

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

TITO GONÇALVES DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR INTERFEROMÉTRICO
MULTIMODAL PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS
PARCIAIS**

NITERÓI

2014

TITO GONÇALVES DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR INTERFEROMÉTRICO
MULTIMODAL PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS
PARCIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero

NITERÓI

2014

TITO GONÇALVES DE SOUSA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR INTERFEROMÉTRICO
MULTIMODAL PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS ELÉTRICAS
PARCIAIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Comunicações Ópticas.

Aprovado em _____ de _____ de 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero - Orientador

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Vinícius Nunes Henrique Silva

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Maria Aparecida Gonçalves Martinez

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

Universidade Federal do Pará - UFPA

NITERÓI

2014

Dedico este trabalho a Deus, pois todas as conquistas e vitórias alcançadas na minha vida são graças a ELE.

Agradecimentos

Gostaria de fazer um cordial agradecimento a todos àqueles que contribuíram para a concretização deste estudo:

Ao meu pai, pelo apoio incondicional;

Ao meu Orientador, pela sabedoria e paciência a mim transmitidas;

Ao professor Henrique de Oliveira Henriques, coordenador do projeto ANEEL 0372-009/2007, que permitiu o uso dos equipamentos e infraestrutura direta e indiretamente do referido projeto.

Ao Doutor Paulo Acioly Marques dos Santos pelos ensinamentos passados;

Aos amigos de LACOP, alunos e funcionários, pelo incentivo, ajuda e auxílio em todos os aspectos;

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFF, que nos ajudaram na confecção das peças do nosso protótipo.

Agradeço também, direta ou indiretamente, todas as demais pessoas que me apoiaram na realização deste trabalho.

Resumo

Esta dissertação mostra o desenvolvimento de um sensor óptico do tipo interferométrico baseado no fenômeno da interferência multimodal, para a detecção de frequências ultrassônicas emitidas pelas descargas parciais em máquinas elétricas. Segundo a literatura, esses sinais de ultrassom estão na faixa de 130 KHz. Para emular o efeito da geração dessas frequências de ultrassom pelas descargas elétricas parciais em laboratório, é utilizada a vibração de uma cerâmica piezoelétrica ligada a um gerador de funções na frequência de 130 KHz. O uso do fenômeno da interferência multimodal em um sensor óptico é uma aplicação menos explorada em detrimento aos outros tipos clássicos de interferômetros, como os interferômetros divisores de frente de onda ou como os interferômetros divisores de amplitude clássicos. O trabalho mostra todas as etapas de desenvolvimento do sensor, começando pela configuração básica, evoluindo para soluções para aumentar a sensibilidade e finalmente a montagem do protótipo e os testes em laboratório em condições de campo.

Palavras chave: sensor; interferência multimodal; descargas parciais.

Abstract

This paper shows the development of a Interferometric type optical sensor, based on the phenomenon of Multi-Mode Interference, for detection of ultrasonic frequencies emitted by partial discharges in electrical machines. According to the literature, these ultrasound signals are in the range 130 KHz. To emulate the effect of generation these ultrasonic frequencies by partial discharges in the laboratory, it is used a piezoelectric ceramic which is attached to a function generator at 130 KHz. The use of multi-mode interference in an optical sensor is an application less prospected over other traditional types of interferometers, such as wavefront-splitting interferometers or classical amplitude-splitting interferometers. The work shows all the stages of development of the sensor, starting with the basic setup, evolving to solutions to increase the sensitivity and finally assembling the prototype and testing in the laboratory and with field conditions.

Keywords: sensor; multi mode interference; partial discharge.

Sumário

1. Introdução e motivação	17
1.1. Introdução aos sensores Ópticos	17
1.2. Motivação.....	18
1.3. Objetivo.....	18
1.4. Roteiro.....	19
2. Fundamentos teóricos: Descargas elétricas parciais e técnicas de medidas	20
2.1. Descargas elétricas parciais.....	21
2.2. Técnicas de medida	21
3. Fundamentos teóricos: Interferometria	23
3.1. Considerações iniciais	23
3.2. Análise da interferência no domínio espacial	23
3.3. Condições para interferência.....	27
3.3.1. Coerência espacial e temporal.....	27
3.4. Interferômetros	28
3.4.1. Interferômetros de divisão de frente de onda.....	29
3.4.1.1. O Experimento de Young.....	29
3.4.1.2. Outros tipos de interferômetros de divisão de frente de onda.....	32
3.4.2. Interferômetros de divisão de amplitude.....	33
3.4.2.1. Interferômetros espelhados.....	33
3.4.2.1.1. O Interferômetro de Michelson	33
3.4.2.1.2. O Interferômetro de Mach-Zehnder	34
3.4.2.1.3. O Interferômetro de Sagnac.....	35
3.5. O Fenômeno da interferência multimodal e o auto imageamento	36

3.6. Modelagem matemática do interferômetro MMI	39
3.6.1. Função de Transferência	42
4. Montagem experimental do interferômetro multimodal	47
4.1. Testes iniciais de aumento de sensibilidade com o espelho fixo	47
4.2. Espelhamento com o bulbo de mercúrio	50
4.3. Emulação da emissão de sinais ultrassônicos pelas descargas parciais com o protótipo do interferômetro multimodal	54
4.3.1. O protótipo do sensor óptico	54
4.3.2. Resultados com o protótipo do interferômetro multimodal	63
4.3.2.1. Padrão de interferência para a ponta da fibra multimodo apenas clivada	65
4.3.2.2 Padrão de interferência típico obtido com o espelhamento da fibra multimodo com o bulbo de mercúrio	66
4.3.2.3. Padrão de interferência otimizado obtido com o espelhamento da fibra multimodo com o bulbo de mercúrio	67
4.4. O Encapsulamento do interferômetro multimodal	72
4.4.1. Montagem do encapsulamento da região sensora	72
5. Resultados com o encapsulamento do interferômetro multimodal nas condições dos testes de campo	93
5.1. Condições dos testes de campo	93
6. Conclusão	96
6.1. Sugestão para trabalhos futuros	96
Referências Bibliográficas	105
Apêndices	109
A – Manual de operação do detector óptico PDA10CS	109
B – Especificações do filtro ativo	115
C – Imagens e resultados iniciais dos testes de campo com o sensor interferométrico multimodal	118

Lista de Figuras

Figura 3.1: Comparação da largura espectral entre uma fonte LASER e um LED, ambos centrados no comprimento de onda de 850 nm	28
Figura 3.2: O experimento de Young.....	29
Figura 3.3: Diferença entre os caminhos percorridos pelos feixes que saem de S1 e S2.	30
Figura 3.4: Localização dos máximos e mínimos de interferência.	31
Figura 3.5: Franjas de interferência	31
Figura 3.6: Gráfico intensidade figura de interferência.	32
Figura 3.7: (a) Espelho simples de Lloyds; (b) Espelho duplo de Fresnel; (c) Biprisma de Fresnel.	32
Figura 3.8: Interferômetro de Michelson.	33
Figura 3.9: Interferômetro de Mach-Zehnder.	34
Figura 3.10: Variações do interferômetro de Sagnac em (a) e (b).	35
Figura 3.11: Emenda SM/MM , espelhamento na ponta da fibra MM e o fenômeno da MMI	36
Figura 3.12: Estrutura do tipo SMS utilizando fibra multimodo do tipo gradual.	37
Figura 3.13: Exemplo de modulador Mach-Zehnder utilizado no LACOP.....	40
Figura 3.14: Esquema simplificado interno de um MZM.....	41
Figura 3.15: Função de transferência do sensor MMI.....	43
Figura 4.1: Configuração experimental básica do sensor.....	47
Figura 4.2: Configuração inicial para os testes com espelhamento fixo da fibra multimodo.	49
Figura 4.3 Padrão de interferência de espelhamento com a presença de espelho fixo. Osciloscópio ajustado com 5 mV por divisão para a tensão e 5ms na base de tempo.....	49
Figura 4.4: Sinal de ruído quando retiramos o espelhamento por espelho fixo da ponta da fibra multimodo.	50
Figura 4.5: Bulbos de mercúrio retirados de termômetros	51
Figura 4.6: Máquina de posicionamento para fixação da ponta da fibra multimodo no bulbo de mercúrio.	52

