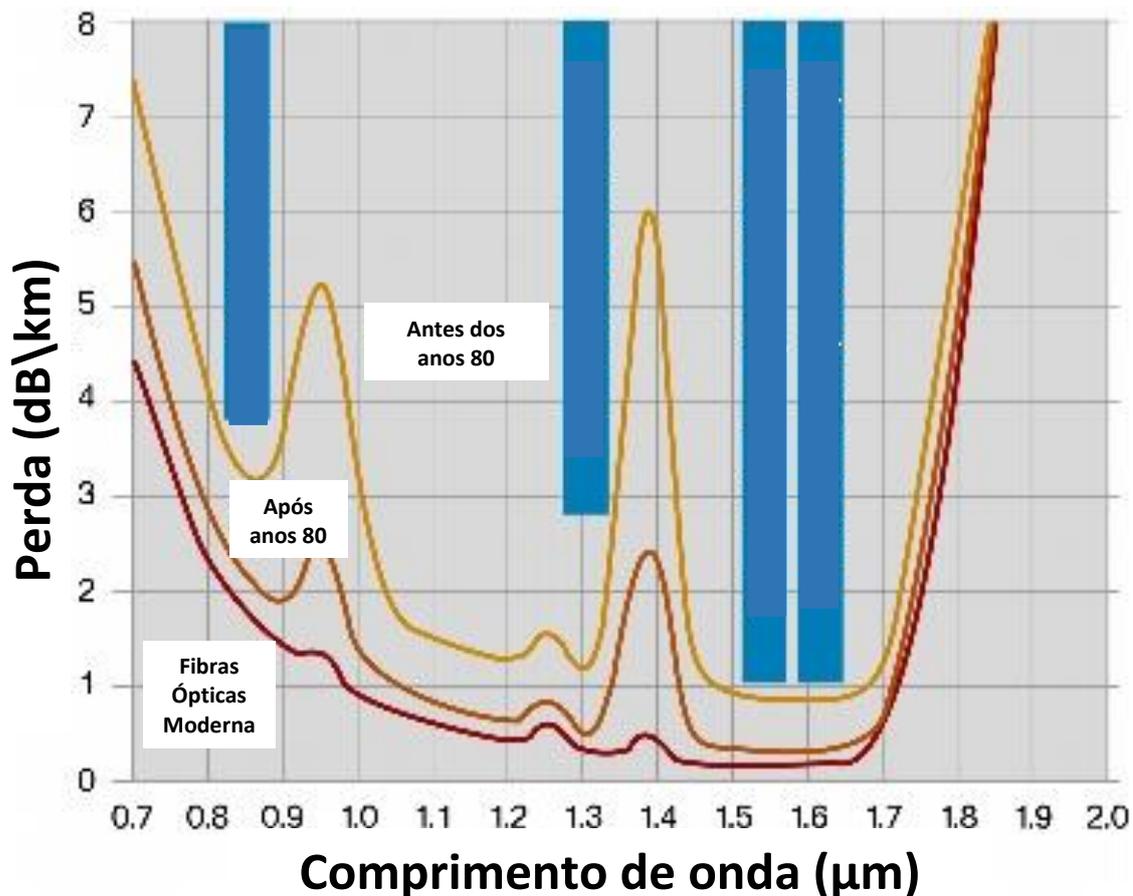


Figura 1.2 – Evolução da atenuação em fibras ópticas em função da frequência de operação [3]

Há inúmeros tipos de fibras ópticas que são classificadas de acordo com o objetivo pelo qual foram projetadas. Entre as muitas variações da composição das fibras, geometria e utilização de dopantes e co-dopantes, as fibras são de modo geral agrupadas como fibras multimodo ou monomodo [4]. monomodo, multimodo e Quanto ao material utilizado para produzir as fibras, este continua a ser um tópico de estudos e constante evolução. As fibras de sílica são hoje as que apresentam menor perda na região de 1550 nm, também conhecida como a terceira janela de comunicação, conforme ilustrado na Figura 1.2. Outros materiais também são utilizados na produção de fibras ópticas tais como fluoretos [5]. Há grandes esforços na pesquisa de materiais alternativos e de baixo custo para a produção de fibras ópticas para aplicações industriais. Este é o caso de fibras poliméricas [6], onde o polimetilmetacrilato (PMMA) é bastante utilizado para produzir este tipo de fibra óptica.

A Tabela 1.1 resume algumas características gerais das fibras de sílica (multimodo e monomodo) e de fibras poliméricas.

Especificações	Fibras de Sílica		Fibras Poliméricas
	Monomodo	Multimodo	Multimodo
Atenuação (dB/km)	0,31 a 0,2	2,6 a 50	50 a 1000
Diâmetro do Núcleo (µm)	9 a 10	100 a 300	125 a 1800
Diâmetro da casca (µm)	125	140 a 400	1250 a 2000
Comprimento de onda de operação (µm)	1,31 a 1,55	0,85	0,65

Tabela 1.1 – Fibras ópticas e suas características

Conforme mostrado na Tabela 1.1, as fibras monomodo apresentam menores valores de atenuação e são largamente utilizadas em aplicações em telecomunicações.

As telecomunicações tiveram grande avanço a partir da tecnologia de fibra óptica, o que exigiu o desenvolvimento de tecnologias de purificação dos materiais para produzir fibras de alta qualidade e confiáveis. As melhorias e o desenvolvimento de técnicas para produção em larga escala trouxeram reduções de custo e implantação de fibras para comunicação em todos os continentes, incluindo o lançamento de cabos submarinos intercontinentais. O mesmo processo de redução de custos e melhorias influenciou os componentes opto-eletrônicos que se desenvolveram rapidamente. Novos mercados se abriram para aplicativos como impressoras laser, copiadoras, “cd-players”. Estas novas tecnologias em fibra óptica e novos componentes opto-eletrônicos também permitiram o desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica [2].

Os sensores baseados em fibra óptica oferecem algumas vantagens em relação a outras tecnologias empregadas em sensores convencionais [2]. Uma característica importante dos sensores em fibra óptica é que são passivos e permitem uma variedade de montagens e arranjos experimentais. Como a fibra tem dimensões reduzidas e é feita a partir de sílica ou utiliza polímeros em sua constituição, é leve e de relativamente fácil manuseio.

São imunes à interferência eletromagnética e suportam altas temperaturas, bem como são resistentes a choque e vibração, o que possibilita uma série de aplicações que seriam inviáveis em outras tecnologias. A estas qualidades, acrescentam-se a alta sensibilidade e o amplo espectro de trabalho, as quais permitem, respectivamente, a detecção de grandezas manométricas e o transporte do sinal de diversos dispositivos simultaneamente através de multiplexação óptica ou elétrica.

Um fator importante que torna cada vez mais acessível o sensoriamento baseado em fibras ópticas é o fato de os custos dos componentes acompanharem a evolução do mercado de telecomunicações, reduzindo exponencialmente os custos de produção.

Os sensores baseados em fibra óptica podem ser classificados como extrínsecos ou intrínsecos [6]. No caso de sensores extrínsecos, o sensoriamento ocorre no ambiente em torno da fibra a qual é utilizada como elemento sensor. A Figura 1.3 ilustra o sensoriamento no caso extrínseco, onde um modulador óptico é sensível a efeitos ambientais e é justamente utilizada como o elemento sensor. As fibras de entrada e de saída são utilizadas para propagar a luz que sofre as alterações ambientais ao passar pelo modulador.

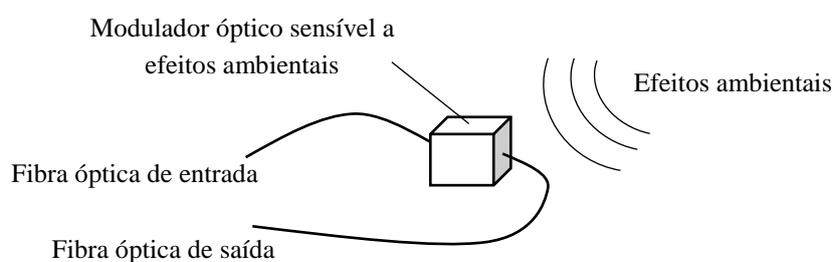


Figura 1.3 – Sensores extrínsecos [2]

O sensoriamento intrínseco é ilustrado pela Figura 1.4. Neste caso a fibra óptica é o próprio elemento sensor e o sensoriamento ocorre dentro da própria fibra. Os efeitos ambientais que ocorrem no entorno da fibra alteram as características de propagação da luz no interior da fibra e podem ser monitorados.

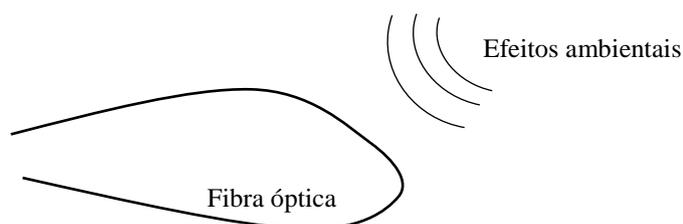


Figura 1.4 – Sensores intrínsecos [2]

Uma subclasse importante de sensores intrínsecos são os sensores interferométricos que apresentam grande sensibilidade e desempenho destacado entre os sensores intrínsecos. A Tabela 1.2 resume os diferentes tipos de sensores interferométricos bastante estudados e desenvolvidos, além de parâmetros típicos medidos para esses sensores [2].

Sensores Interferométricos	
Tipo de Interferômetro	Aplicações (grandezas ou parâmetros típicos medidos)
Sagnac	Rotação, Aceleração, Tensão, Acústica, Comprimento de onda, Campo magnético, Corrente
Acoplamento de modo	Tensão, Temperatura
Anel ressonante	Rotação, Aceleração
Fabry-Perot	Temperatura, Pressão, Acústica, Índice de refração
Mach-Zehnder	Acústica, Campo magnético, Campo Elétrico, Aceleração, Tensão, Temperatura, Corrente
Polarização	Acústica, Aceleração, Pressão, Temperatura, Tensão
Michelson	Acústica, Campo magnético, Campo Elétrico, Temperatura, Tensão

Tabela 1.2 – Evolução da atenuação em fibras ópticas em função da frequência de operação, conforme [2]

Com base na variedade de soluções disponíveis em sensores interferométricos e baseado em modelagem apresentada na literatura para este tipo de sensores [4], [6], este trabalho se propõe a explorar experimentalmente dois tipos em especial: Mach-Zehnder e Sagnac.

O experimento do interferômetro de Mach-Zehnder foi inspirado em [4], e tem como objetivo detectar sinais ultrassônicos em uma chapa metálica através de fibras ópticas em contato com o material. Estes resultados são posteriormente confrontados com os obtidos através da tecnologia convencional baseada em transdutores piezelétricos.

No experimento realizado para este trabalho, o objetivo foi comprovar a aplicação de fibras ópticas como transdutores acusto-ópticos através de um interferômetro Mach-Zehnder e em seguida determinar a influência do tipo de laser no desempenho geral do sistema. Desta forma, pode-se escolher a fonte laser mais adequada para a continuidade dos experimentos deste trabalho e também servir como pré-requisito para outros experimentos, como interferômetros combinados.

Para o interferômetro de Sagnac, o principal objetivo foi explorar suas potencialidades na detecção de perturbações acústicas e também explorar sua potencialidade de localização ao longo do caminho óptico. Uma solução foi explorada em [6], em que se propõe o modelo de um sistema para detecção de intrusão em uma determinada área, assim como a localização do trecho onde ela ocorreu. Os autores apresentam os resultados de um modelo matemático capaz de calcular esta localização através da comparação potência dos sinais que se propagam nos anéis de dois interferômetros de Sagnac atuando paralelamente. Com base nos resultados apresentados em [6], realizou-se nesta dissertação a verificação experimental e posterior comparação com os valores previstos no modelo proposto.

A partir da análise dos resultados experimentais obtidos com os interferômetros de Mach-Zehnder e de Sagnac, realizou-se a análise de um sistema híbrido apresentado em [7], cuja montagem proposta contém simultaneamente os dois tipos de interferômetro. É uma solução promissora, pois combina a boa sensibilidade do interferômetro de Mach-Zehnder com a capacidade de localização do interferômetro de Sagnac, compondo um sistema potencialmente capaz de fornecer resultados de localização mais precisos que os obtidos utilizando apenas o efeito Sagnac.

2. Aspectos Teóricos

As principais características de sensores interferométricos do tipo Mach-Zehnder e do tipo Sagnac são descritos no Capítulo 2.

2.1. Interferômetro Mach-Zehnder

Outra maneira de descrever sensores baseados em fibra do tipo extrínseco, já mencionado anteriormente, é que neste caso a luz simplesmente se propaga até um sensor posicionado no final da fibra. A luz é modificada e retorna para a fonte, normalmente pela mesma fibra, onde é analisada. Este tipo de sensor é normalmente conhecido como sensor de intensidade através de fibra óptica e, neste caso, a fibra não atua como elemento sensor ou participa do mecanismo de sensoriamento. Isto implicaria em ter a luz se propagando na fibra e saindo a partir de uma de suas extremidades para interagir com o sensor, o que causa perda significativa de sinal óptico.

Para a outra classe de sensor baseado em fibra óptica, do tipo intrínseco, onde a fibra age diretamente sobre o mecanismo de sensoriamento ou efeito físico a ser mensurado, não é necessário que a luz saia da fibra para atingir um sensor. Nestes sensores, observa-se que a fase da luz que se propaga pela fibra é modulada pelo efeito físico a ser detectado. Esta modulação de fase é então detectada através da comparação de fase da luz na fibra com a luz que se propaga em uma fibra de referência. Isto caracteriza o sensor interferométrico e o fato da luz permanecer no interior da fibra destaca estes sensores em relação às demais tecnologias, pois a perda de sinal óptico é muito pequena o que contribuiu para acentuar a sua sensibilidade de detecção. O princípio de funcionamento desses sensores se baseia na interferência da luz [2].

Um dos sensores interferométricos mais simples largamente utilizado é o tipo Mach-Zehnder, que assim como o interferômetro de Sagnac, é classificado como interferômetro de duas ondas [5]. Como este é o princípio de funcionamento tanto do interferômetro de Mach-Zehnder como de Sagnac, discute-se a seguir os pontos importantes da interferometria de duas ondas. As características dos interferômetros de Mach-Zehnder e de Sagnac serão discutidas em seguida.

2.1.1. Interferometria de Duas Ondas

Interferometria de duas ondas permite a medida de diferenças de fase extremamente pequenas na fibra óptica gerados pela grandeza a ser medida [2]. O atraso de fase óptico da luz, dado em unidades de radianos, através da fibra é dado por [2],

$$\phi = nkL \quad (2.1)$$

onde n é o índice de refração do núcleo da fibra, k é o número de onda no vácuo ($2\pi/\lambda$, sendo que λ o comprimento de onda), e L é o comprimento físico da fibra ou comprimento do caminho óptico. Pode-se observar que fibras ópticas convencionais sob condições determinadas podem transmitir dois modos de polarização ortogonais. Devido a este efeito, a fibra se torna birrefringente. Conseqüentemente, a luz que sai por uma das extremidades da fibra é, em geral, polarizada elipticamente. Observa-se que o valor de ϕ pode depender da polarização da luz na saída. No entanto, se $L_1 = L_2 = L$, para diferentes modos de polarização, $n_1 \neq n_2$, devido à birrefringência da fibra [2].

Pequenas variações no atraso da fase podem ser avaliadas derivando (2.1) ou [2],

$$\frac{d\phi}{\phi} = \frac{dL}{L} + \frac{dn}{n} + \frac{dk}{k} \quad (2.2)$$

Os dois primeiros termos de (2.2) estão relacionados às mudanças físicas na fibra causadas pela perturbação a ser medida. Eles descrevem o mecanismo de transdução que permite às fibras ópticas agirem como sensores. De forma geral, mudanças na pressão, temperatura e campo magnético resultam em diferentes contribuições para $d\phi$ através dos termos dL e dn . Muitos mecanismos de sensoriamento em baixa frequência, por exemplo, inferiores a 50 kHz dependem de alterações no material que podem ser fixados à fibra, tal como coberturas ou adesivos para interferir especialmente no termo dL . Em consequência, ocorre uma variação no índice de refração dn , porém, de menor magnitude e sinal oposto a $d\phi$. O último termo leva em conta qualquer variação no comprimento de onda associado

à fonte laser. Este termo é útil considerando termos de ruído, de fase e também é importante em algumas abordagens de demodulação [2].

A Figura 2.1 ilustra configuração típica do interferômetro tipo Mach-Zehnder com espelhos. A versão baseada em fibra óptica é, mostrada na Figura 2.2 e conceitualmente, funciona de forma análoga.