Figura 4.7: Fibra multimodo posicionada dentro do bulbo de mercúrio	53
Figura 4.8: O protótipo do interferômetro multimodal feito na bancada	54
Figura 4.9: Configuração inicial do LASER para a operação do protótipo do sensor interferométrico.....	55
Figura 4.10: Acoplador óptico conectorizado desconectado em bancada	56
Figura 4.11: Emenda entre SMF e MMF, interface onde ocorre a injeção e reinjeção dos modos interferentes.	57
Figura 4.12: Gerador de sinais configurado em 130 KHz e 10 Vpp para emulação em bancada dos sinais ultrassônicos emitidos quando há descargas parciais em uma máquina elétrica	58
Figura 4.13: Cerâmica piezoelétrica	58
Figura 4.14: Cerâmica piezoelétrica vibrando sobre a fibra multimodo fixada com a ajuda da massa de plasticina.....	59
Figura 4.15: Fotodetector usado na construção do sensor modalmétrico.	60
Figura 4.16: Filtro passivo.	61
Figura 4.17: Filtro passivo na configuração passa-faixa	61
Figura 4.18: Módulos filtros passa-baixa e passa-alta	62
Figura 4.19: Configuração padrão do filtro passa-faixa: 70,7 a 200 KHz.As frequências de corte são pré-configuradas	63
Figura 4.20: Trecho do Protótipo MMI que foi sendo trocado para escolha do melhor ganho de espelhamento pelo bulbo de mercúrio.....	64
Figura 4.21: Pequena intensidade do sinal de saída no fotodetector quando a ponta da fibra multimodo está apenas clivada	65
Figura 4.22: Aumento nítido no nível do sinal de saída do fotodetector quando há o espelhamento pelo bulbo de mercúrio	66
Figura 4.23: Sinal de saída no fotodetector para o melhor espelhamento com o bulbo de mercúrio num instante de tempo t1	67
Figura 4.24: Sinal de saída no fotodetector para o melhor espelhamento com o bulbo de mercúrio num instante de tempo t2.....	68
Figura 4.25: $S_m(t)$ e FFT quando o filtro passa-faixa está ajustado de 70,7 KHz a 283 KHz. Presença da FFT na frequência fundamental, em 130 KHz, e do 2º harmônico em 260 KHz	70

Figura 4.26: $S_m(t)$ e FFT quando o filtro passa-faixa está ajustado de 70,7 KHz a 400 KHz. Presença da FFT na frequência fundamental, em 130 KHz, do 2º harmônico em 260 KHz e do 3º harmônico em 390 KHz	70
Figura 4.27: $S_m(t)$ e FFT quando o filtro passa-faixa está ajustado de 70,7 KHz a 556 KHz. Presença da FFT na frequência fundamental, em 130 KHz, do 2º harmônico em 260 KHz, do 3º harmônico em 390 KHz e do 4º harmônico em 520 KHz.....	71
Figura 4.28: Vista superior da envoltória metálica do encapsulamento com o orifício para o disco magnético	72
Figura 4.29: Vista inferior da envoltória metálica do encapsulamento	73
Figura 4.30: Vista lateral da envoltória metálica do encapsulamento	73
Figura 4.31: Vista superior da envoltória metálica do encapsulamento com o disco magnético para encaixe.....	74
Figura 4.32: Vista superior da envoltória metálica do encapsulamento com o disco magnético já encaixado.....	74
Figura 4.33: Uma das tampas para fechamento com a perfuração nas bordas para a passagem dos parafusos.....	75
Figura 4.34: Exemplo da colagem dos suportes metálicos para rosqueamento dos parafusos com resina epóxi	76
Figura 4.35: Fixação dos parafusos nos suportes metálicos.....	76
Figura 4.36: Adaptador FC para fixação em uma das tampas do invólucro.	77
Figura 4.37: Tampa com 5 orifícios para fixação de componentes,além dos 4 para a fixação da tampa	78
Figura 4.38: Reaproveitamento da placa de fenolite e da tampa metálica da placa de rede para confecção da placa de suporte do pigtail monomodo..	79
Figura 4.39: Furadeira presente no LACOP sendo utilizada para a confecção dos furos na tampa lateral.....	80
Figura 4.40: Vista superior frontal da placa de suporte do pigtail monomodo.....	80
Figura 4.41: Vista superior lateral da placa de suporte do pigtail monomodo.....	81
Figura 4.42: Adaptador FC encaixado na tampa lateral.....	81
Figura 4.43: Placa de suporte do pigtail conectado à placa metálica lateral já com a presença do conector.	82

Figura 4.44: Parte frontal do disco magnético que foi acoplado à carcaça metálica do sensor Interferométrico multimodal.	83
Figura 4.45: Parte traseira do disco magnético que foi acoplado à carcaça metálica do sensor Interferométrico multimodal.	83
Figura 4.46: Começo da fixação da fibra multimodo a partir do centro do disco metálico.	85
Figura 4.47: Esboço da colagem da fibra com o espaçamento na extremidade do disco para a fixação do bulbo.	86
Figura 4.48: Configuração da fibra multimodo espiralada com o bulbo pronta para ser colada no disco magnético.	86
Figura 4.49: Fibra espiralada no disco metálico secando protegida contra choques com a ajuda de uma espuma.	87
Figura 4.50: Disco magnético ajustado na carcaça metálica do encapsulamento	88
Figura 4.51: Pigtail monomodo já moldado pelas presilhas plásticas em formato circular.	89
Figura 4.52: Alça metálica para fixação do disco magnético à carcaça metálica.	90
Figura 4.53: Alça metálica para fixação do disco magnético e placa de suporte do pigtail monomodo ajustados dentro da carcaça metálica.	91
Figura 4.54: Uma tampa já colocada.	91
Figura 4.55: Diferentes perfis do encapsulamento da cabeça sensora do interferômetro multimodal	92
Figura 5.1: Configuração para os testes de campo.	93
Figura 5.2: Vista superior da bobina de cabo óptico contendo 4 fibras monomodo com saídas FC94	
Figura 5.3: Figura de interferência de baixa magnitude quando um trecho de 110 m de fibra monomodo é ligado do encapsulamento à saída do acoplador.	95
Figura 5.4: Filtro ativo com sua estrada ligada ao fotodetector sua saída conectada ao osciloscópio.	95
Figura 5.5: Solução levando o acoplador óptico para o ambiente externo.	96
Figura 5.6: Os 3 adaptadores FC para as 3 portas do acoplador óptico fechado.	97
Figura 5.7: Adaptador óptico sendo montado para ser encapsulado.	97
Figura 5.8: Adaptador óptico para ser encapsulado	98
Figura 5.9: Adaptador óptico já estruturado sobre a placa de fenolite.	99

Figura 5.10: Adaptador óptico fechado.....	99
Figura 5.11: Adaptador óptico conectado para a emulação com condições de distância do teste de campo	100
Figura 5.12: Cerâmica piezoelétrica fixada sobre o encapsulamento para realização da emulação.	101
Figura 5.13: Ruído interferométrico sem a presença do sinal de emulação da cerâmica piezoelétrica	102
Figura 5.14: Figura interferométrica produzida pela cerâmica piezoelétrica na cabeça sensora do interferômetro multimodal.	102

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração dos equipamentos na emulação com o protótipo do interferômetro multimodal	64
Tabela 4.2: Tabela mostrando o ganho de Sensibilidade obtido com o espelhamento através do bulbo de mercúrio	69

Lista de Abreviações

MMI: *Multi-Mode Interference*

LACOP: *Laboratório de Comunicações Ópticas*

ELETRONORTE: *Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A.*

SMS: *Single-Mode Multi-Mode Single-Mode*

SM: *Single Mode*

MM: *Multi Mode*

SMF: *Single Mode Fiber*

MMF: *Multi Mode Fiber*

FFT: *Fast Fourier Transform*

CW: *Continuous Wave*

1. Introdução e motivação

1.1. Introdução aos sensores ópticos

A fibra óptica, como meio de transmissão de dados, começou a aparecer nos sistemas de telecomunicações no início dos anos 70. No fim da mesma década, surgiram as primeiras pesquisas com a intenção de utilizar o guia óptico como um tipo de elemento sensor, ou seja, capaz de medir diferentes grandezas físicas [1]. A idéia principal era usar a fibra como um transdutor [2] diretamente sobre o parâmetro a ser medido, provocando uma alteração na forma como a luz é originalmente guiada.

Isso aconteceu porque as vantagens da utilização do guia óptico no sensoriamento, assim como na comunicação de dados, são enormes. As fibras ópticas são constituídas de material dielétrico, ou seja, que não proporciona a condução de corrente elétrica. Isso faz com que as fibras ópticas sejam imunes a interferências eletromagnéticas e possam ser aplicadas em ambientes hostis, ou seja, sujeitos a elevados níveis de tensão elétrica como em sub-estações de energia, refinarias e plataformas de petróleo. Tal característica dos sensores ópticos permite ainda a diminuição de custos com o aterramento [3], que se teria em relação aos tradicionais sensores eletro-eletrônicos. O fato de as fibras ópticas serem constituídas de materiais dielétricos, como a sílica (SiO_2) ou o plástico, permite também que estas sejam utilizadas como transdutores em meios sujeitos à elevados níveis de pH, temperatura e outros parâmetros em que o dióxido de silício (SiO_2) não reaja com o meio e perca suas características próprias.

As fibras ópticas, por serem feitas de um material extremamente leve, comparados aos metais e materiais tradicionalmente utilizados na fabricação de sensores, como o cobre, proporcionam também a construção de sensores mais compactos e de peso reduzido [4]. A indústria aeroespacial e automobilística beneficiam-se fortemente dessa característica [5].

Podem-se citar outros benefícios para o aproveitamento das fibras ópticas como elementos sensores, que também são utilizados nos sistemas de transmissão de dados [20]. O baixo coeficiente de atenuação do cabo óptico, comparado com outros meios de transmissão tradicionalmente utilizados na indústria, como o par trançado metálico, faz com que o sinal possa se propagar por uma distância maior dentro de uma planta de uma rede industrial, por exemplo. Aliado a isso, soma-se a alta largura de banda proporcionado pelo meio óptico, que gera a possibilidade da multiplexação de

vários canais, cada um fazendo a medição de determinada variável em dado comprimento de onda (WDM) ou num intervalo de tempo pré-determinado (TDM).

Mais aspectos positivos do uso dos guias ópticos como parte de elementos sensores podem-se citar também a excelente performance dos mesmos sujeitos à alta temperatura, ambientes corrosivos e a robustez a vibrações e choque dos dispositivos que utilizam uma cabeça sensora óptica [23].

1.2. Motivação

A motivação deste trabalho é a confecção de um sensor interferométrico multimodal para a detecção de descargas elétricas parciais em equipamentos elétricos de potência. Este desenvolvimento está sendo patrocinado através do projeto ANEEL 0372-009/2007 que o LACOP (Laboratório de Comunicações Ópticas) mantém em cooperação técnica e científica com a ELETRONORTE.

O fenômeno da interferência multimodal aplicada ao sensoriamento é menos explorado se comparado aos outros tipos de sensores ópticos e até mesmo interferômetros apresentados em artigos e congressos. Esse cenário nos estimula ainda mais para o desenvolvimento de um sensor que possa ser compactado e levado para os testes de campo, o que é uma dificuldade para os sensores ópticos baseados em FBG's (Grade de Bragg). As FBG's têm sua análise como sensor mais consolidada, porém a sensibilidade deste mecanismo às variações de temperatura ou deformações faz com que a grandeza a não ser avaliada tenha que ser compensada externamente.

1.3. Objetivo

O objetivo do trabalho é desenvolver de um interferômetro multimodal como sensor óptico para detecção de descargas elétricas parciais em equipamentos elétricos de potência. Segundo a literatura [3], quando uma máquina elétrica apresenta algum defeito, há a emissão de sinais ultrassônicos em torno de 130 KHz [4] causadas pelas descargas elétricas parciais. Nosso alvo é poder detectar esse sinal através de um interferômetro multimodal.

1.4. Roteiro

Este trabalho está organizado em capítulos e seções que seguem a ordem cronológica das ações executadas em laboratório. No capítulo 2 é feita uma introdução sobre as descargas elétricas parciais e suas técnicas de medida. No Capítulo 3 foi feito um estudo matemático da interferência e da modelagem matemática do interferômetro multimodal, passando pelos tipos de interferômetros, chegando ao fenômeno da interferência multimodal, que é o fenômeno explorado para o desenvolvimento do sensor tema deste trabalho. O Capítulo 4 trata da montagem do protótipo do interferômetro multimodal, indo desde as etapas iniciais para aumento da sensibilidade do sensor através do aumento da refletividade da ponta do sensor utilizando técnicas de espelhamento, atravessando os resultados parciais das emulações com o sensor, indo até o encapsulamento da região sensora do interferômetro.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais dos testes com o encapsulamento da cabeça sensora nas mesmas condições e configurações dos testes de campo. Neste Capítulo são apresentados os resultados em ambiente de laboratório, porém reproduzindo as mesmas condições de instalação tais como de distâncias e espaço físico que os equipamentos do interferômetro multimodal teriam que enfrentar na medição dos testes em campo.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões acerca do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. Fundamentos teóricos: Descargas elétricas parciais e técnicas de medidas

2.1. Descargas elétricas parciais

As descargas elétricas parciais, em inglês partial discharges (PDs), têm origem em centelhas que ocorrem dentro de transformadores de energia. Estas centelhas são causadas, principalmente, pelo rompimento da isolação elétrica dentro do transformador, causando curtos-circuitos. Esse rompimento da rigidez dielétrica de forma muito concentrada e localizada, levando a uma diminuição brusca da isolação elétrica, leva a um transiente elétrico. Quanto mais tempo o transformador está em operação, mais propício ele é, de forma cumulativa, a danificar sua isolação elétrica, pois ele está sujeito ao stress elétrico, mecânico, térmico e químico do seu ciclo de operação.

A descarga parcial pode ser analisada como uma descarga elétrica na forma de impulso, ou seja, um pulso eletromagnético de banda larga, contendo várias componentes de frequência. Essas componentes de frequência estendem-se das componentes de RF, passando pelas componentes em GHz (microondas), radiações ópticas, indo até emissões na faixa do ultravioleta. Além disso, as descargas parciais provocam ondas acústicas que se propagam pelo material dielétrico do transformador, atingindo suas paredes metálicas. Todos esses fenômenos podem ser utilizados para a detecção das descargas parciais. A emissão de ondas mecânicas pelas descargas parciais será o objeto de sensoriamento a ser estudado nesta dissertação.