Uma fonte de luz coerente é acoplada a uma fibra monomodo. A luz é então dividida através de um acoplador (tipicamente 50/50) em dois caminhos onde a luz em cada um deles apresenta intensidades idênticas. Cada feixe de luz se propaga em um braço do interferômetro. Um deles é denominado “fibra sensora”, onde devem ser aplicados os efeitos físicos, e outro é denominado “fibra de referência”, que deve permanecer em repouso. Isto significa que a fibra de referência não deve sofrer influência do efeito físico aplicado à fibra sensora. Depois que estes dois feixes de luz se propagam através da fibra de referência e da fibra sensora, são recombinados através de um segundo acoplador. Na saída deste segundo acoplador há um sinal resultante da interferência entre os dois sinais. Este sinal se propaga ao longo da fibra de saída até um fotodetector, que finalmente o converterá em um sinal elétrico proporcional à sua intensidade.

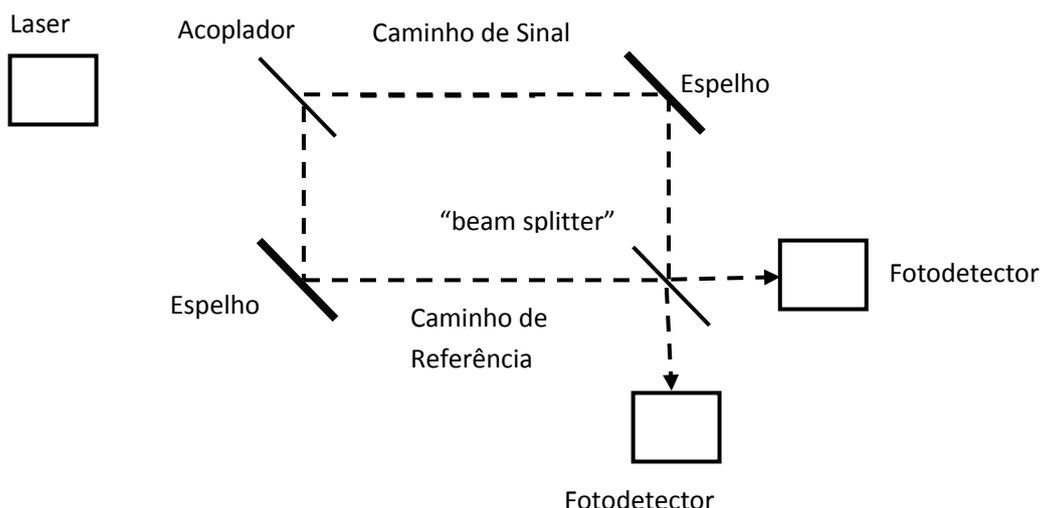


Figura 2.1 – Interferômetro de Mach-Zehnder com espelhos

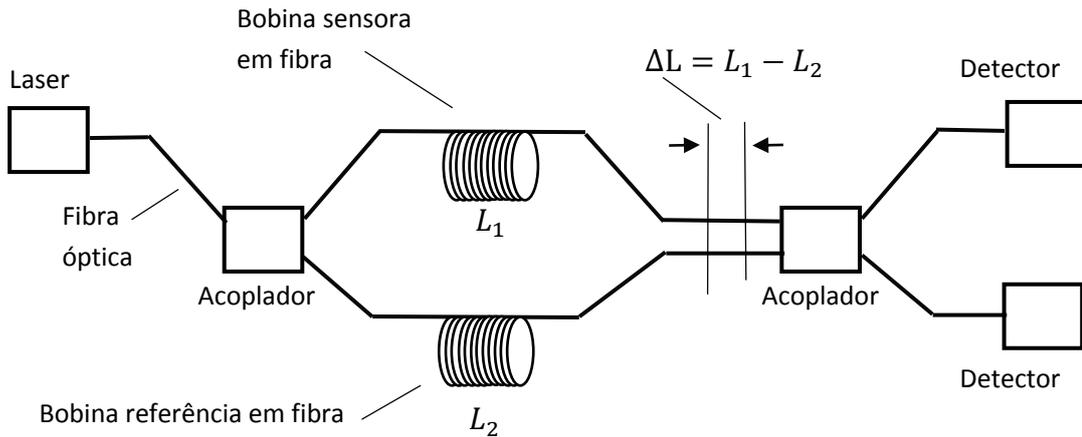


Figura 2.2 – Interferômetro de Mach-Zehnder em fibras óptica

Um elemento chave no interferômetro é o acoplador que basicamente é composto por dois trechos de fibras ópticas especialmente posicionadas e próximas uma da outra o suficiente para que parte da luz de uma seja transferida para a outra. Se os coeficientes de potência dos dois acopladores são k_1 e k_2 , pode-se assumir alguma perda óptica α_s e α_r associadas aos caminhos ópticos de sensoriamento (s) e referência (r), respectivamente. Neste caso α_s corresponde à atenuação do braço sensor, enquanto α_r se refere à atenuação do braço de referência. A saída resultante dos braços é [2],

$$E_r = E_0 \sqrt{\alpha_r k_1 k_2} \cos(\omega_0 t + \phi_r) \quad (2.3)$$

E

$$E_s = E_0 \sqrt{\alpha_s (1 - k_1)(1 - k_2)} \cos(\omega_0 t + \phi_s) \quad (2.4)$$

A intensidade de saída do interferômetro pode ser expressa por:

$$I = \langle E_r^2 \rangle + \langle E_s^2 \rangle + 2 \langle E_r E_s \rangle \quad (2.5)$$

As grandezas E são dadas como valores médios, onde $\langle E \rangle$ representa um tempo médio sobre um período muito maior que $2\pi/\omega_0$. Usando (2.3), (2.4) e (2.5), a intensidade de saída pode ser reescrita como,

$$I = I_0[\alpha_r k_1 k_2 + \alpha_s(1 - k_1)(1 - k_2) + 2\sqrt{\alpha_s \alpha_r k_1 k_2(1 - k_1)(1 - k_2)} \cos(\phi_r - \phi_s)] \quad (2.6)$$

A visibilidade da franja de saída do interferômetro é definida como,

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (2.7)$$

Substituindo (2.6) em (2.7), obtém-se,

$$V = \frac{2\sqrt{\alpha_s \alpha_r k_1 k_2(1 - k_1)(1 - k_2)}}{\alpha_r k_1 k_2 + \alpha_s(1 - k_1)(1 - k_2)} \quad (2.8)$$

Vale ressaltar que os cálculos não incluem efeitos de polarização e coerência da fonte laser.

O complemento da intensidade de saída é:

$$I' = I_0[\alpha_r k_1(1 - k_2) + \alpha_s(1 - k_1)k_2 + 2\sqrt{\alpha_s \alpha_r k_1 k_2(1 - k_1)(1 - k_2)} \cos(\phi_s - \phi_r)] \quad (2.9)$$

Aplicando novamente a definição da visibilidade da franja de saída neste obtém-se:

$$V = \frac{2\sqrt{\alpha_s \alpha_r k_1 k_2(1 - k_1)(1 - k_2)}}{\alpha_r k_1(1 - k_2) + \alpha_s(1 - k_1)k_2} \quad (2.10)$$

Para facilitar as deduções, é conveniente reescrever (2.6) e (2.9) como,

$$I = I_0\alpha(A + B \cos \Delta\phi) \quad (2.11)$$

$$I' = I_0\alpha(C - B \cos \Delta\phi) \quad (2.12)$$

Assumindo que: $\alpha_s = \alpha_r = \alpha$; $A = k_1 k_2 (1 - k_1)(1 - k_2)$; $B = 2\sqrt{k_1 k_2 (1 - k_1)(1 - k_2)}$; $C = k_1(1 - k_2) + (1 - k_1)k_2$; $\Delta\phi = \phi_r - \phi_s$; $k_1 = k_2 = 0,5$ e $V = 1$, (2.11) e (2.12) podem ser reescritas como:

$$I = \frac{I_0 \alpha}{2} (1 + \cos \Delta\phi) \quad (2.13)$$

$$I' = \frac{I_0 \alpha}{2} (1 - \cos \Delta\phi) \quad (2.14)$$

Considera-se também que o diferencial de deslocamento de fase no interferômetro é dado por um termo de sinal $d\phi$ de amplitude ϕ_s e frequência ω e um deslocamento de fase lento ϕ_d . As intensidades I de saída do interferômetro podem ser reescritas como:

$$I = \frac{I_0 \alpha}{2} [1 + \cos(\phi_d + \phi_s \text{sen}\omega t)] \quad (2.15)$$

$$I' = \frac{I_0 \alpha}{2} [1 - \cos(\phi_d + \phi_s \text{sen}\omega t)] \quad (2.16)$$

Convertendo as intensidades de saída em corrente elétrica i através do fotodetector, obtém-se a expressão:

$$i = \varepsilon I_0 \alpha \cos(\phi_d + \phi_s \text{sen}\omega t) \quad (2.17)$$

ε é a responsividade do fotodetector. Analisando detalhadamente (2.17), observa-se que o comportamento da intensidade de sinal detectado pelo fotodetector depende de uma função cosseno, que representa a fase relativa entre os sinais de referência e o sensoriamento, influenciando diretamente na sensibilidade do interferômetro. Dependendo de seus valores, pode causar a atenuação do sinal detectado (*fading*) ou até maximizá-lo. Se os sinais estiverem em uma condição tal que ϕ_d seja aproximadamente π , a sensibilidade será muito baixa, pois a intensidade irá variar em torno do máximo valor da função. Caso seja um valor baixo, por exemplo, em torno de zero, o interferômetro responderá com muito mais sensibilidade a ϕ_s , uma vez que

a intensidade detectada provocará uma resposta praticamente direta. Este é um dos pontos de quadratura do interferômetro [2].

Outra condição de funcionamento está representada graficamente na Figura 2.3.

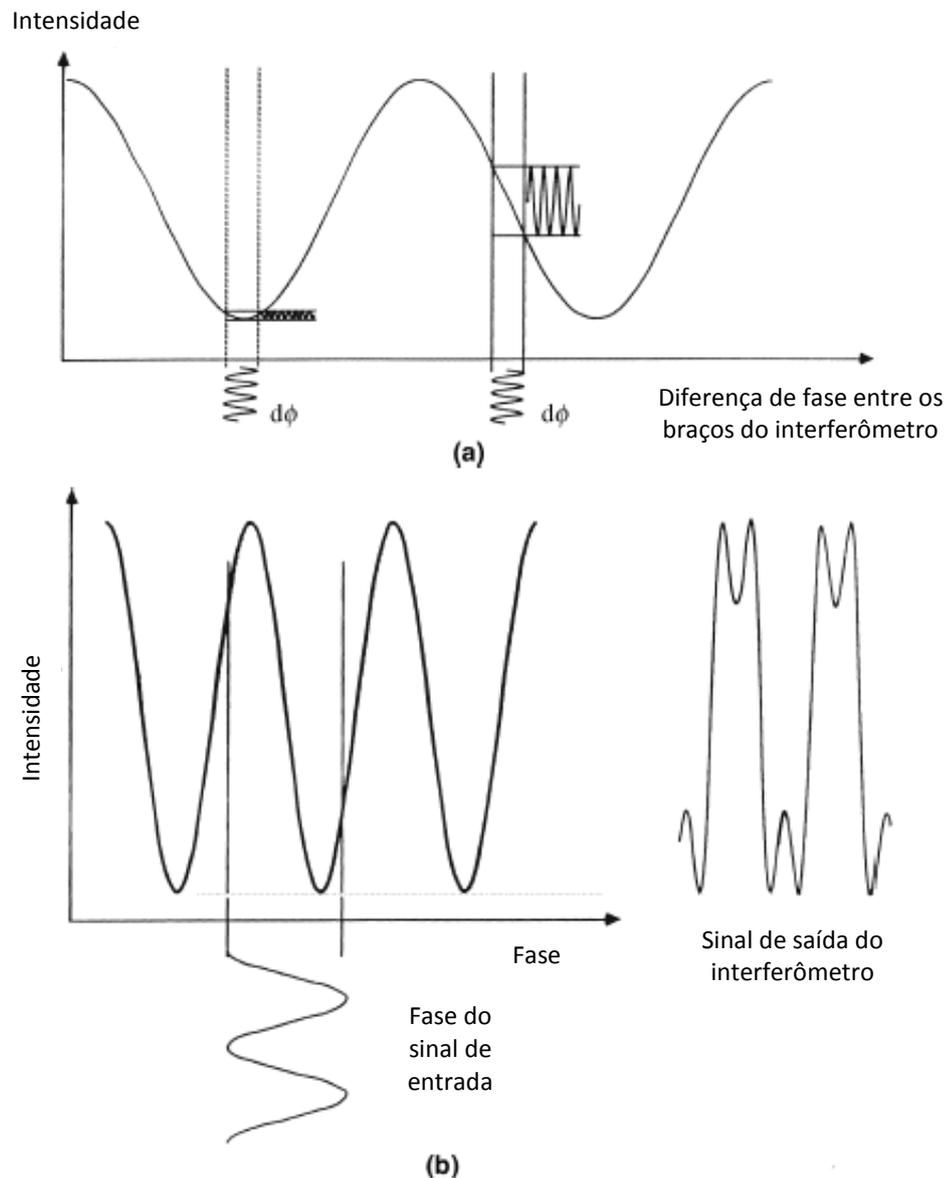


Figura 2.3 – (a) Problema de atenuação do sinal (fading), (b) Resposta do interferômetro a sinais de grande amplitude.

Tal condição de funcionamento, importante a ser considerada, é quando ϕ_s é tão intensa, que excede o efeito de ϕ_d na equação, fazendo com que as fases dos braços de referência e sensoriamento se desloquem acima de 90 graus, o que provoca distorção no sinal da saída, semelhante a um efeito de saturação. Esta

condição foi observada diversas vezes durante os experimentos com o interferômetro Mach-Zehnder e foi observada em menor escala no interferômetro de Sagnac. Uma distorção deste tipo foi captada durante os experimentos para este trabalho, como mostra a Figura 2.4. A solução deste problema através de demodulação não é trivial e não foi aqui considerado.

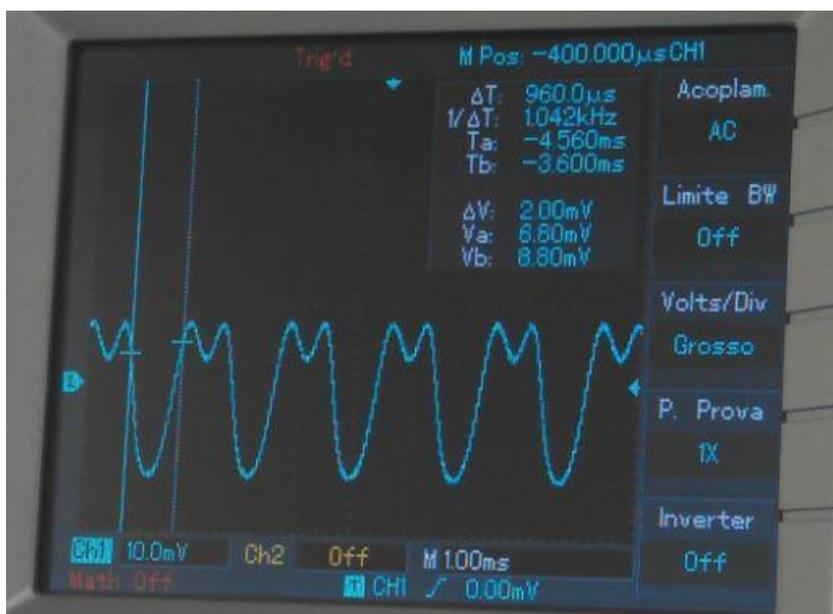


Figura 2.4 – Imagem capturada de uma distorção do sinal detectado durante os experimentos.

2.2. Interferômetro de Sagnac

O interferômetro de Sagnac, conforme ilustrado na Figura 2.5 vem substituindo giroscópios mecânicos [3], mas também é aplicado em medições acústicas, de temperatura, campo magnético, aceleração e tração [2]. É classificado como um interferômetro de duas ondas, pois nele também se propagam duas ondas que percorrem dois caminhos diferentes. No caso dos interferômetros Sagnac, as duas ondas se propagam na mesma fibra, mas em sentidos opostos. Em um giroscópio, por exemplo, uma bobina girando a uma dada velocidade angular, as ondas de sinal e referência são detectadas em instantes de tempo diferentes, resultando em uma diferença de fase proporcional ao comprimento total da fibra e também a seu diâmetro e velocidade angular [2].