Então, a avaliação da deterioração e do envelhecimento com o tempo do material dielétrico (que pode ser líquido, sólido ou gasoso), garantindo internamente a isolação elétrica de transformador, pode ser feita pelo monitoramento das descargas parciais. Este monitoramento de descargas parciais pode ser feito através de várias técnicas de medidas bem conhecidas e exploradas.

Entre as técnicas de medição de descargas parciais disponíveis, destacam-se quatro principais:

1. Amostragem de óleo para detecção de gases dissolvidos;
2. Monitoramento usando detecção de interferência de UHF;
3. Uso de sondas para localizar a origem da descarga parcial;

4. Medição elétrica de descargas individuais usando sensores.

2.2. Técnicas de medida

As técnicas de medida Amostragem de óleo para detecção de gases dissolvidos e Monitoramento usando detecção de interferência de UHF são as mais antigas. Depois de que engenheiros estavam testando Buchholz gases para testes de inflamabilidade, surgiu a disponibilidade da cromatografia gasosa, cuja aplicação vem avançando nos últimos 50-60 anos. Análises de rotinas de gases dissolvidos no óleo tem se tornado muito comum como diagnóstico de descargas parciais ao redor do mundo. Amostras de óleo são retiradas uma a duas vezes no ano do transformador e são enviadas para um laboratório externo para análise. Outra possibilidade mais recente é a implantação de detectores de gases on-line, o que torna a relação custo-benefício para técnica de medição mais atraente e que provavelmente liderará as mudanças na atual tecnologia de medição. Dessa análise é possível detectar os prejuízos causados tanto pelo sobreaquecimento do transformador quanto pelas descargas parciais quanto também separar os gases provenientes do processo de aquecimento dos gases provenientes das descargas parciais.

Outra técnica tradicional utilizada baseia-se na medida dos níveis de interferência causada pelas descargas parciais. É a inspeção usando detecção de interferências em UHF. Descargas parciais originárias de defeitos em transformadores podem emitir radiações eletromagnéticas de frequências muito elevadas, em alguns casos acima de 1 GHz. Alguns dos defeitos internos no transformador que levam à emissão dessas frequências elevadas incluem: problemas nas buchas, para-raio em mal estado de conservação, problemas no seletor, componentes externos soltos, perdas de parafusos e das abraçadeiras das conexões internas.

Uma importante vantagem deste método de inspeção usando a detecção de interferência em UHF para detecção de descargas parciais, em comparação com a técnica de amostragem de óleo para detecção de gases dissolvidos, é que pode ser planejada uma patrulha na subestação, que irá inspecionar todos os equipamentos da planta. Isso poderá indicar problemas nas buchas dos transformadores, por exemplo. Portanto, esse é um tipo de análise que não está limitada pela dificuldade de retirada de uma amostra de gás do transformador. Isso proporciona diagnósticos mais rápidos dos problemas.

Outra técnica para a detecção de descargas parciais é o uso de uma sonda UHF inserida na válvula de óleo do transformador ou na porta que dá acesso ao tanque do transformador. A sonda irá detectar a radiação eletromagnética da descarga parcial e não será afetada pelas frequências de ressonâncias provocadas pelo enrolamento do transformador, alcançando uma melhor performance. O uso de sondas UHF para a detecção de descargas parciais já é bem consolidado, mostrando componentes de frequência de até 1 GHz entre essas descargas parciais, cujas origens são uma variedades de fontes, como as provenientes do óleo do tanque do transformador ou de resquícios de dielétrico, com o papel, envolvidos também no óleo do tanque do transformador.

Este método da sonda UHF oferece uma técnica que é usada localmente, instalada no transformador enquanto ele permanece energizado, dando origem à resultados em um ambiente de alta interferência. Os níveis desses sinais podem ser monitorados e processados usando técnicas modernas de processamento de sinal, melhorando a relação sinal/ruído. Todo esse conjunto de técnicas ajudam na identificação do tipo de problema que causa a descarga, como bolhas ou peças de metais soltas, por exemplo.

Há algumas técnicas que utilizam sensores para detecção descargas parciais. Primeiramente, podemos citar os sensores acústicos em transformadores. Ela utiliza-se de piezoelétricos colocados na carcaça dos transformadores para detectar sinais acústicos em frequências na faixa do ultrassom, entre 100 KHz e 150 KHz. Esses sinais são gerados pelo rompimento de bolhas gasosas formadas pelas descargas parciais dentro do líquido dielétrico do transformador.

Outro tipo de sensor é o de vibração baseado em tecnologia óptica. A vibração originária da descarga parcial pode modular em intensidade a luz proveniente de uma fibra óptica, que é re-injetada na mesma fibra ou em outra fibra.

Nos últimos anos, cada vez mais há um emprego maior da tecnologia de sensoriamento óptico usando a interferometria para a detecção dos sinais acústicos originários das descargas elétricas parciais. Vários tipos de sensores são construídos baseados em diferentes dispositivos interferométricos, como o interferômetro de Michelson e o interferômetro de Mach-Zehnder. O modulador de Mach-Zehnder será usado neste trabalho como base para modelagem matemática do sensor interferométrico multimodal para a detecção de descargas elétricas parciais, que será desenvolvido nesta dissertação.

3. Fundamentos teóricos: Interferometria

3.1. Considerações iniciais

Estamos cercados, todos os dias, por fenômenos que envolvem interferência de ondas. Um padrão de cores cintilante através de uma camada fina de óleo num asfalto molhado é um exemplo de interferência óptica, assim como o azul das asas da borboleta morpho, cuja cor na sua superfície superior muda de tom de acordo com a posição do observador.

A teoria ondulatória da natureza eletromagnética da luz nos permite obter a base matemática para tratarmos dos interferômetros. Seguiremos, então, o importante princípio da superposição, pelo qual o vetor intensidade de campo elétrico resultante \vec{E} , num ponto do espaço onde duas ou mais ondas se sobrepõem, é igual ao vetor soma das contribuições individuais.

Diante da grande quantidade de interferômetros e dos objetivos de nosso estudo, iremos dividi-los em:

a) Interferômetros divisores de frente de onda: uma frente de onda primária é dividida em duas, através de dispositivos ópticos, de forma a emular duas fontes ópticas secundárias. Nesta segunda etapa, estas ondas interferem entre si. Um exemplo deste tipo de interferômetro é o experimento de Young, que será detalhado na seção 3.4.1.1.

b) Interferômetros divisores de amplitude: a onda primária é dividida em duas partes, que se propagam por diferentes rotas. Depois, as mesmas recombina-se e interferem entre si. Um exemplo deste tipo de interferômetro é o interferômetro de Michelson, que será detalhado na seção 3.4.2.1.1

3.2. Análise da interferência no domínio espacial

A compreensão do fenômeno da interferência de ondas eletromagnéticas passa pela manipulação vetorial dos campos elétrico e magnético. De acordo com o princípio da superposição, a intensidade de um vetor campo elétrico \vec{E} num ponto do espaço, surgido das contribuições $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$ de várias fontes é dado por:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 \dots \quad (3.1)$$

Porém, para o estudo da interferência, não medimos a intensidade do campo elétrico total \vec{E} , e sim a intensidade da Irradiância I associada àquele campo total \vec{E} , pois esta grandeza pode ser medida diretamente com uma ampla variedade de sensores, como, por exemplo, fotocélulas. Para um mesmo meio, a relação entre o campo elétrico total naquele ponto e sua irradiância pode ser simplificada para o caso de duas fontes em:

$$I = \vec{E}^2 = \vec{E} \cdot \vec{E}, \quad (3.2)$$

$$\text{sendo } \vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \quad (3.3)$$

A Irradiância num ponto P do espaço é dada então por:

$$I = I_1 + I_2 + I_{12}, \quad (3.4)$$

onde o termo I_{12} é chamado de termo de interferência.

Vamos considerar as seguintes ondas linearmente polarizadas:

$$\vec{E}_1(\vec{r}, t) = \vec{E}_{01} \cos(\vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_1), \quad (3.5)$$

onde \vec{k}_1 é o vetor constante de propagação de \vec{E}_1 , \vec{r} é o vetor posição, ω é a frequência angular e ε_1 é a constante de fase de \vec{E}_1 .

$$\vec{E}_2(\vec{r}, t) = \vec{E}_{02} \cos(\vec{k}_2 \cdot \vec{r} - \omega t + \varepsilon_2), \quad (3.6)$$

onde \vec{k}_2 é o vetor constante de propagação de \vec{E}_2 , \vec{r} é o vetor posição, ω é a frequência angular e ε_2 é a constante de fase de \vec{E}_2 .

O Termo de Interferência é dado por:

$$I_{12} = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02} \cdot \cos \delta, \quad (3.7)$$

onde δ é a diferença de fase decorrente da combinação do comprimento de caminho percorrido pelas duas ondas e da diferença de ângulo de fase inicial, dada por:

$$\delta = \vec{k}_1 \cdot \vec{r} - \vec{k}_2 \cdot \vec{r} + \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \quad (3.8)$$

No caso de \vec{E}_{01} e \vec{E}_{02} forem ortogonais, $I_{12} = 0$, e $I = I_1 + I_2$. Porém, quando \vec{E}_{01} e \vec{E}_{02} são paralelos, a Irradiância assume valores escalares, de acordo com a equação abaixo:

$$I_{12} = E_{01} \cdot E_{02} \cdot \cos \delta, \quad (3.9)$$

que também pode assumir a seguinte fórmula:

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos \delta \quad (3.10)$$

Então a Irradiância total torna-se:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos \delta \quad (3.11)$$

Os valores de I em um ponto qualquer variam, pois dependerá de δ . O máximo valor de I ocorrerá quando $\cos \delta = 1$, então:

$$I_{\text{máx}} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3.12)$$

$$\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots,$$

Este é o caso de interferência total construtiva, estando as ondas que chegam ao ponto P em fase. Na interferência total destrutiva, as ondas estão defasadas de 180° , ou seja, $\cos \delta = -1$ e

$$I_{\text{min}} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3.13)$$

$$\delta = \pm \pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi, \dots,$$

Se a amplitude das ondas que chegam ao ponto P forem iguais, temos que:

$$\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02} \quad (3.14)$$

Então

$$I_1 = I_2 = I_0 \quad (3.15)$$

Logo podemos escrever que:

$$I = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (3.16)$$

$$\text{Onde } I_{\text{min}} = 0 \text{ e } I_{\text{máx}} = 4I_0 \quad (3.17)$$

Para ondas esféricas emitidas a partir de duas fontes S_1 e S_2 , temos as seguintes equações:

$$\vec{E}_1(r_1, t) = \vec{E}_{01}(r_1) \exp(i(kr_1 - \omega t + \varepsilon_1)) \quad (3.18)$$

$$\vec{E}_2(r_2, t) = \vec{E}_{02}(r_2) \exp(i(kr_2 - \omega t + \varepsilon_2)), \quad (3.19)$$

onde r_1 e r_2 indicam os raios das ondas esféricas que se sobrepõem em P. Neste caso, a diferença de fase é dada por:

$$\delta = k(r_1 - r_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3.20)$$

Neste caso, quando os campos elétricos forem paralelos e de mesma amplitude, ou seja,

$$\vec{E}_{01} = \vec{E}_{02}, I_1 = I_2 = I_0 \quad (3.21)$$

Teremos:

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} [k(r_1 - r_2) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)] \quad (3.22)$$

A máxima irradiância ocorre para:

$$(r_1 - r_2) = [2\pi m + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)]/k$$

com

(3.23)

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

E mínima irradiância ocorre para:

$$(r_1 - r_2) = [\pi m' + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)]/k$$

com

(3.24)

$$m' = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots,$$

Como podemos notar, a intensidade da irradiância I no ponto P pode variar da interferência total construtiva para a interferência total destrutiva. Isso forma um padrão de franjas de interferência e a clareza com que essas franjas podem ser vistas pode ser descrita através do conceito de visibilidade das franjas [2]. A visibilidade das franjas é definida por

$$\mathcal{V} \equiv \frac{I_{\text{máx}} - I_{\text{mín}}}{I_{\text{máx}} + I_{\text{mín}}} \quad (3.25)$$

onde $I_{\text{máx}}$ é a intensidade máxima da franja, para o caso da interferência total construtiva e I_{min} é intensidade mínima da franja para o caso de interferência total destrutiva.

3.3. Condições para interferência

Para que dois feixes interfiram para provocar um padrão estável, é necessário que eles possuam aproximadamente a mesma frequência e tenham o mesmo estado de polarização, ou seja, sejam paralelos entre si, e não ortogonais. Além disso, padrões mais claros de interferência são obtidos quando essas ondas têm igual ou cerca de mesma amplitude. As fontes utilizadas para a realização das franjas de interferência não precisam estar em fase uma em relação à outra, mas a diferença de fase entre elas deve ser constante. Essas fontes são ditas coerentes.

3.3.1. Coerência espacial e temporal

À medida que o caminho óptico aumenta, ou seja, quando distanciamos o ponto P de interferência dos feixes da(s) fonte(s), a visibilidade ν cai para cerca de zero, fazendo com que o atraso relativo entre os feixes que interferem entre si supere o que chamamos de tempo de coerência τ , ou que a diferença de caminho entre dois feixes que interferem entre si exceda o comprimento de coerência da luz l_c ,

$$c \cdot \tau = l_c \quad (3.26)$$

Portanto, o tempo de coerência é o máximo intervalo de tempo o qual ainda exista uma correlação de fase entre, por exemplo, duas fontes de luz. O comprimento de coerência é a diferença de caminho óptico no espaço livre correspondente ao atraso de grupo igual ao tempo de coerência [2]. Então, é importante notar que a coerência temporal está relacionada à capacidade que dois feixes relativamente atrasados têm de formar franjas [2].

Portanto, para analisarmos a coerência temporal num experimento, devemos defasar o tempo de chegada entre os feixes para a interferência. Já quando há interferência entre dois feixes deslocados no espaço, e não no tempo, analisa-se a coerência espacial. O tipo de coerência utilizado vai depender do experimento. Aqui, majoritariamente, a não ser que se fale ao contrário, trataremos da coerência temporal.

Para uma fonte gaussiana, o tempo de coerência será de

$$\tau = \frac{0,664}{\Delta\nu}, \quad (3.27)$$

[2] onde $\Delta\nu$ é a largura espectral de meia potência um sinal óptico não monocromático. Portanto, quanto maior a largura espectral da fonte, menor será o tempo de coerência, o que explica o fato de usarmos preferencialmente fontes do tipo LASER do que LED nos experimentos com interferômetros, já que os LASERs possuem um espectro de emissão mais estreito que os LEDs, como mostra a Figura 3.1 [11], conseguindo assim um tempo de coerência maior.