A grandeza física a ser medida atua sobre a fibra óptica modulando a fase da luz transmitida. Esta variação de fase depende essencialmente de três parâmetros da

fibra: comprimento (tensão mecânica ou dilatação térmica), índice de refração (temperatura, pressão ou tração) ou diâmetro (pressão radial ou dilatação térmica) [2].

A principal evolução no desenvolvimento de giroscópio em fibra óptica está no sentido de isolar todos os efeitos ambientais da rotação propriamente dita. No entanto, a sensibilidade do interferômetro de Sagnac a estes efeitos ambientais, como vibrações, campo elétrico e magnético, temperatura, pressão, aceleração e tensão também tornam estes dispositivos ideais para outras aplicações, muito além de meros sensores de rotação. Esta seção começa com a introdução ao uso do interferômetro de Sagnac para detecção de rotação incluindo uma introdução ao efeito Sagnac.

A Figura 2.5 mostra o esquema básico de um giroscópio. É um interferômetro passivo, onde um acoplador óptico divide a luz proveniente da fonte em duas ondas contrapropagantes, sendo uma no sentido horário (CW, ou *clockwise*), e contrapropagante (CCW, ou *counterclockwise*). As ondas são então recombinadas no fotodiodo.

A diferença de fase é então acumulada em uma longa bobina de fibra, o que proporciona uma boa resposta com um dispositivo compacto.

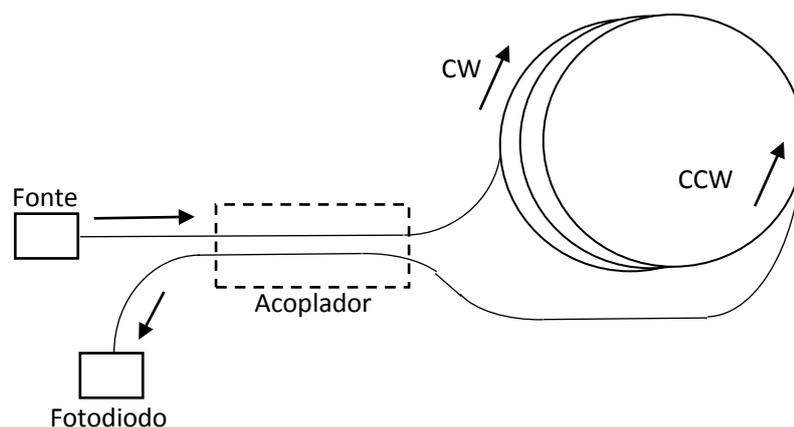


Figura 2.5 – Interferômetro de Sagnac

Considerando uma bobina de uma volta, com comprimento $2\pi r$, Ω é sua rotação mecânica, $\Delta t = L/c$, o tempo que a luz leva para atravessar a bobina ao longo do caminho óptico, r , o raio da bobina e Ωr é a velocidade tangencial da bobina,

portanto, a diferença de espaço que a luz percorre na bobina com a rotação ω é $\Omega r \Delta t$, então o espaço total percorrido é (2.2.1) e (2.2.2):

$$F_{CW} = 2\pi r + \Omega r \Delta t \quad (2.2.1)$$

$$F_{CCW} = 2\pi r - \Omega r \Delta t \quad (2.2.2)$$

A diferença de caminho óptico entre as duas ondas contra-propagantes é [8],

$$F = F_{CW} - F_{CCW} = 2r\Omega\Delta t = \frac{2r\Omega L}{c} \quad (2.2.3)$$

$$F = r\Delta t \quad (2.2.4)$$

No caminho óptico, integrando a quantidade de ciclos no sentido horário é dado por:

$$F_{CW}\Delta t = \frac{2\pi r + \Omega r \Delta t}{\lambda} \quad (2.2.5)$$

e no sentido anti-horário,

$$F_{CCW}\Delta t = \frac{2\pi r - \Omega r \Delta t}{\lambda} \quad (2.2.6)$$

$$F = F_{CW} - F_{CCW} = \frac{2r\Omega}{\lambda} \quad (2.2.7)$$

Uma rápida análise dimensional de (2.2.7) mostra que a unidade da diferença de fase ao longo da bobina é em segundos como esperado. (2.2.7) também mostra que quanto maior a frequência de giro mecânica, ou frequência do movimento, maior a diferença de fase. Como o comprimento de onda da luz é inversamente proporcional, quanto maior a frequência da luz, maior a diferença de fase em relação ao movimento aplicado.

No caso do sensor de intrusão, o loop não se movimentará, ou seja, apenas um pequeno trecho reto sofrerá a perturbação mecânica. Uma rápida modificação em (2.2.7) convertendo a velocidade tangencial $r\Omega$ do movimento giratório da bobina para um movimento linear clássico $\Delta s/\Delta t$, sendo s o deslocamento do trecho reto e t o tempo deste deslocamento, pode-se escrever:

$$F = \frac{2 \Delta s}{\lambda \Delta t} \quad (2.2.8)$$

Desta forma é mais evidente que o deslocamento de fase é diretamente proporcional à amplitude do movimento aplicado ao trecho linear e inversamente proporcional ao tempo do movimento, ou seja, proporcional à frequência do mesmo.

Este pequeno trecho, entretanto, não se movimentará apenas no sentido do plano estudado no caso do giroscópio, mas sofrerá toda uma sorte de movimentos e esforços horizontais, verticais, torções, trações, compressões ou variações de temperatura que também provocarão alterações na propagação da luz no trecho, resultando em variações de fase e conseqüentemente, em variações de intensidade detectáveis na saída do sistema. Alguns movimentos podem provocar até mesmo atenuação do sinal. Todos estes movimentos podem ser acrescentados ao modelo básico, entretanto, este desenvolvimento foge ao escopo deste estudo.

Concluído o conceito de deslocamento de fase de Sagnac, segue a análise do mecanismo de detecção e localização das perturbações mecânicas.

O conceito se baseia em dois sistemas sobrepostos, montados na configuração de sensores interferométricos de Sagnac. O modelo conhecido dado em [6] explora as proporções de atenuação no anel que compõe o interferômetro de Sagnac e utiliza um anel adicional como referência para localizar/identificar a perturbação. As duas montagens definidas como Montagem 1 (M1) e Montagem 2 (M2) estão conectadas à bobina de fibra com comprimentos específicos. No entanto, M2 difere de M1 pois está conectada a uma bobina adicional para deslocar o centro do anel que compõe o interferômetro de Sagnac. Uma perturbação mecânica é aplicada simultaneamente aos dois interferômetros o que resulta na detecção de dois sinais com intensidades

distintas. Estas intensidades detectadas são aplicadas a um sistema de duas equações e duas incógnitas, o que permite determinar a distância onde a perturbação ocorreu. A Figura 2.6 apresenta o esquema básico proposto [6]. O local onde a perturbação mecânica é aplicada sofre deformações que alteram a fase da luz através da fibra tanto no sentido horário como no sentido anti-horário de ambos interferômetros [6].

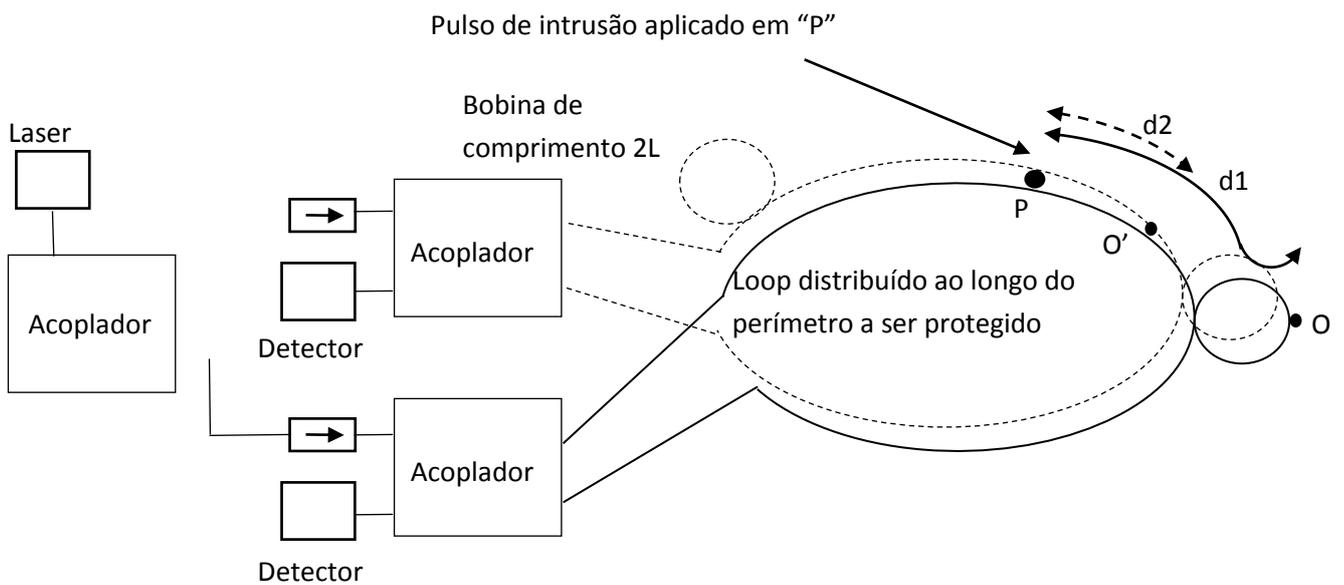


Figura 2.6 – Esquema sugerido para as montagens M1 e M2 sobrepostas. Diferem apenas com a inclusão da bobina de comprimento $2L$ em M2.

A luz no sentido horário entre a fonte e o fotodetector passa duas vezes pelo acoplador. No sentido anti-horário, a luz atravessa o acoplador duas vezes, mas defasada de 180 graus em relação à luz no sentido horário, portanto, se não houver qualquer perturbação, nada será detectado [6].

A Figura 2.7 contém a montagem individual, conforme sugerido para M1.

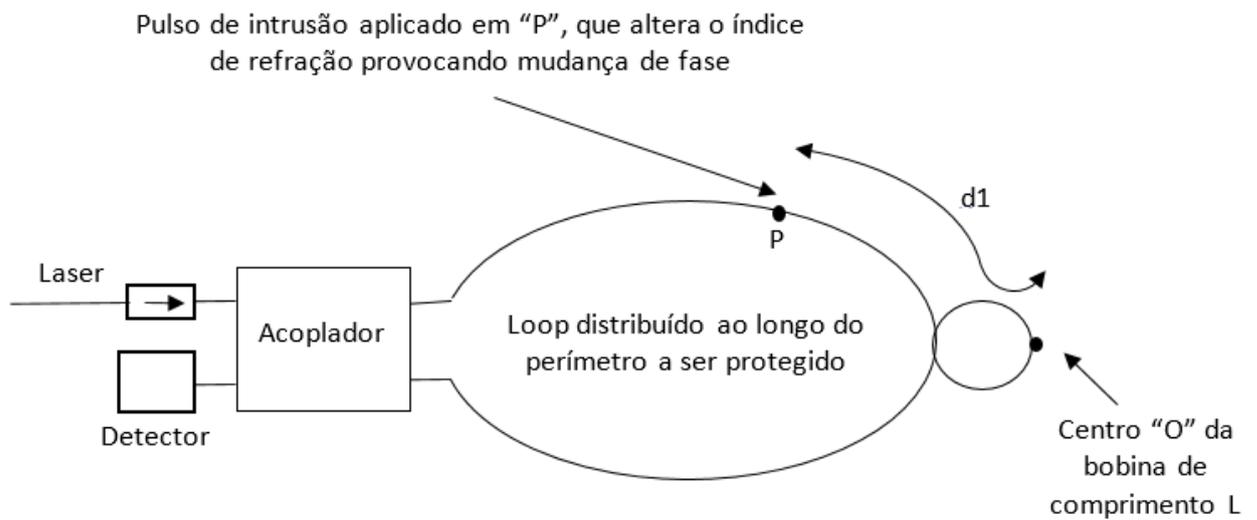


Figura 2.7 - Esquema sugerido para a montagem M1

Analisando as montagens de forma individual, em M1 mostrado na Figura 2.7, $d1$ é a distância entre o ponto central do loop e o ponto P onde é aplicada a perturbação. Para uma perturbação aplicada em P à distância $d1$ do centro do loop, a luz viaja aproximadamente $2d1$ em relação à luz no sentido anti-horário dependendo do lado do centro do loop onde ela ocorre. O atraso entre a detecção da perturbação ao longo dos dois caminhos e o detector é:

$$\Delta t = \frac{2d1}{v} \quad (2.2.9)$$

A Figura 2.8 contém a montagem individual, conforme sugerido para M2.

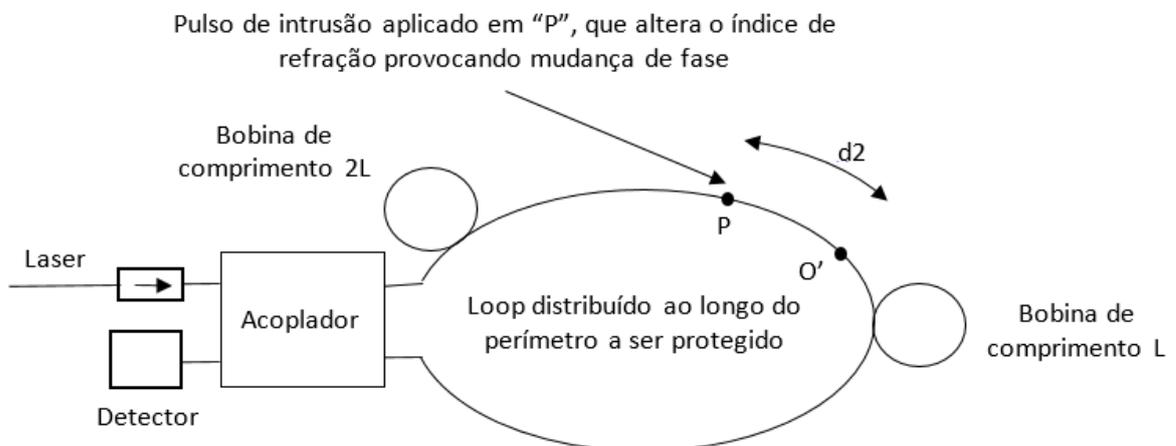


Figura 2.8 - Esquema sugerido para a montagem M2

Na montagem M2, foi inserida uma bobina adicional de comprimento 2L que desloca o centro de seu loop para fora da bobina de comprimento L, então, a distância entre o centro e o ponto P é d_2 . Como nas duas montagens sobre postas o ponto P é o mesmo, então:

$$d_2 = d_1 \pm L \quad (2.2.10)$$

Para as diferenças de fase no sentido horário e anti-horário $\phi(t + \Delta t)$ e $\phi(t)$ respectivamente, a diferença de fase total $\Delta\phi$ no fotodetector pode ser escrita como:

$$\Delta\phi = \phi(t + \Delta t) - \phi(t) = \Delta t \frac{d\phi}{d_1 t} = \frac{2d_1}{v} \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2.11)$$

$$P'(t) = \frac{P(t)}{P_0} = 1 - \cos\Delta\phi = 1 - \cos\left(\frac{2d_1}{v} \frac{d\phi}{dt}\right) \quad (2.2.12)$$

Com base nestas premissas, foram obtidas as equações para cálculo da potência normalizada (2.2.13) e (2.2.14), onde $P'_1(t)$ é a potência normalizada de M1 e $P'_2(t)$ a potência normalizada de M2 (com a bobina adicional de comprimento 2L).

$$P'_1(t) = 1 - \cos\left(\frac{2d_1}{v} \frac{d\phi}{dt}\right) \quad (2.2.13)$$

$$P'_2(t) = 1 - \cos\left(\frac{2(d_1 \pm L)}{v} \frac{d\phi}{dt}\right) \quad (2.2.14)$$

Com $P'_1(t)$ e $P'_2(t)$, há duas equações e duas incógnitas. Isolando a variável d_1 , obtém-se (2.2.15) [2].

$$d_1 = \pm \frac{L \cos^{-1}(1 - P'_1)}{\cos^{-1}(1 - P'_2) - \cos^{-1}(1 - P'_1)} \quad (2.2.15)$$

Finalmente, com base nas potências fornecidas por de M1 e M2, a distância onde a perturbação foi aplicada em relação ao centro do loop pode ser inferida por (2.2.15).

3. Montagem Experimental

Descreve-se a seguir os experimentos relacionados à detecção de perturbações mecânicas utilizando os interferômetros de Mach-Zehnder e Sagnac, além do interferômetro híbrido combinando as duas configurações.