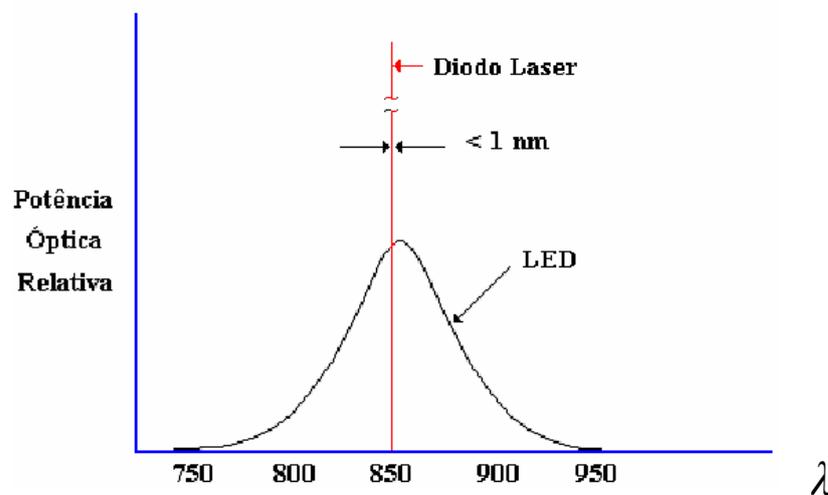


Figura 3.1: Comparação da largura espectral entre uma fonte LASER e um LED, ambos centrados no comprimento de onda de 850 nm.

3.4. Interferômetros

Pode-se fazer a divisão dos interferômetros em dois tipos: os interferômetros de divisão de frente de onda e os interferômetros de divisão de amplitude. Primeiramente, haverá o estudo convencional dos interferômetros, considerando o espaço livre como os braços dos mesmos. Quando houver a modelagem do interferômetro multimodal, parte ou a totalidade do caminho óptico será guiado dentro de fibras ópticas.

3.4.1. Interferômetros de divisão de frente de onda

3.4.1.1. O Experimento de Young

A experiência de Young foi marcante porque demonstrou, no início do século XIX, que a luz era um fenômeno ondulatório e essas ondas luminosas podiam interferir entre si. A Figura 3.2 [8] ilustra tal experimento. Nesta Figura, uma onda luminosa sofre difração ao passar por um orifício S_0 num anteparo A. Logo após, essa onda é difratada novamente no anteparo B pelos orifícios S_1 e S_2 . Há, assim, uma divisão da frente de onda da mesma que vinha de A em direção à B. Essas duas ondas formadas, que vão de B para C, sobrepõem-se para formar uma Figura de interferência no anteparo C. Aqui, as figuras de interferência serão formadas em função da coerência espacial dos feixes.

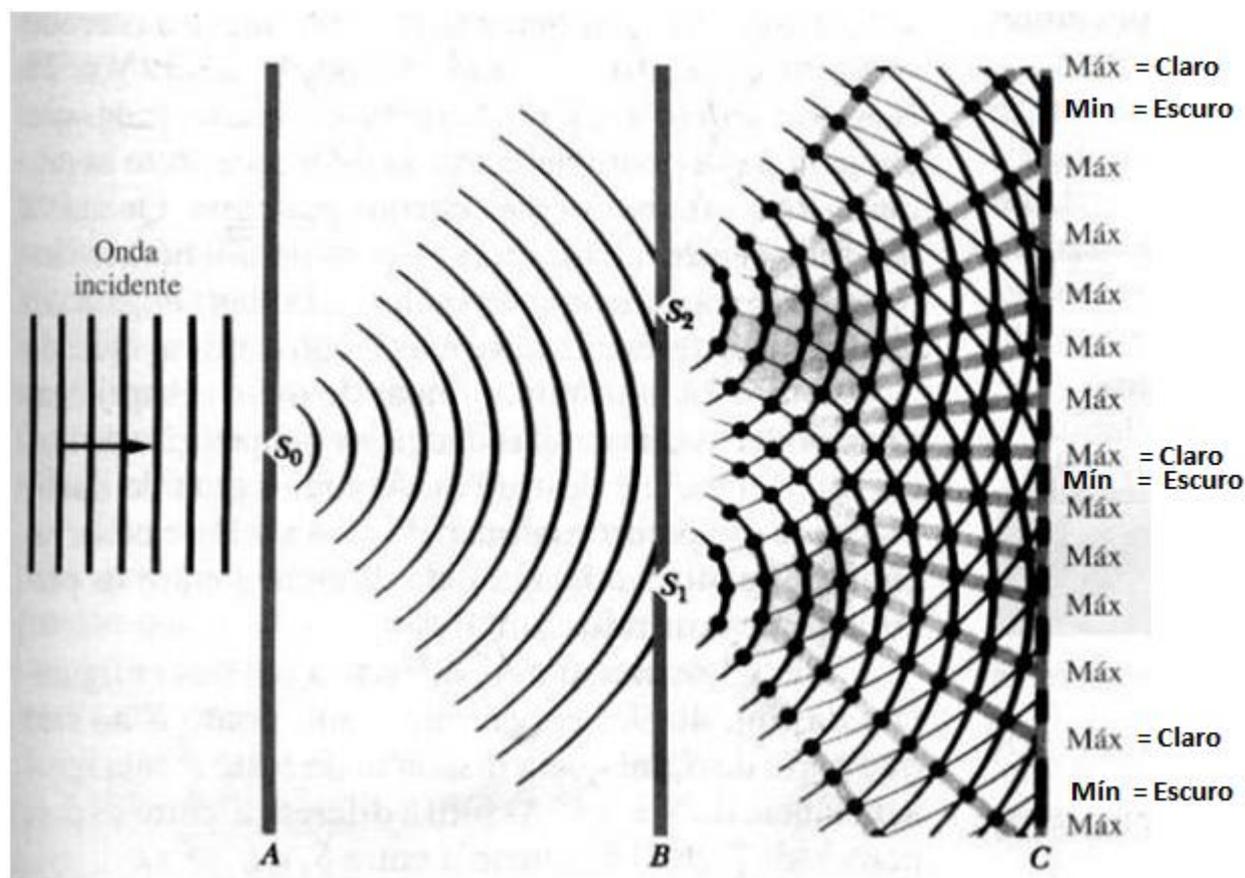


Figura 3.2: O experimento de Young.

Quando a diferença entre os caminhos percorridos pelos feixes que saem de S_1 e S_2 , como ilustra a Figura 3.3 [7], for igual a um número inteiro de comprimentos de onda, isso equivalerá à

interferência construtiva e a um máximo de interferência na tela. Inversamente, quando os trajetos feitos pelas ondas, d_1 e d_2 equivaler a um número ímpar de λ , a interferência na tela C será destrutiva, equivalendo ao padrão escuro na Figura 3.2.

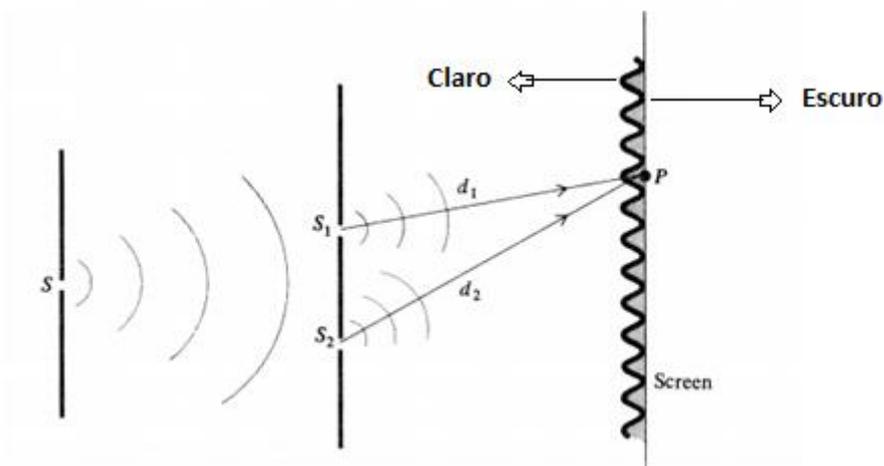


Figura 3.3: Diferença entre os caminhos percorridos pelos feixes que saem de S1 e S2.

Traçando uma reta perpendicular no eixo do experimento de Young, como mostra a Figura 3.4 [8], podemos determinar a localização dos máximos e mínimos, de acordo com o ângulo θ que essa reta faz com a localização dos pontos. Considerando a distância entre as fendas S_1 e S_2 igual a d , haverá interferência construtiva quando:

$$d \cdot \sin \theta = m \cdot \lambda$$

(3.28)

Para $m = 0, 1, 2, \dots$

E haverá interferência destrutiva quando:

$$d \cdot \sin \theta = (m + 1/2) \cdot \lambda$$

(3.29)

Para $m = 0, 1, 2, \dots$

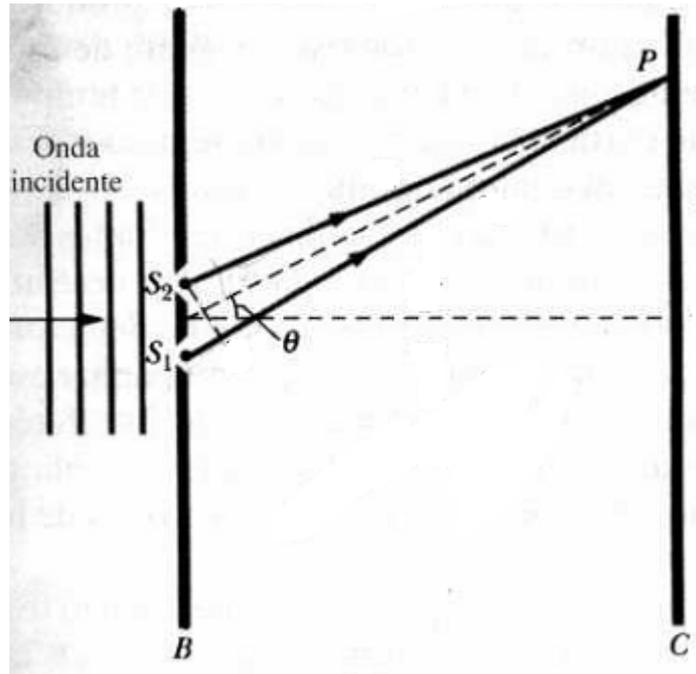


Figura 3.4: Localização dos máximos e mínimos de interferência.

Se no lugar de orifícios circulares, tivéssemos fendas retangulares, o arranjo formado na tela C seria no formato de Franjas de Interferência, como mostrado na Figura 3.5 [8]. A intensidade I das franjas em função do ângulo θ é dada por:

$$I = 4 \cdot I_0 \cdot \left(\cos\left(\frac{1}{2}\varnothing\right) \right)^2, \quad (3.30)$$

$$\text{onde } \varnothing = \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \cdot \sin \theta \quad (3.31)$$

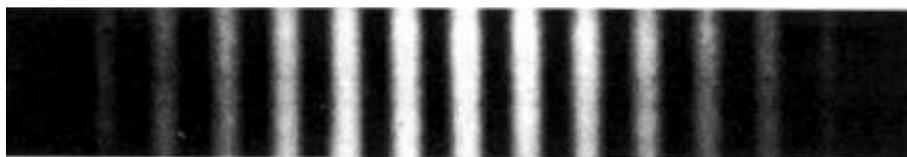


Figura 3.5: Franjas de interferência.

A Figura 3.6 [8] mostra o gráfico da Intensidade (I) da Figura de interferência em função da diferença de fase entre as ondas.

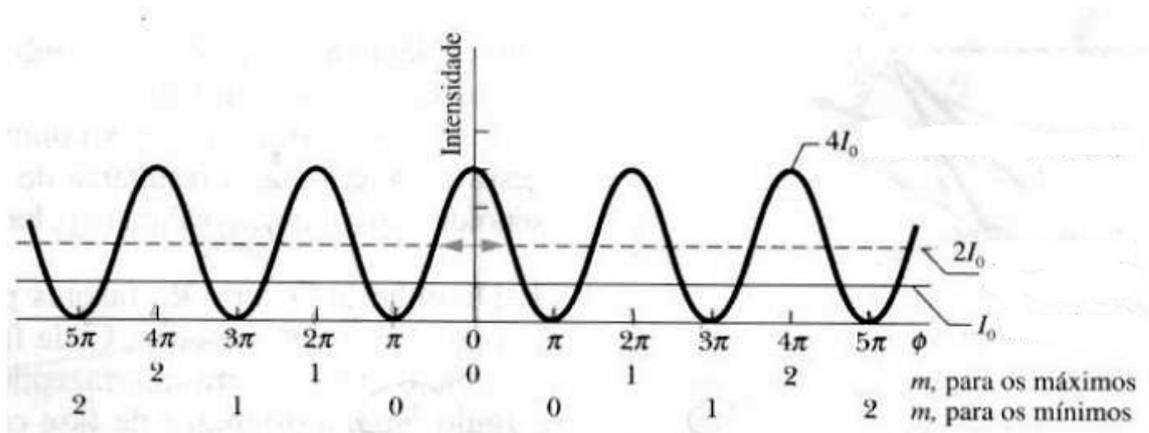


Figura 3.6: Gráfico intensidade figura de interferência.

Na prática, na experiência de Young é considerada a distância entre as telas B e $C \gg d$. Além de tornar a análise mais simplificada, essa consideração ajuda para que a diferença de comprimento de caminho óptico não exceda o comprimento de coerência.

3.4.1.2. Outros tipos de interferômetros de divisão de frente de onda

Outros tipos de interferômetros de divisão de frente de onda apresentam os mesmos princípios físicos e matemáticos do experimento de Young. Eles são mostrados na Figura 3.7 [7].

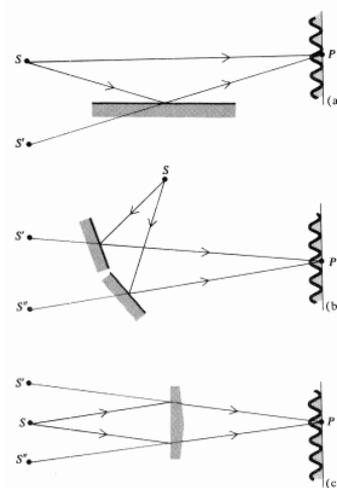


Figura 3.7: (a) Espelho simples de Lloyds; (b) Espelho duplo de Fresnel ; (c) Biprisma de Fresnel.

Em todos eles, uma simples fonte S emite ondas em várias direções, que são trazidas de volta para se interferirem no anteparo através de espelhos, prismas e lentes, que funcionam para produzirem fontes virtuais S' e/ou S'' mutuamente coerentes com S , formando as franjas de interferência.

3.4.2. Interferômetros de Divisão de Amplitude

Outra classe de interferômetros são aqueles que dividem a amplitude de uma onda inicial para que depois os feixes resultantes possam interferir entre si.