3.1. Detecção de perturbações mecânicas através do interferômetro de Mach-Zehnder

O experimento tem dois objetivos: confirmar a detecção acústica através de um interferômetro de Mach-Zehnder e determinar o tipo de laser mais adequado para seu funcionamento. A montagem foi baseada em [4].

Foram utilizadas duas fibras monomodo desencapadas como braços sensor e referência com 3 m de comprimento cada.

O esquema escolhido é apresentado na Figura 3.1.1. Trata-se um sinal contínuo de uma fonte laser, dividido em dois através de um acoplador óptico 50/50. Cada parte do sinal dividido é transmitido por uma fibra óptica independente. Os sinais são então somados por outro acoplador 50/50 e sua resultante volta a se propagar através de uma única fibra. Este sinal é finalmente detectado por um fotodiodo que converte a luz em um sinal elétrico. Cada fibra dividida é chamada braço do interferômetro. Qualquer perturbação na propagação da luz em um deles provoca atraso de fase em relação ao outro. Quando o sinal dos dois braços é somado, a resultante é modulada com o efeito desta diferença de fase entre eles graças às mudanças nas condições de propagação provocadas pela oscilação mecânica aplicada a um deles. Esta modulação é captada pelo fotodiodo presente na saída do sistema, resultando em uma variação de tensão elétrica.

Na montagem, vários parâmetros foram testados para determinar quais influenciariam os resultados em termos de sensibilidade e estabilidade das medições. As melhores combinações entre os parâmetros estudados foram escolhidas. São elas: tipo de laser, potência do laser, distanciamento / isolamento / posicionamento entre os braços do interferômetro, área de contato com o objeto em teste, potência acústica do alto falante, influência do isolador e controlador de polarização.

Foram testados basicamente fontes laser DFB disponíveis. A potência das fontes laser foi mantida constante e próxima da potência nominal do fotodiodo (cerca de -2 dBm).

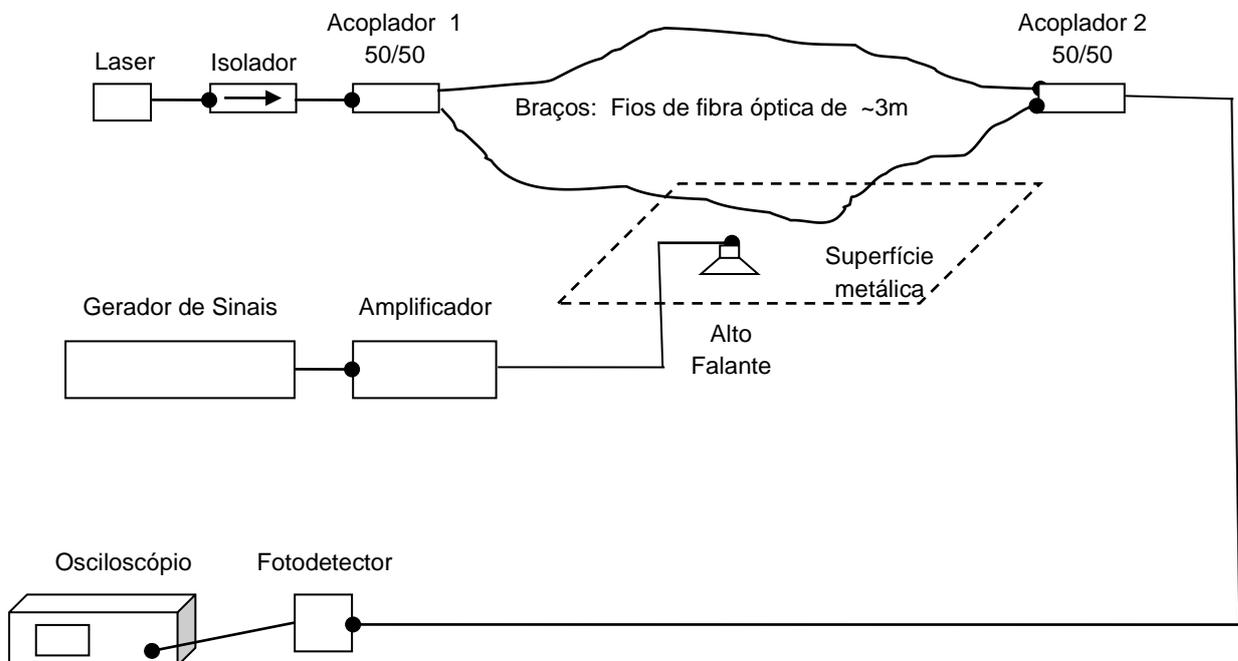


Figura 3.1.1 – Montagem do interferômetro Mach-Zehnder

Para determinar a influência do tipo de laser no desempenho do interferômetro, foi preparado o experimento que inclui uma placa metálica com um alto falante acoplado, conforme Figura 3.1.2, onde são aplicados sinais de áudio. A fibra óptica capta as oscilações mecânicas através do contato físico com a placa metálica em um determinado ponto. Foi definido um trecho de contato com cerca de 1 cm entre a placa e a fibra, fixada através de fita adesiva.

Como esperado, o interferômetro detectou as frequências aplicadas e cada frequência detectada apresentou uma amplitude característica. Diversos efeitos de propagação acústica no material em teste afetam a amplitude do sinal detectado, entretanto, como a propagação acústica na placa metálica não é objeto deste estudo, o experimento limitou-se a confirmar a detecção e escolher a frequência acústica que apresentasse a melhor resposta em amplitude. Neste caso, com a configuração escolhida, foram testados sinais na faixa de 100 Hz a 2 kHz a frequência que proporcionou a maior amplitude detectada foi 540 Hz.



Figura 3.1.2 – Acoplamento do alto falante sobre a chapa metálica

A potência dos lasers foi fixada em aproximadamente -2 dBm e comprimento de onda em torno de 1550 nm.

Em seguida foram testados diversos arranjos de montagem como representado na Figura 3.1.3. para determinar a influência da posição ou o isolamento dos braços no comportamento do sistema. Na Figura 3.1.3 (a), um dos braços do interferômetro foi posicionado na parte superior da bancada e outro sobre a bancada. No caso da Figura 3.1.3 (b), os dois braços do interferômetro foram colocados sobre a mesma superfície. Já na Figura 3.1.3 (c) os braços do interferômetro foram arrumados em

superfícies separadas (por exemplo, em outra bancada). A resposta do interferômetro foi anotada para uma dada frequência, em cada uma das três posições.

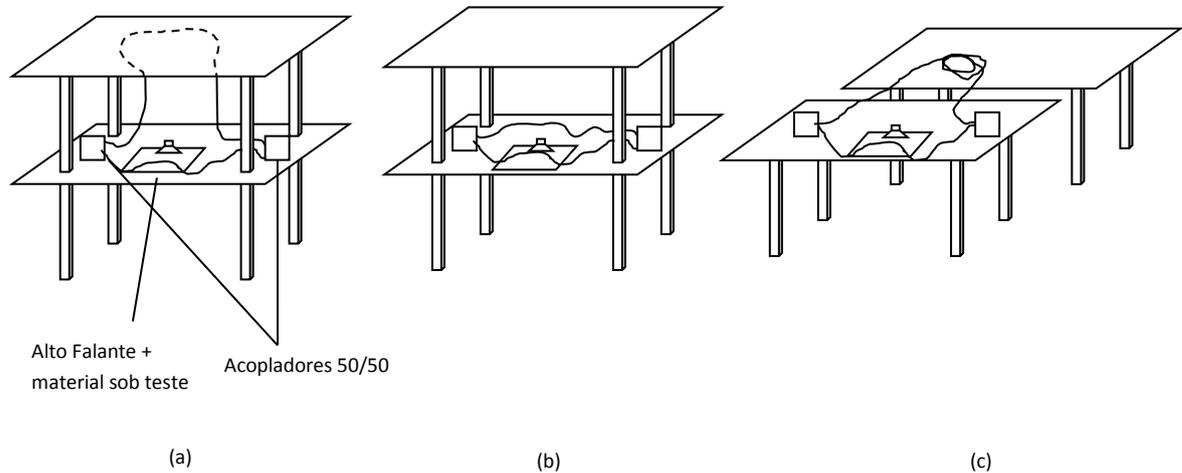


Figura 3.1.3 – (a) - um dos braços do interferômetro na parte superior da bancada e outro sobre a bancada, (b) Os dois braços do interferômetro sobre a mesma superfície (c) Os braços do interferômetro em superfícies separadas (por exemplo, outra bancada)

Em seguida foram substituídas as fontes laser. Seus espectros foram registrados, assim como os sinais elétricos nos terminais do fotodetector.

3.2. Aplicação do Interferômetro de Sagnac para Detecção de Perturbações Mecânicas e Localização

Esta montagem e análise do funcionamento de um interferômetro Sagnac para detecção de invasão de área e localização foi baseado em [6].

Para melhor ilustrar o conceito proposto no experimento, a Figura 3.2.1 mostra uma área circundada por uma fibra óptica conectada ao sistema e Figura 3.2.2 mostra a sugestão apresentada pelo artigo para maximizar a exposição da fibra óptica à vibração provocada pelo intruso. Trata-se de um par de fibras ópticas fixadas em zigue-zague entre duas fitas adesivas para instalação no subsolo próximo à superfície.

Para as medições em bancada neste experimento, optou-se por de uma fibra monomodo desencapada com 3 m de comprimento e pela aplicação de movimentos diretos e mais contundentes de baixa frequência provocados por uma mola, simulando o movimento de uma cerca comum de arame durante a passagem de intrusos.

O sistema proposto prevê a aplicação simultânea de dois interferômetros, entretanto, restrições de equipamentos exigiram que o experimento utilizasse interferômetros independentes. Como a medida principal é a potência de saída de cada interferômetro em função do ponto onde a perturbação é aplicada, foram necessários cuidados especiais para isolar outras variáveis, padronizando frequência e intensidade da perturbação mecânica, mantendo a disposição dos componentes e alterando minimamente as conexões.

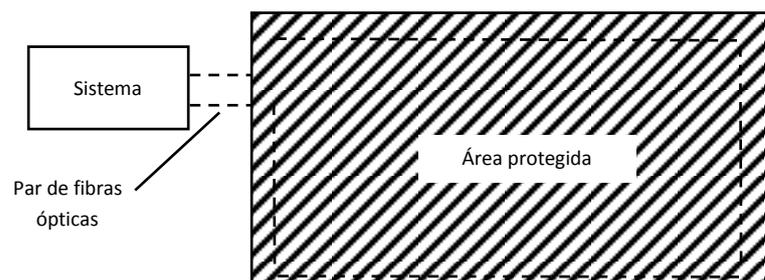


Figura 3.2.1 – Área (hachurada) protegida pelas fibras (tracejado)

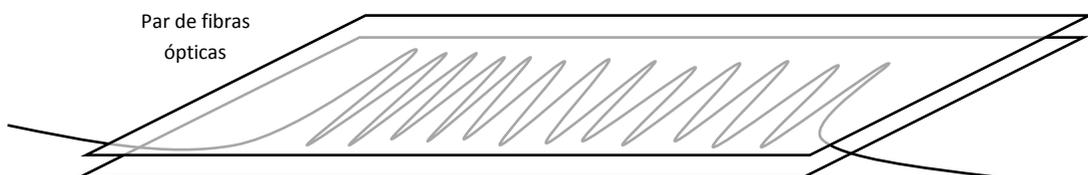


Figura 3.2.2 – Detalhe das fibras ópticas depositadas e encapsuladas em zigue-zague entre fitas adesivas

Considerando que a bobina de comprimento L é de 25 km, a distância de seu centro até sua extremidade é 12,5 km, logo, se $P = 0$, $d1 = 12,5$ km. Se $P = 1$ km, $d1 = 13,5$ km e assim por diante.

Os valores foram substituídos nas equações e o resultado é apresentado na Figura 3.2.3, que comprova a aplicabilidade das equações.

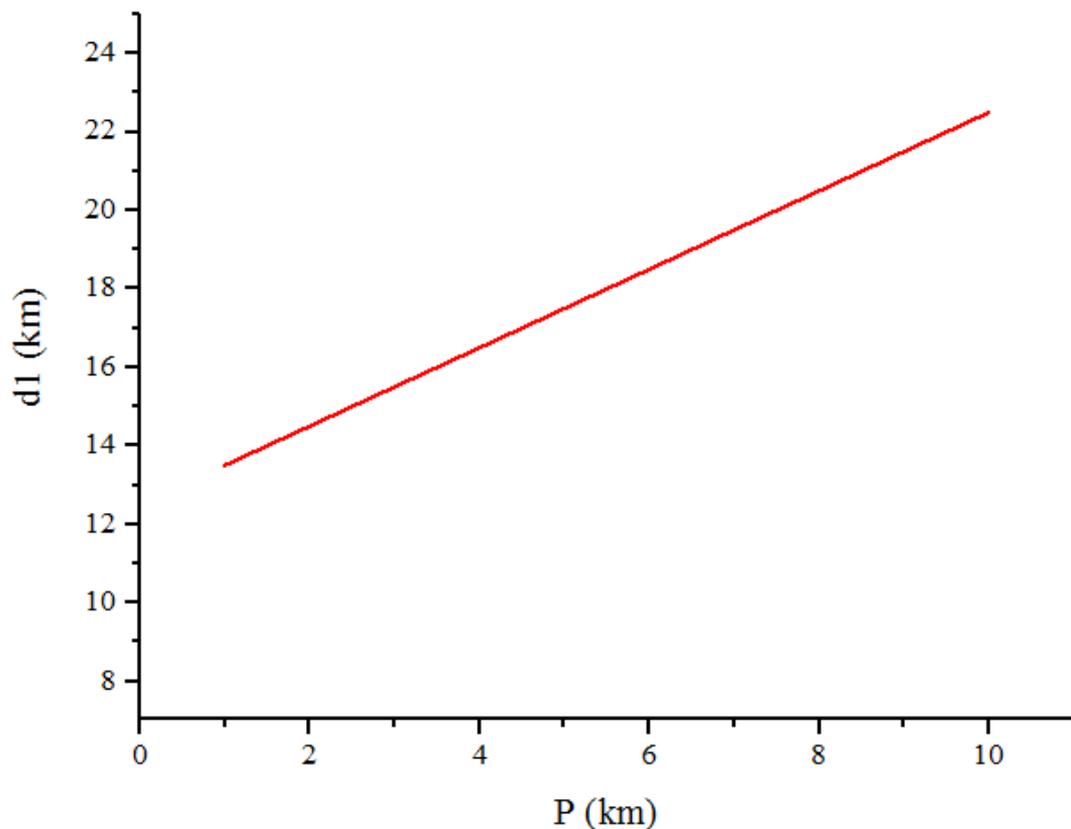


Figura 3.2.3 – A posição P foi inserida nas equações e a distância $d1$ calculada, confirmando a validade da simulação. P é a distância entre o ponto onde a perturbação foi aplicada e a bobina.

Foi desenvolvido um dispositivo com mola para simular uma perturbação mecânica provocada por um intruso que passa por uma cerca, por exemplo. Desta forma, há garantia da repetibilidade de frequência e intensidade das perturbações mecânicas. O dispositivo está ilustrado abaixo em suas diversas posições de funcionamento:

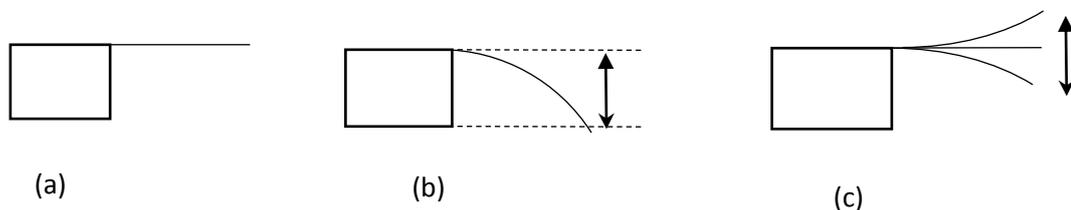


Figura 3.2.4 – Dispositivo para aplicação de perturbações mecânicas. Em (a), a posição inicial estável), em (b) o dispositivo está preparado para disparo no fim de curso e, em (c) a oscilação propriamente dita.

Trata-se de uma base sólida com uma chapa acrílica fixada a ela na parte superior. A fibra sensora é fixada com fita adesiva na ponta da chapa acrílica. Com a base fixa na Figura 3.2.4(a), a chapa é flexionada até a superfície da bancada que age como um fim de curso conforme ilustra a Figura 3.2.4(b). Isto permite padronizar a força e posição iniciais para aplicação da perturbação, o que garante a repetibilidade de frequência e intensidade das perturbações mecânicas quando liberada, conforme Figura 3.2.4(b). Vale ressaltar que não é objeto deste estudo a análise do comportamento da mola, razão pela qual, não foi abordada.

Em uma primeira versão, o experimento foi reproduzido com bobinas disponíveis de comprimento $L = 25$ km e $2L = 50$ km. Esta montagem não apresentou resultados satisfatórios, pois devido aos grandes comprimentos envolvidos o sistema apresentou extrema sensibilidade, detectando um elevado nível de ruído. Outro problema observado foi a detecção indireta das perturbações através das bobinas ao invés do trecho onde foi aplicada a perturbação (fibra sensora), invalidando as medições.

Foram aplicados atenuadores fixos e variáveis combinados no lugar das bobinas. Esta opção elimina o problema da sensibilidade exagerada das grandes bobinas e facilita o deslocamento do ponto de aplicação das perturbações. Com estas vantagens, esta foi a opção escolhida e as montagens representadas nas Figuras (3.2.5) e (3.2.6), (M1 e M2 respectivamente):

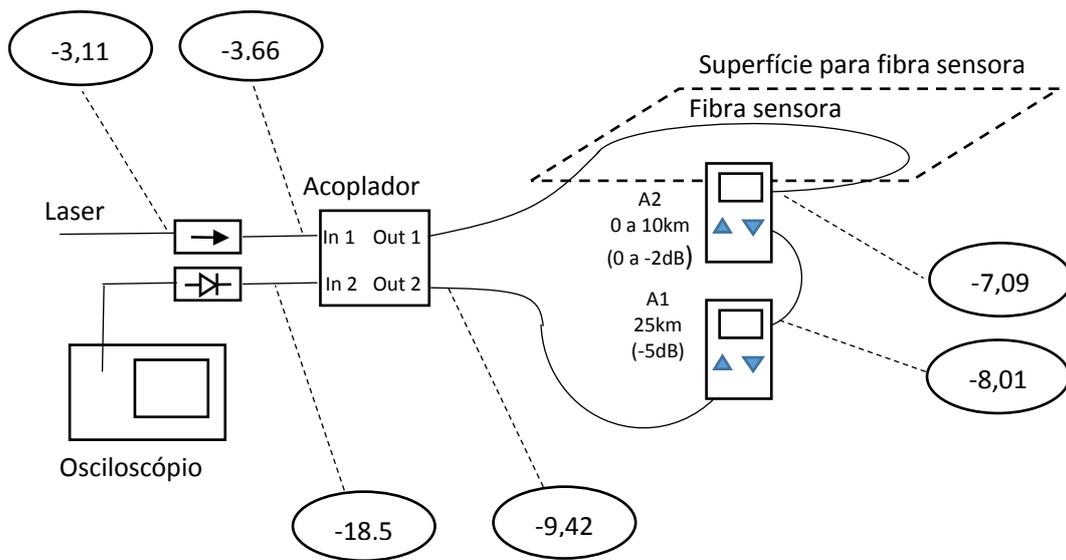


Figura 3.2.5 – Montagem M1

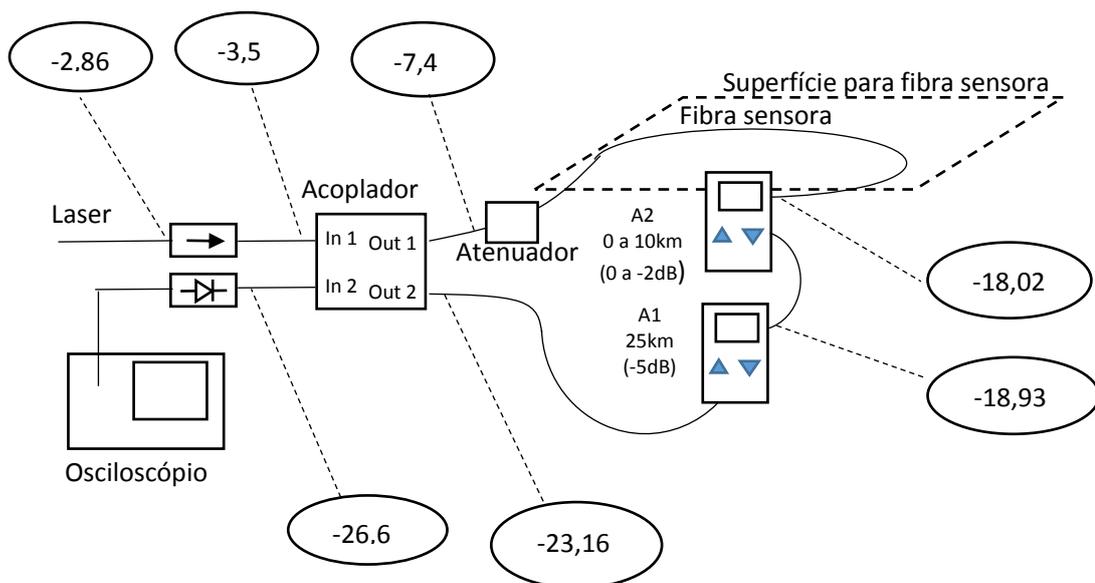


Figura 3.2.6 – Montagem M2

O laser utilizado é tipo DFB com potência de $-2,85$ dBm especialmente selecionado entre os disponíveis em função da simetria de seu espectro de saída conforme experimento anterior com interferômetro Mach-Zehnder. O acoplador é 50/50. A fibra sensora é SMF e tinha 3 m de comprimento. As perturbações foram aplicadas através do dispositivo com mola e cada medição foi repetida 7 vezes.

Considerando uma perda nominal de cada fibra igual a 0,2 dB/km, os atenuadores foram ajustados a cada 0,2 dB para que as medições refletissem uma perda equivalente ao trecho de 1 km de fibra óptica por ponto, simulando sua posição em uma grande área protegida. Na montagem M1, o Atenuador 2 representa a bobina de 25 km, ajustado com uma atenuação fixa equivalente (5 dB). O Atenuador 1 simula a localização do ponto P através de um ajuste escalonado, sendo acrescentados 0,2 dB a cada 1 km, totalizando 2 dB (10 km).

A montagem M2 é idêntica à montagem M1, mas com um atenuador de 10 dB posicionado no local onde estaria a bobina de comprimento 2L (50 km).

A intensidade da perturbação e a disposição das fibras foram mantidos constantes durante os experimentos nas duas montagens e durante as medições, variando apenas a atenuação do Atenuador 1.

As medições de intensidade das perturbações mecânicas foram realizadas de forma independente em cada montagem e aplicadas na equação que determina $d1$.

3.3. Interferômetro híbrido Sagnac/Mach-Zehnder para sensorização de perturbações distribuídas

O objetivo foi reproduzir o experimento de um sistema híbrido apresentado em [8], comparando os resultados medidos com os resultados obtidos utilizando os interferômetros de Sagnac sobrepostos.

O esquema deste experimento está representado na Figura 3.3.1.

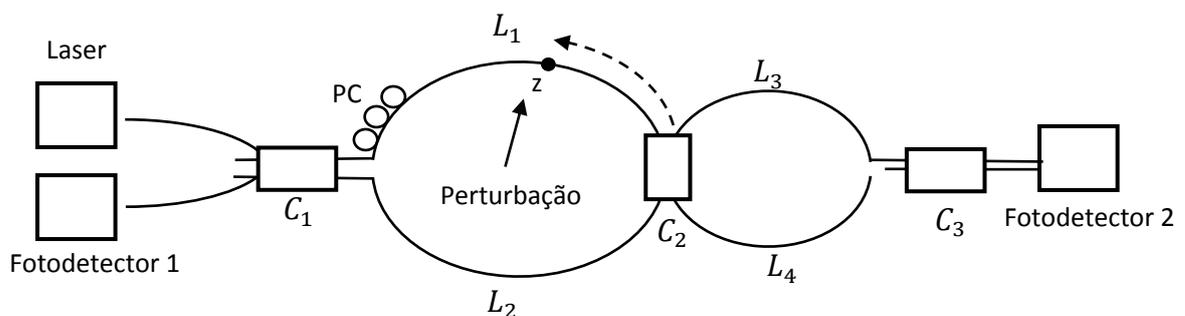


Figura 3.3.1 – Esquema do interferômetro híbrido Sagnac/Mach-Zehnder

O interferômetro de Sagnac consiste nas fibras L1 e L2 e o acoplador C1. O primeiro braço do interferômetro de Mach-Zehnder é composto pelas fibras L1 e L4 e o segundo braço, L2 e L3. O laser alimenta os dois interferômetros. O fotodetector 1 recebe o sinal do interferômetro de Sagnac e o fotodetector 2, o interferômetro de Mach-Zehnder. A relação dos acopladores é 50/50.

A perturbação aplicada em z provoca a saída (1) no interferômetro de Sagnac:

$$I_S = \frac{I_0}{4} \left[1 - \cos \left(\frac{d\phi(t)}{dt} \frac{2z}{c} n \right) \right] \quad (3.3.1)$$

Onde I_0 é a intensidade da fonte laser

$\phi(t)$ é a fase da perturbação

n é o índice de refração do núcleo da fibra

c é a velocidade da luz no vácuo

A saída do interferômetro de Mach-Zehnder sob as mesmas condições é

$$I_{MZ} = \frac{I_0}{4} (1 + \cos(\phi(t))) \quad (3.3.2)$$

Introduzindo o efeito de birrefringência no loop de Sagnac, sua resposta pode ser “biased” para ser uma função seno com o mesmo argumento:

$$I_{SB} = \frac{I_0}{4} \left[1 - \text{sen} \left(\frac{d\phi(t)}{dt} \frac{2z}{c} n \right) \right] \quad (3.3.3)$$

Ao restringir o argumento da função (3.3.3) para valores pequenos, a componente AC da saída do interferômetro de Sagnac pode ser expressa por

$$V_S \approx \frac{d\phi(t)}{dt} \frac{2z}{c} n \quad (3.3.4)$$

O interferômetro de Mach-Zehnder apresenta na saída um sinal cossenoidal com a frequência

$$\omega_{MZ} \approx \frac{d\phi}{dt} \quad (3.3.5)$$

A posição da perturbação pode então ser obtida a partir de (2.24) e (2.25),

$$z \approx \frac{V_S}{\omega_{MZ}} = V_S \cdot T_{MZ} \quad (3.3.6)$$

O artigo propõe uma alternativa aos sensores de fibra óptica com um interferômetro que combina o tipo Mach-Zehnder com o Sagnac na mesma fibra. A saída do interferômetro de Sagnac é proporcional ao produto da magnitude e da posição onde ela é aplicada. O Interferômetro de Mach-Zehnder é proporcional apenas à magnitude da perturbação. A posição e a magnitude podem ser determinados através destes dois sinais através de uma fibra sensora com extensão de 200 m, conforme sugerido em [6].

No experimento proposto, a fibra sensora é substituída por uma fibra com 3 m de extensão conectada entre dois atenuadores (A1 e A2) que são ajustados de forma a simular a posição do ponto onde a perturbação é aplicada, onde as distâncias entre o trecho anterior e posterior à perturbação são simuladas ajustando-se as atenuações equivalentes.

O esquema com a alteração em relação ao esquema sugerido pelo artigo está representado na Figura 3.3.2.

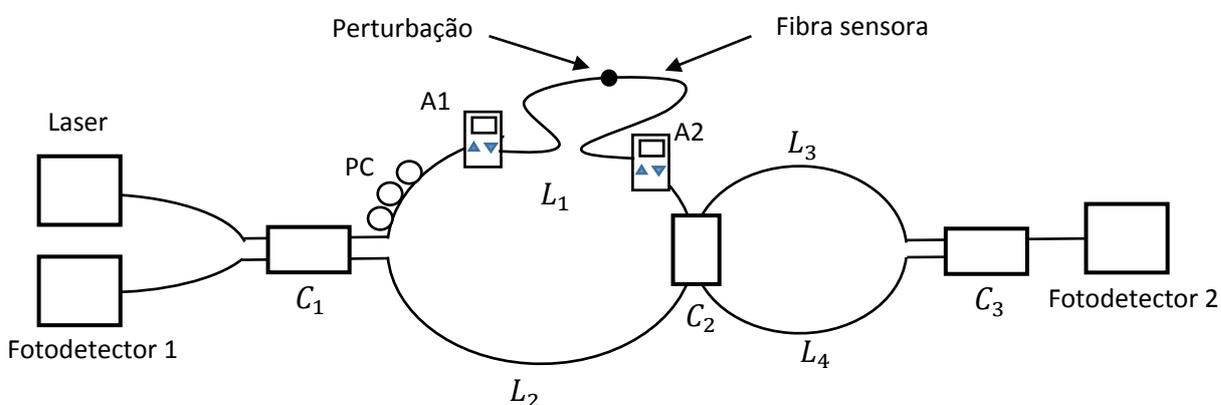


Figura 3.3.2 – Montagem experimental - interferômetro híbrido Sagnac/Mach-Zehnder

Os valores obtidos são aplicados à equação (3.3.6) e as distâncias calculadas. Com os resultados obtidos, pode-se validar tanto a proposta dos interferômetros combinados como o método de medição experimental substituindo-se as fibras por atenuadores.

4. Resultados e Discussão

Discute-se, a seguir, os principais resultados experimentais obtidos com a realização das montagens dos interferômetros de Mach-Zehnder e Sagnac.

4.1. Interferômetro de Mach-Zehnder

A seguir estão os espectros registrados na saída do interferômetro, bem como os resultados do sinal acústico detectado em cada saída.

Todas as fontes laser são do tipo DFB, identificadas como fonte 1, fonte 2 e fonte 3.

Fonte 1: potência de $-2,51$ dBm e a curva medida está na Figura 4.1.1, onde se observa uma abertura de cerca de $0,6$ nm na raia central e espectro razoavelmente simétrico, com frequência central de $1552,66$ nm. O sinal detectado está representado em frequência e tempo como observado nas Figuras (4.1.2) e (4.1.3) respectivamente.

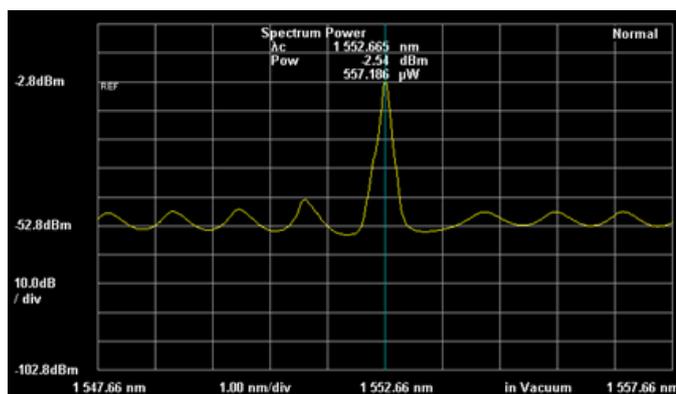


Figura 4.1.1 – Espectro da Fonte 1

O sinal detectado no tempo, conforme Figura 4.1.3, conserva o aspecto senoidal, entretanto, apresenta distorções que também podem ser observadas no espectro

mostrado na Figura 4.1.2. Nível DC e nível AC estão na Figura 4.1.4 e Figura 4.1.5, respectivamente.

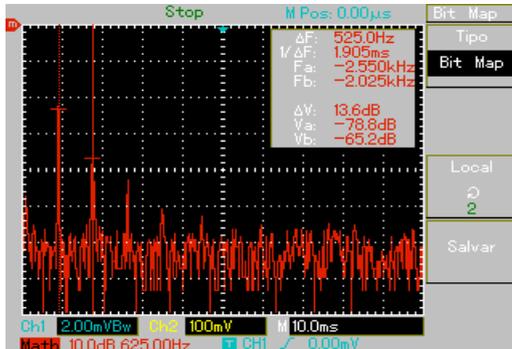


Figura 4.1.2 – Espectro

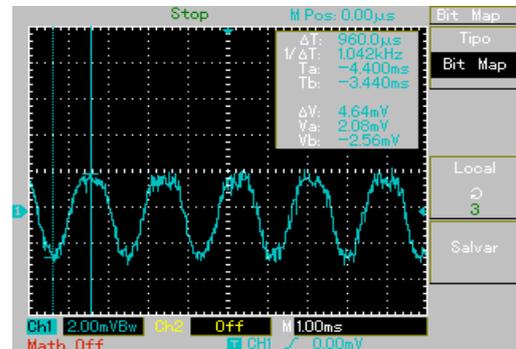


Figura 4.1.3 – sinal detectado (tempo)

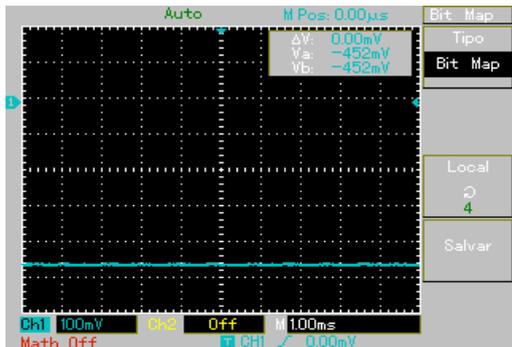


Figura 4.1.4 – Nível DC

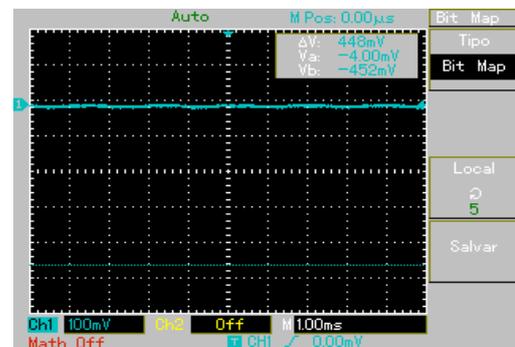


Figura 4.1.5 – Nível AC

No caso da Fonte 2, a potência de $-1,8$ dBm e seu espectro pode ser observado na Figura 4.1.6.

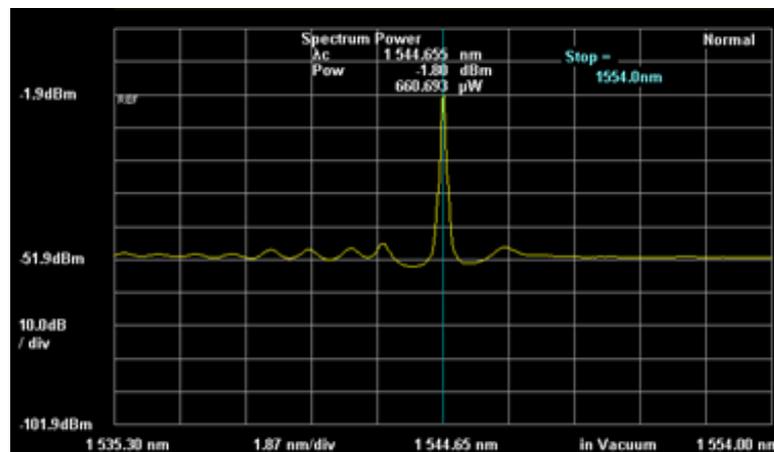


Figura 4.1.6 – Fonte laser 2

Conforme Figura 4.1.6, esta fonte possui uma abertura de cerca de 0,2 nm na raia central e espectro assimétrico, com frequência central de 1544,65 nm. O sinal detectado está representado em frequência e tempo como observado nas Figuras 4.1.7 e 4.1.8, respectivamente. O sinal detectado no tempo, conforme Figura 4.1.8, está totalmente deformado, perdendo completamente o aspecto senoidal. As distorções também podem ser observadas na Figura 4.1.7. Nível DC e nível AC estão nas Figuras 4.1.9 e 4.1.10, respectivamente.

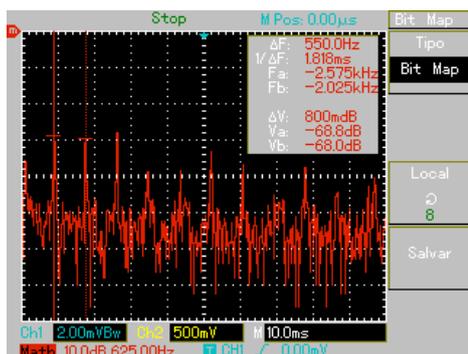


Figura 4.1.7: Espectro

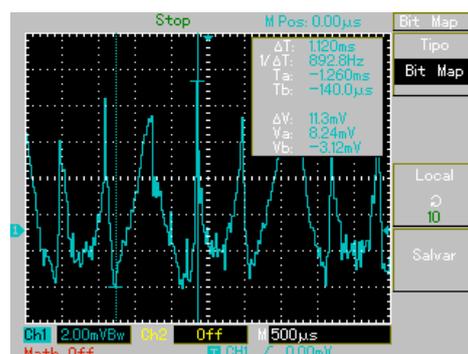


Figura 4.1.8: Sinal detectado

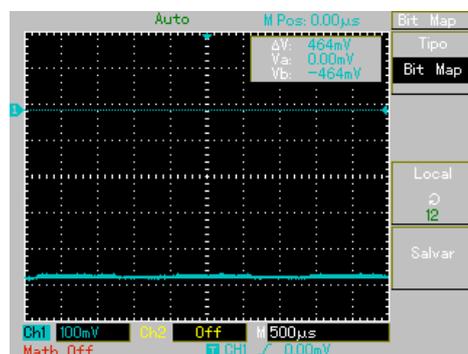


Figura 4.1.9: Nível DC

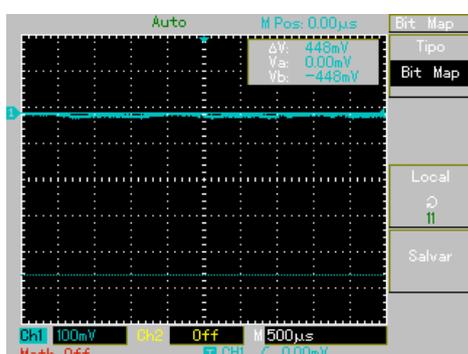


Figura 4.1.10: Nível AC

Já a Fonte 3 é uma fonte laser sintonizável com $-2,16$ dBm e seu espectro está na Figura 4.1.11. Possui largura de linha de cerca de 0,4 nm na raia central e aspecto praticamente simétrico, com frequência central de 1548,97 nm. O sinal detectado está representado em frequência e tempo como observado nas Figuras 4.1.12 e 4.1.13, respectivamente. O sinal detectado no tempo, como mostrado na Figura 4.1.13, é senoidal com linha totalmente limpa, sem ruído. Entretanto, apresenta distorções nos vales que também podem ser observadas na Figura 4.1.12. Nível DC e nível AC estão nas Figuras 4.1.14 e 4.1.15, respectivamente.

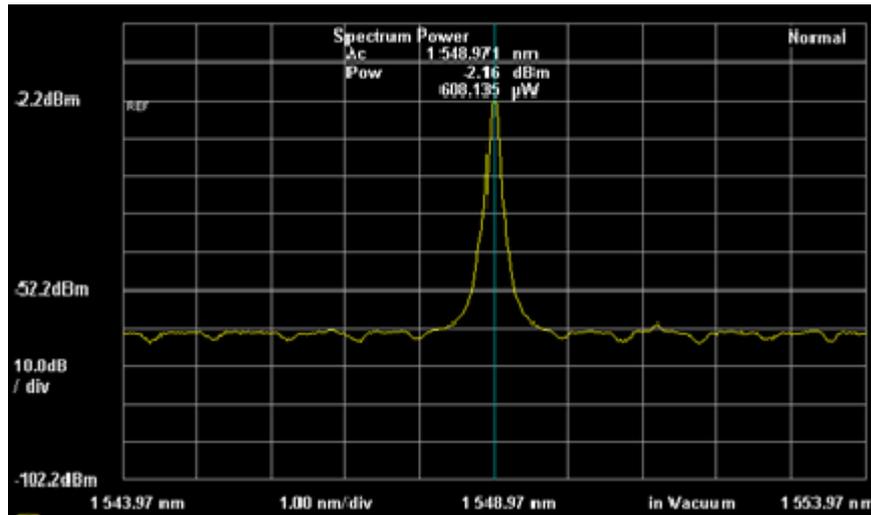


Figura 4.1.11 – Fonte 3

O espectro assim como os resultados dos experimentos foi medido com três fontes laser disponíveis. Em todos os casos, houve oscilação no sinal detectado, possivelmente em função de variações na polarização das próprias fontes laser ou ainda das distorções sofridas pela fibra que os conectava ao sistema. Tal efeito poderia ser minimizado com a aplicação combinada de um embaralhador de polarização e um polarizador na entrada do interferômetro que infelizmente não estava disponível para este experimento.

Para evitar as oscilações no sinal, um regulador de polarização foi aplicado, mas as variações continuavam a ocorrer constantemente e aleatoriamente, mostrando-se ineficaz. Devido às condições do experimento, decidiu-se por registrar os sinais no momento em que os níveis estavam mais altos.

Outra observação importante é a extrema sensibilidade que o interferômetro apresentou durante os testes, captando desde os passos das pessoas no laboratório, conversas e até mesmo o fluxo do deslocamento de ar provocado pelo ar condicionado. Durante as medições, estes ruídos foram evitados.

Várias configurações de posicionamento de um braço do interferômetro em relação ao outro foram testadas. Segundo [6], recomenda-se que os braços devem ter o maior isolamento entre um e outro, mas os resultados práticos não indicaram influência significativa do posicionamento dos braços nos experimentos realizados. As variações estão representadas nas Figuras 3.1.3 (a), 3.1.3(b) e 3.1.3(c).

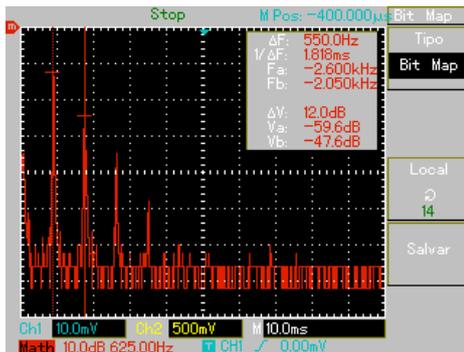


Figura 4.1.12 – Nível espectro

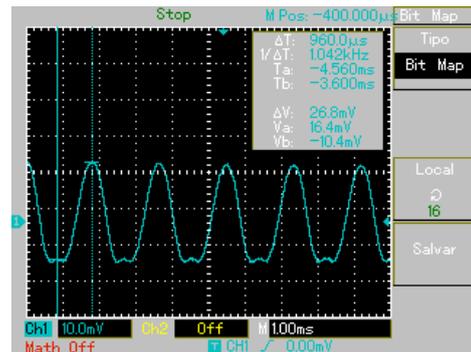


Figura 4.1.13: Sinal detectado

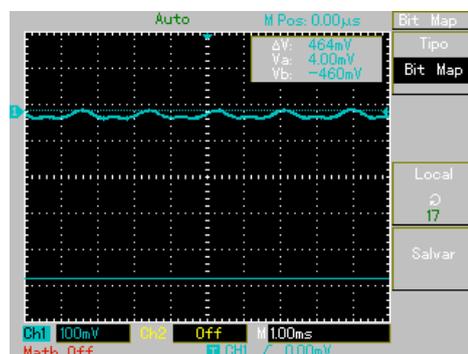


Figura 4.1.14: Nível DC

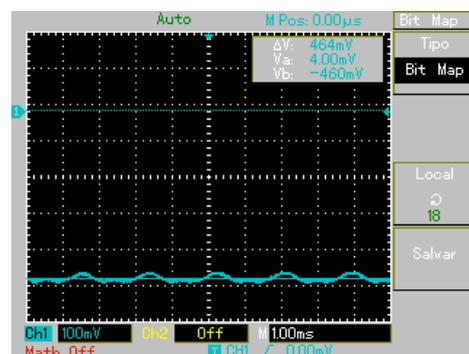


Figura 4.1.15: Nível AC

A fonte laser 2 apresentou um resultado tão ruim que o sinal detectado foi irreconhecível, com espectro extremamente poluído. Apesar de ser a opção de menor custo, a qualidade do sinal detectado demonstrou que a fonte laser 1 é inadequada para aplicações em interferômetros.

A fonte laser 3 apresentou o melhor resultado. Trata-se de uma fonte de laser sintonizável e infelizmente não seria a melhor opção do ponto de vista comercial por ser um equipamento de laboratório de alto custo.

A fonte laser 1 apresentou a melhor relação custo/benefício com custo razoável e resultados satisfatórios pois mantém a característica senoidal do sinal, apesar das distorções observadas.

A Tabela 4.1 resume as principais características observadas nos espectros das fontes laser aplicadas. A fonte 3, que apresentou a melhor qualidade do sinal de saída, possui melhor simetria, menor amplitude de raias laterais e maior diferença

entre a raia central e laterais. Comparando os resultados obtidos entre as fontes 1 e 3 observa-se que a característica predominante que compartilham é a simetria dos espectros. Pelos resultados obtidos neste experimento, conclui-se que a simetria do espectro da fonte laser é mais importante para o desempenho do interferômetro do que a largura de linha do sinal, especialmente se observados os resultados obtidos com a fonte laser 2. A Figura 4.1.16 resume o resultado obtido com as fontes laser.

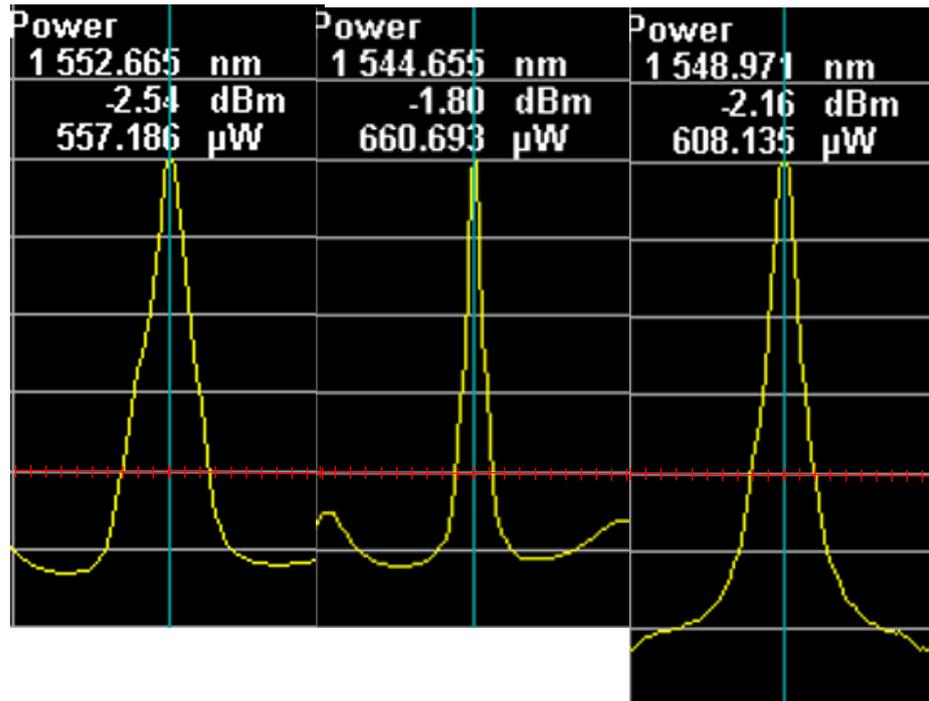


Figura 4.1.16 – Influência da largura de banda sobre o sinal detectado

Com amplitude e frequência central fixadas o mais próximo possível de -2 dBm e 1550 nm respectivamente, os espectros das três fontes laser apresentam fundamentalmente as seguintes diferenças: amplitude das raias laterais, quantidade de raias laterais, simetria das raias laterais e abertura da raia central.

Como resultado destas diferenças, foram obtidos sinais com espectros distintos na saída do fotodetector, diferindo em amplitude e principalmente no nível de distorção, o que sugere que a qualidade do sinal detectado depende diretamente destas variáveis.

A Tabela 4.1.1 contém o resumo das diferenças observadas para o caso de utilizar-se as fontes 1, 2 e 3 nas medições. A linha Diferença se refere à diferença de amplitude entre a raia central e primeira raia lateral. A grandeza Amplitude se refere à

amplitude da primeira raia. A grandeza Distancia trata da diferença entre raia central e primeira raia.

		Fonte 1		Fonte 2		Fonte 3		
Frequência central (nm)		1552,7		1544,7		1549,0		
Amplitude (dBm)		-2,54		-1,8		-2,16		
Posição em relação ao espectro central		E	D	E	D	E	D	Observações
Fonte Laser	Abertura (nm)	0,6		0,2		0,4		Fonte 2 - maior finesse
	Qtd. de Raias	4	3	8	1	5	5	Fonte 3 - melhor simetria
	Diferença (dB)	40	45	45	45	60	60	Fonte 3 - maior diferença
	Amplitude (dB)	12	8	8	5	2	2	Fonte 3 - menor amplitude
	Distância (nm)	1,4	1,7	0,9	,09	1,4	1,3	Fonte 2 – menor distância
	Simetria							Quantidade de raias D/E
Fotodiodo	Amplitude (mVpp)	4,64		11,3		26,8		
	Raias	4		10		4		Fonte 2 – sinal totalmente distorcido.
	Simetria							
	Nível DC (mV)	448		448		448		

Tabela 4.1.1 – Comparação dos resultados de desempenho das fontes laser no interferômetro

4.2. Interferômetro de Sagnac

As análises a seguir foram baseadas na avaliação visual da imagem registrada no osciloscópio.

Na Figura 4.2.1 está o exemplo de um registro de perturbação mecânica detectada pelo interferômetro. O osciloscópio foi ajustado para uma varredura de baixíssima frequência para registrar os movimentos da mola que simula a perturbação mecânica no momento da intrusão.

Nos primeiros 1,5 s, há o registro do movimento da mola sendo energizada, partindo da posição estável até atingir o fim de curso, pronta para o disparo. Aproximadamente 1s depois, a mola foi disparada, gerando um movimento oscilatório amortecido, que durou aproximadamente 1,5 s. Durante a rotina de medições, ficou claro que os sinais registrados pelo osciloscópio representaram com grande fidelidade os próprios movimentos da mola e apresentaram uma ótima repetibilidade, que é uma característica necessária para a validade das medições.

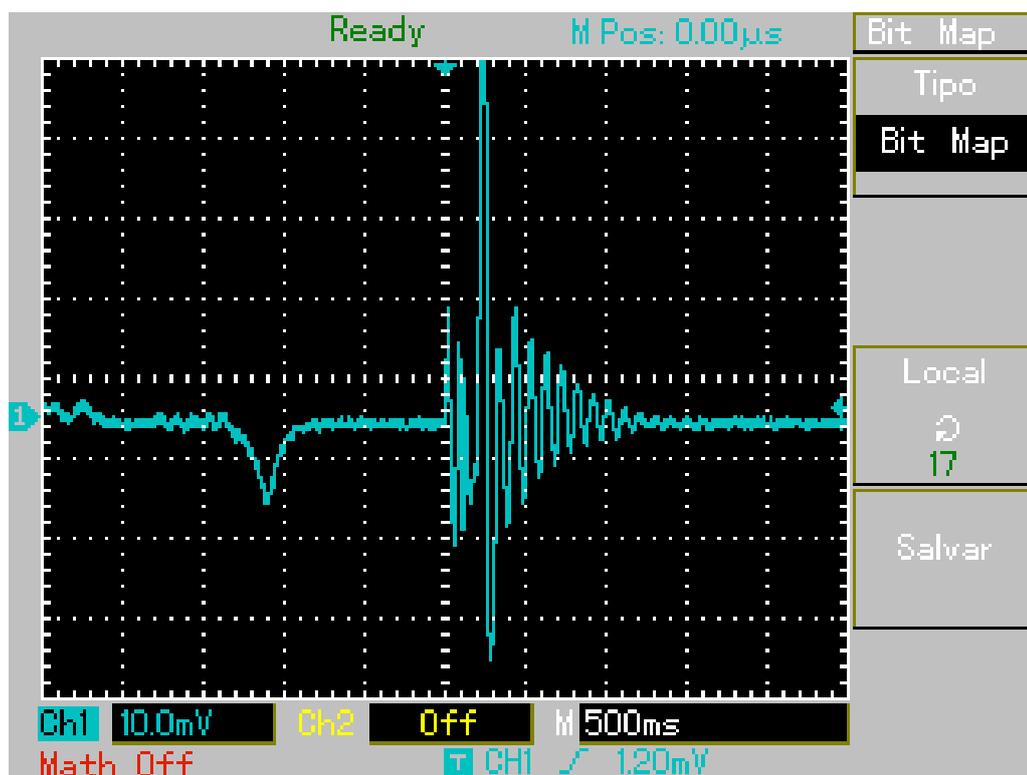


Figura 4.2.1 – Exemplo de resposta do sistema à perturbação mecânica aplicada

Observando os resultados em mais detalhes, a resposta do interferômetro aos movimentos da mola permite identificar formas de aprimorar a compreensão de seu funcionamento, assim como dos resultados.

No início do processo, o movimento descendente para energização da mola atingiu a máxima amplitude no ponto de vista mecânico. Vale ressaltar que foi muito lento em relação às demais oscilações, pois durou praticamente 0,3 s. Acompanhando a linha no sentido da varredura do osciloscópio, da esquerda para a direita, encontra-se a amplitude registrada deste movimento inicial, que foi muito menor em relação às

amplitudes registradas dos movimentos oscilatórios, pois estes diferem mecanicamente com menor amplitude, mas frequência muito maior. Apesar dos movimentos da mola não terem sido medidos, os registros de resposta do interferômetro demonstram uma excelente aderência ao comportamento esperado com base na equação fundamental apresentada nos aspectos teóricos, pois a amplitude do sinal detectado é diretamente proporcional à frequência de oscilação e à amplitude do movimento (ΔL e ω). Uma simples análise baseada na Figura 4.2.1 também comprova a coerência com o comportamento esperado. Como a contribuição de amplitude e frequência são diretamente proporcionais à mesma taxa, é possível comparar a proporção das respostas aos movimentos. O tempo necessário para levar a mola da posição estável para o fim de curso (posição de disparo) foi cerca de 0,30 s e atingiu uma amplitude de 10 mV. O tempo registrado de um movimento de subida durante a oscilação da mola é cerca de 0,03 s. Ora, se a oscilação foi cerca de 10 vezes mais rápida, espera-se uma tensão na saída em torno de 10 vezes maior, ou seja, 1,0 V, entretanto, o maior valor encontrado foi cerca de 0,48 V. Tal discrepância pode ser explicada através dos limites de funcionamento do interferômetro abordada nos aspectos teóricos, onde trata dos limites de quadratura da curva de resposta. Entre 2,50 e 2,70 s deveria ocorrer o pico esperado em torno de 1,0 V, entretanto, foi registrada uma oscilação com imagem borrada de pequena amplitude. Imediatamente após este período ocorre um pico de grande magnitude como seria esperado naquele trecho. É provável que a intensidade da oscilação detectada pela fibra tenha extrapolado a região de quadratura da curva de resposta do interferômetro, provocando distorção do sinal que ocorreu ao longo de 0,20 s e devido ao efeito de atenuação natural da mola, finalmente se enquadrou nos limites da curva, onde foi registrado o pico de 0,48 V. Outros dois efeitos possíveis neste período onde ocorreu a atenuação, é a saturação do fotodetector, mas neste caso, o efeito deveria ter ocorrido após os 0,48 V, muito acima dos valores registrados, e finalmente, algum ruído pode ter atenuado o sinal justamente no período de 0,20 s, o que é pouco provável, uma vez que as oscilações provocadas por ruído são de baixíssima frequência e deveriam ter distorcido toda a medição. Vale ressaltar que este efeito de atenuação das primeiras oscilações foi verificado em praticamente todas as medições, corroborando a hipótese de que foi uma extrapolação da região de quadratura do interferômetro e não um ruído.

Outro registro importante é o comportamento do interferômetro após a mola ter atingido o fim de curso entre 1,40 s e 1,70 s, pois o valor de saída não atingiu a condição de repouso instantaneamente quando o movimento cessou como seria esperado. Ao invés disso, levou praticamente os mesmos 0,30 s do movimento inicial, mesmo após a parada total do movimento. A equação do rege o comportamento do interferômetro não prevê um comportamento tão suave, logo, nenhuma atenuação deveria ser detectada. Uma possibilidade para este efeito, observado em todas as medições, é a própria natureza matemática da função pulso que caracteriza esta perda de movimento abrupta. Funções pulso ou degrau podem ser matematicamente decompostas em infinitas senóides como na série de Fourier ou até na função de Bessel, o que pode ter provocado o comportamento de atenuação exponencial após a perda do movimento.

Uma característica muito importante do aparato mola/interferômetro foi a boa repetibilidade do sistema. Raramente as oscilações registradas em uma mesma condição (ou tomada de medidas) apresentavam diferenças entre si, o que facilitou em muito os trabalhos.

No início dos trabalhos, ocorriam grandes diferenças nas medições que não condiziam com os valores esperados a ponto dos resultados não fazerem sentido algum, aumentando e diminuindo aleatoriamente. A causa destas variações foi a forma como a fibra foi fixada na mola, com fita adesiva. A fita adesiva se soltava de forma imperceptível, fazendo com que a fibra óptica girasse entre ela e a mola, invalidando as medições. Para solucionar o problema, a fibra óptica foi fixada com um leve arco e a fita substituída e conferida a cada série de medições. Desta forma, o problema da inconsistência dos valores foi sanado.

As distorções apresentadas representam uma parte dos desafios para garantia da qualidade do experimento. Durante os experimentos, alguns critérios foram adotados para conviver com estes desvios.

Entre os critérios estão:

- Garantia da repetibilidade das medições: Para cada registro, as perturbações foram repetidas 7 vezes. Se houvesse alguma variação significativa em mais de um valor, a sequência era repetida e os valores “vítimas” de ruído, descartados.
- Variações de fase que extrapolaram a área de quadratura: Foram anotados apenas os valores de pico que ocorreram imediatamente após a oscilação distorcida inicial. Desta forma, foi garantido que valor escolhido será o primeiro e o de maior nível sem distorção.
- Inconsistência de valores pico a pico: Em uma mesma série de 7 medições, os valores de pico a pico não apresentavam boa consistência, talvez pela própria natureza da curva de amortecimento da mola. Os valores de pico eram praticamente constantes, sendo assim, foram anotados, uma vez que os resultados finais se baseiam apenas em proporções.
- Atenuações: É prática comum nas medições em sensores ópticos evitar manobras com conectores e não foi diferente neste experimento.

As primeiras medições foram executadas com as bobinas disponíveis de 25 e 50 km, mantendo as proporções mencionadas no artigo em que o experimento se baseou. Os resultados anotados foram completamente aleatórios, de baixíssimo nível de sinal e com alto nível de ruído. Com o tempo, observou-se que o elevado número de espiras tornou as bobinas milhares de vezes mais sensíveis que a fibra sensora em contato direto com a mola. Além dos ruídos provocados pelo movimento da mola, as bobinas captavam ruído do ar condicionado, vozes e até mesmo passos no corredor. É muito provável que tenham detectado também o movimento de rotação da terra, uma vez que o experimento para este fim utiliza apenas 200 espiras. Esta situação comprova um sistema comercial deve incluir um bom processamento de sinais para filtragem de ruídos, pois a susceptibilidade do sistema a ruídos aumenta proporcionalmente em relação à área a ser vigiada.

Uma solução evidente seria continuar o experimento com bobinas substancialmente menores, por exemplo, em torno de 1 km, entretanto, a produção desta bobina a partir de uma maior em laboratório é impraticável e a confecção de bobinas específicas para o experimento mostrou-se inviável. A forma encontrada para contornar o problema da detecção indireta das perturbações e ruídos em geral foi o

uso de atenuadores ópticos no lugar das bobinas. Esta iniciativa viabilizou o experimento.

A Figura 4.2.2 mostra os resultados obtidos nas montagens M1 e M2 e a Figura 4.2.3 mostra o comparativo entre $d1$ previsto (calculado) e $d1$ utilizando os valores obtidos no experimento onde foram realizadas as medições.

Foi necessário aplicar um fator de ajuste de 0,28 para sobrepor os resultados calculados e medidos, uma vez que as equações previstas nos estudos teóricos [2] não consideram perdas por inserção, ruídos em geral e variações de polarização que, na prática, tornam as medidas instáveis apesar de todos os cuidados para contornar o problema.

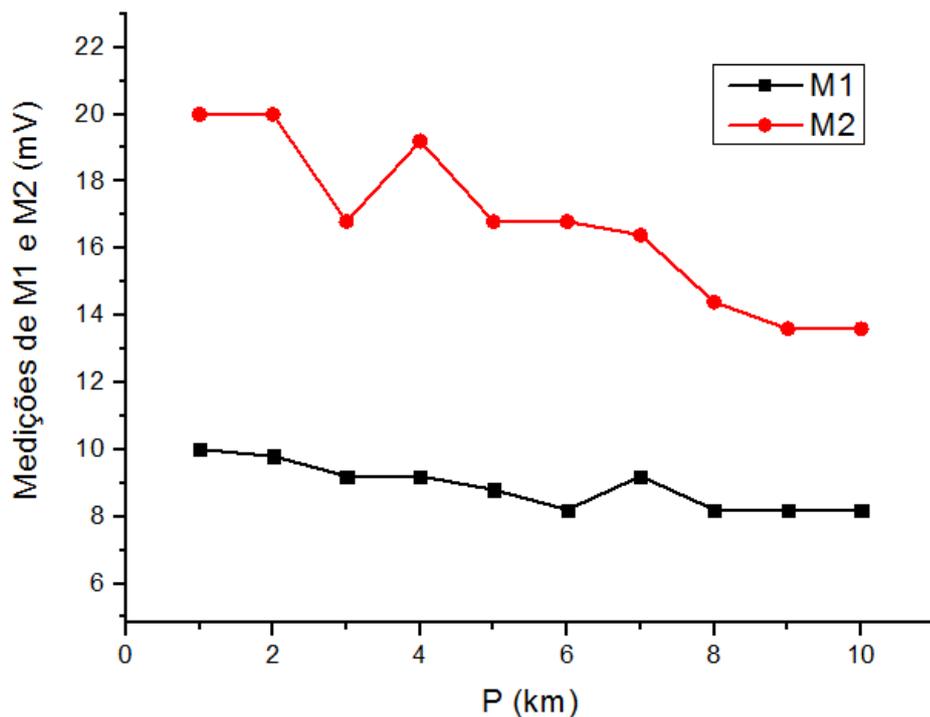


Figura 4.2.2 – Resultados das medições nas duas montagens, sendo o eixo “x”, a posição do ponto P onde foram aplicadas as perturbações mecânicas

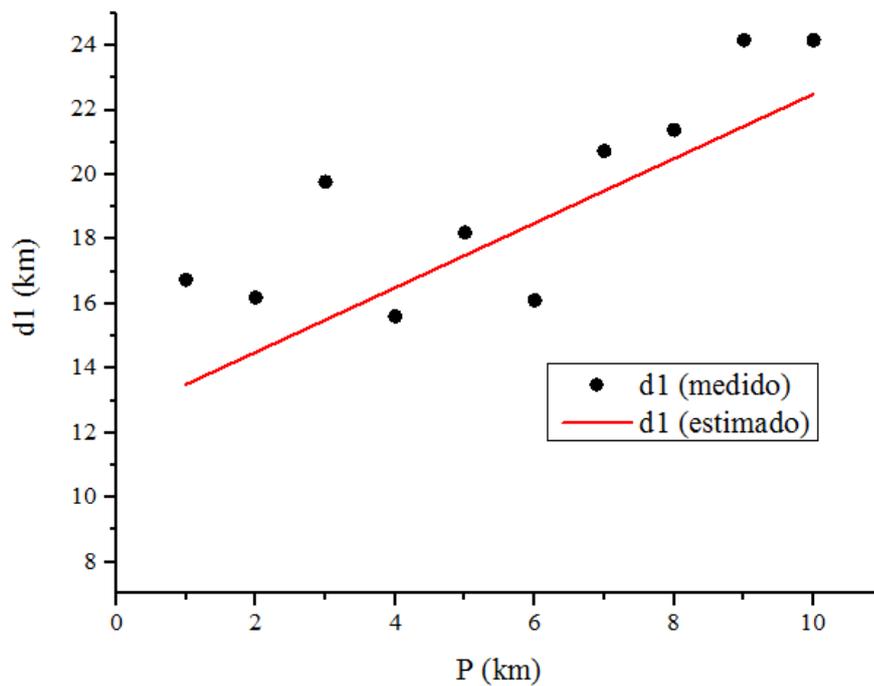


Figura 4.2.3 – Sobreposição dos resultados práticos e previstos teoricamente (calculados) em função do ponto onde foram aplicadas as perturbações mecânicas

Na sequência de pontos dos resultados experimentais da esquerda para a direita, dois pontos se sobressaem mais distantes da reta calculada, primeiro e terceiro valor, representando o maior erro do experimento. Na curva de resultados medidos em M2, houve uma discrepância nos valores em relação às taxas de atenuação apresentadas nos demais pontos, seja por algum ruído ou alguma condição da mola no momento do disparo, apesar de todos os esforços para manter a homogeneidade das medições. Aprimoramentos no modelo ou mesmo no sistema mecânico poderiam trazer resultados mais consistentes.

No modelo teórico apresentado, o enfoque foi baseado nas proporções das distâncias percorridas pelas interferências causadas pelas perturbações e se absteve de quaisquer outros efeitos físicos, sejam eles ópticos ou não. Os resultados seguem a inclinação prevista, mas longe da região onde deveriam estar. Um fator de ajuste empírico foi necessário para sobrepor as curvas teórica e prática.

Para definir a faixa de precisão do sistema, a metodologia é traçar duas curvas imaginárias em torno da curva calculada tangenciando os valores mais distantes

superior e inferior [3]. A distância vertical entre as curvas imaginárias e a prevista são os limites de precisão superior e inferior do sistema. Os valores são +4,3 e -2,4 km. Se os valores superiores mais distantes da curva teórica forem considerados parâmetros inválidos, e portanto, descartados, a faixa de precisão seria +2,7 e -2,4 km.

5. Conclusões

O primeiro experimento com interferômetro Mach-Zehnder demonstra que o principal parâmetro na escolha da fonte de luz laser para aplicação em interferômetros de duas ondas é a simetria do espectro. Para garantia da estabilidade das medições, é recomendável que o ambiente onde são executados os experimentos seja livre de ruídos, especialmente os acústicos e que um conjunto de embaralhador de polarização e polarizador sejam aplicados, uma vez que foram observadas oscilações de baixa frequência durante as medições que possivelmente são provocadas por mudanças na polarização da luz no caminho óptico entre a fonte de luz e a entrada do interferômetro.

O experimento com o interferômetro Sagnac comprova os resultados previstos na simulação do modelo proposto para determinar a localização das perturbações mecânicas. O fator de ajuste deve ser revisto a cada experimento, uma vez que o interferômetro e os demais componentes podem sofrer variações em seu funcionamento em função da temperatura, ruído ambiente ou até mesmo da disposição das fibras. As perdas por inserção também são fatores importantes e variam a cada montagem, influenciando nos resultados. Estes detalhes sugerem que em um próximo estudo, outras variáveis devem ser inseridas neste modelo no lugar do fator de correção.

É recomendável repetir o experimento com bobinas de comprimentos menores no lugar dos atenuadores e confrontar os resultados o que complementaria o domínio sobre esta técnica.

A alta sensibilidade e o problema do alto nível de ruído em aplicações práticas podem ser contornados pela técnica de interrogação utilizada no sistema em uma solução comercial. Deve ser desenvolvido um sistema de processamento de sinais conectado aos interferômetros para filtrar sinais produzidos naturalmente como vento, animais, veículos, folhas caindo, variações de temperatura, chuva e outros.

Um próximo passo seria realizar o experimento de outros sistemas de detecção de intrusão explorando outros tipos de interferômetro ou até mesmo sistemas utilizando

uma combinação deles, como por exemplo, uma combinação entre Mach-Zehnder e Sagnac proposta no anexo, que podem proporcionar maior precisão na localização das perturbações.

Durante a elaboração deste trabalho, foi sugerido um experimento que pode refinar a compreensão da técnica. A proposta é a construção de um dispositivo capaz de simular de forma controlada as perturbações mecânicas em várias as direções (movimentos de giro, verticais e horizontais), e intensidades, de forma que as grandezas destes movimentos sejam aplicadas aos modelos básicos e os resultados medidos sejam confrontados com os previstos nos modelos. Desta forma a contribuição de cada movimento no sinal detectado pode ser medida e os efeitos de cada movimento podem ser isolados e realimentados nas equações, refinando assim a técnica.

Referências Bibliográficas

- [1] John M. Senior, *Optical Fiber Communications: Principle and Practice*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2009, pp. 1-14.
- [2] A. E. Udd, W. B. Spillman Jr, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd Edition, John Wiley&Sons, 2011, pp. 1-228.
- [3] G. P. AGRAWAL, *Fiber-optic communication systems*, 3rd ed New York, 2002.
- [4] http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/white_paper_c11-463661.html
- [5] J. M. L. Higuera, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, John Wiley&Sons, pp. 4-30, 2001.
- [6] T. Zhang, H. Feng, Yang An, Shi-Jiu Jin and Zhou-Mo Zeng, Acoustic Emission Burst-type Signal Detection Using Mach-Zehnder Interferometer Based Optic Fiber Sensor, Revista? Conferencia? Ano? Sate Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, Tianjin University, Tianjin, China
- [7] A. B. Lobo Ribeiro, “Sensores interferométricos em Fibra óptica”, *Gazeta de Física*, FASC. 1, pp. 16-21, 1998.
- [8] A. D. McAulaya e J. Wangb “A Sagnac Interferometer Sensor System for Intrusion Detection and Localization”, *Proc SPIE Vol. 5435, Enabling Photonic Technologies for Aerospace Applications VI*, Aug. 2004.

InGaAs PIN PHOTODIODE

Go4Fiber's InGaAs Pin Photodiodes have $\varnothing 45\mu\text{m}$, $\varnothing 60\mu\text{m}$ $\varnothing 75\mu\text{m}$, $\varnothing 100\mu\text{m}$ diameter sensitive area photodiode series products, different size sensitive area, device structure and package can be designed as requirement by customer.



01

Laboratory and Component

Features:

- Fast Response Time
- Low Dark Current
- High Responsivity
- High reliability

Applications:

- Fiber Optical Communication
- Data/Image Transmission
- Fiber Sensing
- Fast Optical Pulse Detection

Maximum Rating:

Items	Values	Items	Values
Operating Voltage (V)	6	Power Consumption (mW)	10
Forward Current (mA)	10	Operating Temperature (°C)	-40 to 70
Welding Condition	260°C, 10S	Storage Temperature (°C)	-55 to 70

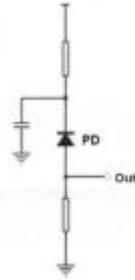
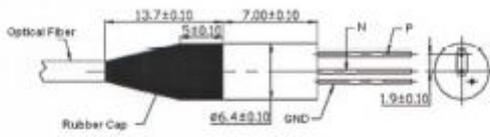
Specifications (T_A = 25°C):

Items	Conditions	Symbol	Value
Active Area Diameter (μm)	-	φ	60
Detection Range (nm)	-	λ	900 to 1700
Responsivity (A/W)	V _b = 5V, λ = 1310nm	R _e	≥0.80
Responsivity (A/W)	V _b = 5V, λ = 1550nm	R _e	≥0.85
Dark Current (nA)	V _b = 5V	I _d	≤0.7 (typ 0.1)
Optical Return Loss (dB)	-	ORL	≤30
Capacitance (pF)	f = 1MHz, V _b = 5V	C	≤0.6
Reverse Breakdown Voltage (V)	I _b = 10μA	V _{BR}	≥45
Reverse Voltage (V)	D.C.	V _R	5



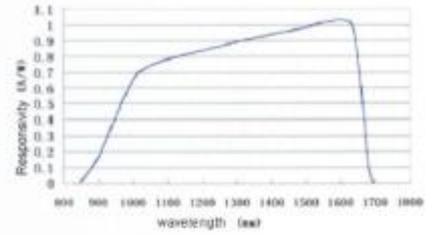
Go4Fiber Ltd.
 13/F Culturecom Centre, 47 Hung To Road, Kwun Tong, Hong Kong
 Tel: +852 2174-1338 Fax: +852 2904-0034
 Email: sales_group@go4fiber.com Web: www.go4fiber.com

Packaging Information and Pin Configuration (in mm):

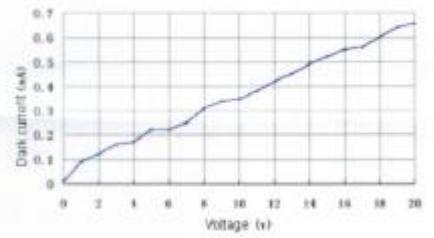


Application Circuit

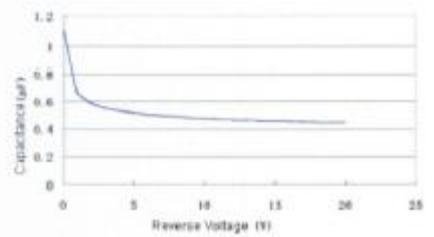
**Specifications Curve:
Spectrum Response Curve:**



Dark Current Curve:



C-V Curve:



Reminder:

- Device works under reverse 5V condition
- Avoid Violent Shock to protect lens in device
- Clean the window with ethanol and absorbent cotton before installment
- Static Charge Protection in Storage and working state, avoid the device invalid

Ordering Information:

Part #	Description
GT322D	InGaAs PIN Photodiode

Specifications are subject to change without notice.

Anexo II - Caracterização do Acoplador 50-50 (Sagnac)

$\lambda \cong 1550 \text{ nm}$

Potência Laser = -3,38dBm

1 – Entrada em In1

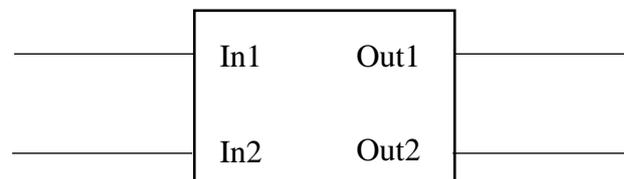
Saída Out1 = -7,04dbm

Saída Out2 = -7,66dbm

2 – Entrada em In2

Saída Out1 = -7,42dbm

Saída Out2 = -7,36dbm



Anexo III – Osciloscópio Minipa MO-2061

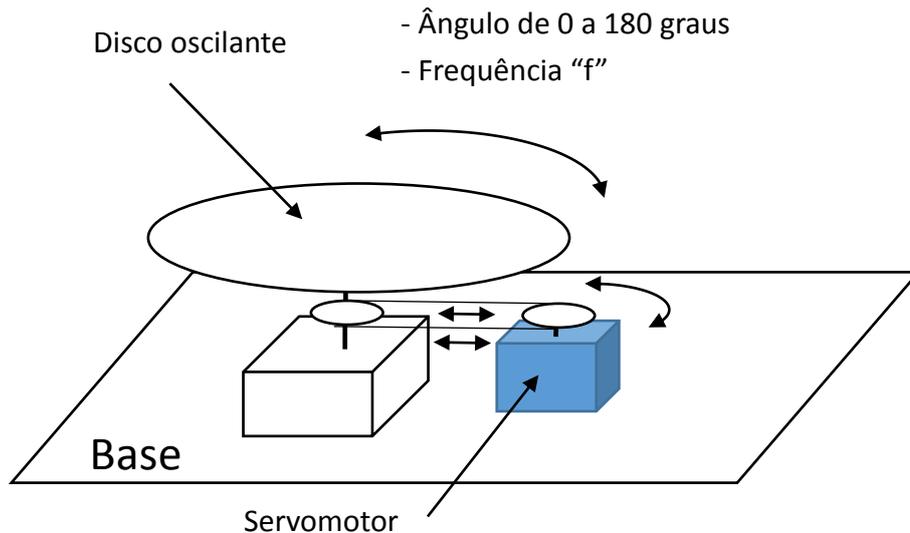


Display: LCD de 5.7 polegadas

- Resolução do Display: 320 pixels horizontal por 240 pixels vertical
- Largura de Banda de 60MHz / 2 Canais
- Taxa máxima de amostragem real de 1GS/s para um canal e taxa de amostragem equivalente de 25GS/s por canal
- FFT Integrado
- Gravação de forma de onda, configurações e restauração
- Gravação e reprodução de até 1000 telas sequenciais
- Interface USB Client e Host
- Dimensões: 150(A) x 320(L) x 130(P)mm
- Peso: Aprox. 2.5kg

Anexo IV – Dispositivo simulador de perturbações mecânicas

Conceito do dispositivo para simulação de perturbações mecânicas com controle de ângulo e velocidade (frequência e amplitude) para estudo da resposta dos interferômetros Sagnac baseados em fibra óptica.



Conceito do dispositivo com servomotor.

O dispositivo foi idealizado para analisar experimentalmente a sensibilidade do interferômetro de Sagnac aos movimentos previstos nas equações, especialmente a equação deduzida neste trabalho para sensor de movimento e a equação clássica para giroscópios baseados neste princípio:

$$F = \frac{8\pi AN\Omega}{\lambda c}$$

Giroscópio

$$F = \frac{2 \Delta s}{\lambda \Delta t}$$

Sensor de movimento

Os experimentos devem se basear na resposta à frequência e amplitude e também à gama de movimentos. Para o giroscópio, número de voltas e área da espira também podem ser considerados. Desta forma é possível isolar experimentalmente o efeito de cada variável e comparar o efeito às previsões teóricas.

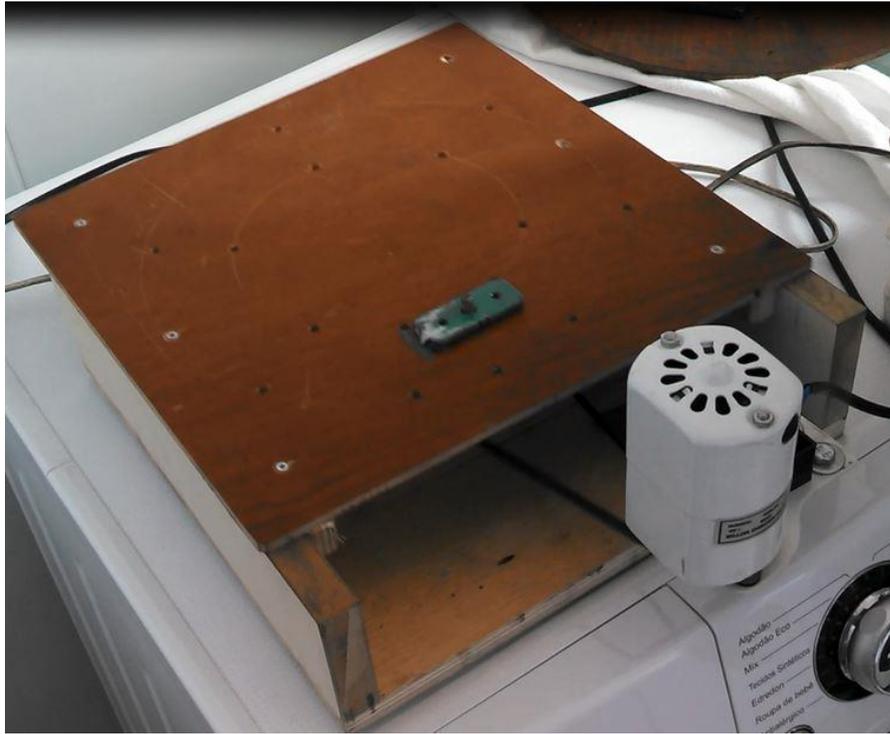
Abaixo estão as fotos do protótipo do dispositivo desenvolvido com motor AC, polias de redução e girabrequim para conversão de movimento circular para oscilatório (disco oscilante). Um acessório converte o movimento oscilatório circular para longitudinal horizontal e verticalmente.



Conjunto de polias e girabrequim



Dispositivo giratório para fixação da bobina sensora do interferômetro de Sagnac



Dispositivo deslizante para movimentos oscilatórios horizontais

ANEXO V – ANALISADOR DE ESPECTRO (OSA) MS9740A



Specification	Details
Applicable optical fiber	10 μ m/ 125 μ m SM fiber (ITU-T G.652), 50 μ m/ 125 μ m GI fiber
Optical connector	User replaceable: FC, SC, ST, DIN, LC
Wavelength measurement range	600 nm to 1750 nm
Wavelength accuracy *1	\pm 20 pm (1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.03 to 0.2 nm) *2, \pm 100 pm (1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.5, 1.0 nm) *2
Setting resolution	0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 nm (RBW: 3dB optical filter: transmission bandwidth)
Maximum input power	+23 dBm (Optical ATT: On)
Dynamic range *1	High dynamic range: 60 dB (0.4 nm from peak wavelength) Normal dynamic range: 58 dB (0.4 nm from peak wavelength) [Resolution: 0.05 nm, 1550 nm, Optical Att: Off, 20 to 30°C]
Sweep	Sweep width: 0.2 nm to 1200 nm, 0 nm Sweep speed: \leq 0.2 sec. (span 5 nm) [Resolution: 0.1 nm, VBW=10 kHz, Normal dynamic range, center 1550 nm, sweep start to stop, no optical input, sampling point: \leq 501]
Dimensions and mass	426 (W) x 177 (H) x 350 (D) mm (excluding projections) \leq 15.0 kg (without option)