3.4.2.1. Interferômetros espelhados

Há uma grande quantidade de arranjos que se utilizam de semi-espelhos para dividir a potência óptica de uma onda e assim provocar a interferência entre os raios refletidos. Os mais importantes serão descritos a seguir:

3.4.2.1.1. O Interferômetro de Michelson

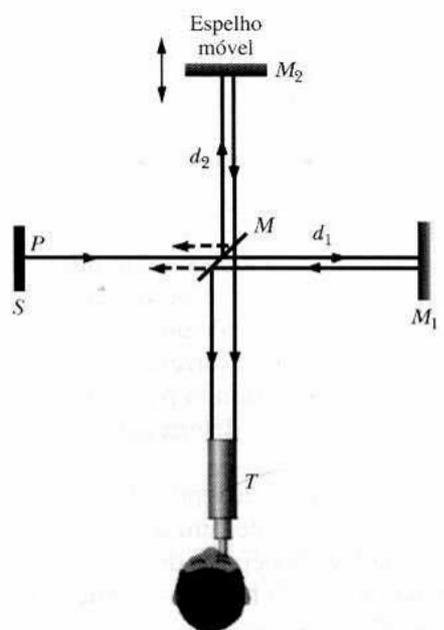


Figura 3.8: Interferômetro de Michelson.

O Interferômetro de Michelson é ilustrado na Figura 3.8 [8]. Nele, um feixe óptico partindo da fonte S de P é dividido pelo espelho semi-reflexivo M , que transmite parte do feixe para o espelho M_1 e outra parte do feixe para o espelho M_2 . O feixe refletido de M_2 é transmitido para o observador T , juntamente com o feixe refletido de M_1 , que será espelhado em M para chegar finalmente em T também. Assim, os feixes formam para o observador em T uma Figura de interferência, cuja característica é dada pela diferença de caminho óptico percorrido pela luz nos braços do arranjo, dada por

$$2d_2 - 2d_1 \quad (3.32)$$

Qualquer deslocamento no espelho móvel M_2 , por exemplo, alterará d_2 e, portanto, o padrão de interferência visto pelo observador.

3.4.2.1.2. O Interferômetro de Mach-Zehnder

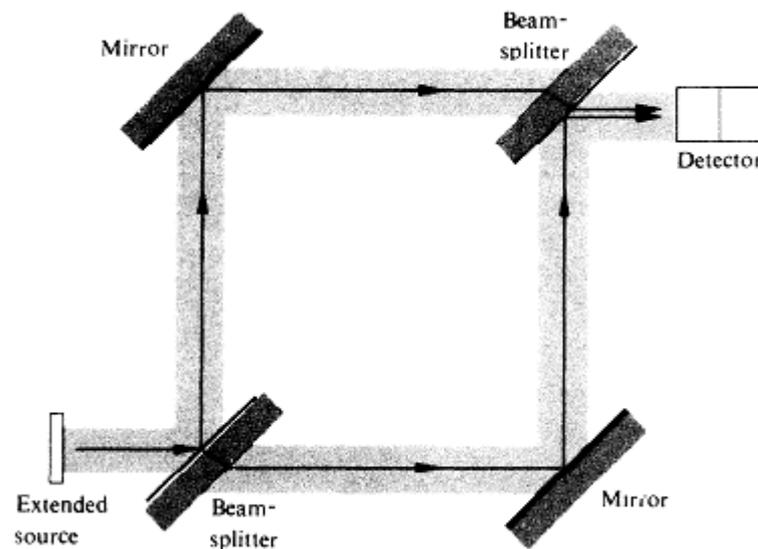


Figura 3.9: Interferômetro de Mach-Zehnder.

A Figura 3.9 [9] mostra o Interferômetro de Mach-Zehnder. Ele é formado por dois divisores de feixes e dois espelhos totalmente reflexivos. O princípio de funcionamento é descrito a seguir. A onda emitida pela fonte é dividida em duas pelo divisor de feixes, que seguem por dois caminhos.

Estes feixes são então refletidos pelos espelhos, aonde chegam ao detector para formar o padrão de interferência.

A alteração dessa Figura no detector pode se dar pelo deslocamento angular dos dispositivos do experimento.

3.4.2.1.3. O Interferômetro de Sagnac

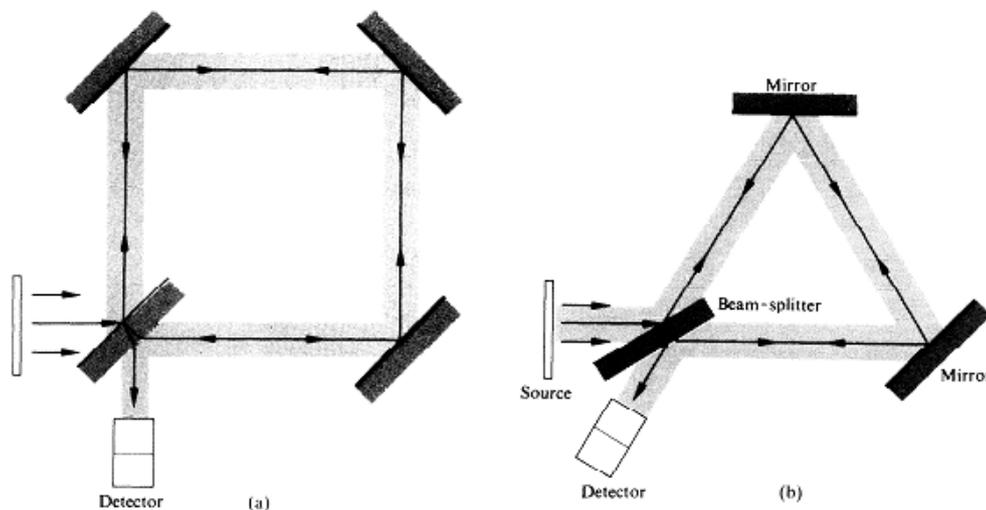


Figura 3.10: Variações do interferômetro de Sagnac em (a) e (b).

Outro interferômetro classificado como divisor de amplitude é interferômetro de Sagnac. A Figura 3.10 [9], em (a) e (b), ilustra duas de suas variações. Nele, os feixes ópticos que saem da fonte percorrem o mesmo caminho dentro do arranjo, só que em direções contrárias antes de se interferirem, o que é um diferencial comparado aos outros tipos de interferômetros convencionais, onde cada raio percorre um caminho por um braço diferente do aparato. Qualquer desvio em um dos espelhos provocará alteração no padrão de interferência. Se o conjunto do interferômetro sofrer uma rotação, ou seja, rodar em volta de seu eixo, os feixes sofrerão defasagem por efeito Doppler.

Como outros exemplos de interferômetros, podemos citar o interferômetro de Fabry-Perot, os interferômetros a fibra e os interferômetros baseados no Batimento (trabalham com interferência no tempo).

3.5. O fenômeno da interferência multimodal e o auto imageamento

O tipo de interferômetro que iremos explorar neste trabalho é baseado num fenômeno já explorado na literatura, mas que tem ganhado mais atenção nos últimos anos [10], face aos outros tipos de interferômetros, descritos neste trabalho até então. Trata-se da interferência multimodal que ocorre quando há uma recombinação na passagem dos modos de uma fibra multimodo para uma fibra monomodo. Esse fenômeno ocorre, por exemplo, numa emenda onde há a fusão de uma fibra monomodo com uma fibra multimodo. A Figura 3.11 ilustra esse mecanismo. Nesta Figura, o trecho de fibra monomodo, representado pelo guia em preto e branco, permite apenas a propagação do modo fundamental. Na junção da fibra monomodo com a fibra multimodo, a energia óptica é distribuída nos modos propagantes que são permitidos dentro do seu núcleo. Na literatura, é comum termos outro trecho de fibra monomodo do lado direito da fibra multimodo em verde, num dispositivo do tipo SMS (Single Mode – Multi-Mode – Single Mode), onde a potência óptica retorna para uma fibra monomodo. O esquema do dispositivo SMS seria quase o mesmo da figura 3.11, com diferença da retirada do espelhamento, ilustrado em laranja na Figura 3.11, e a colocação de outra fibra monomodo à direita da fibra multimodo.

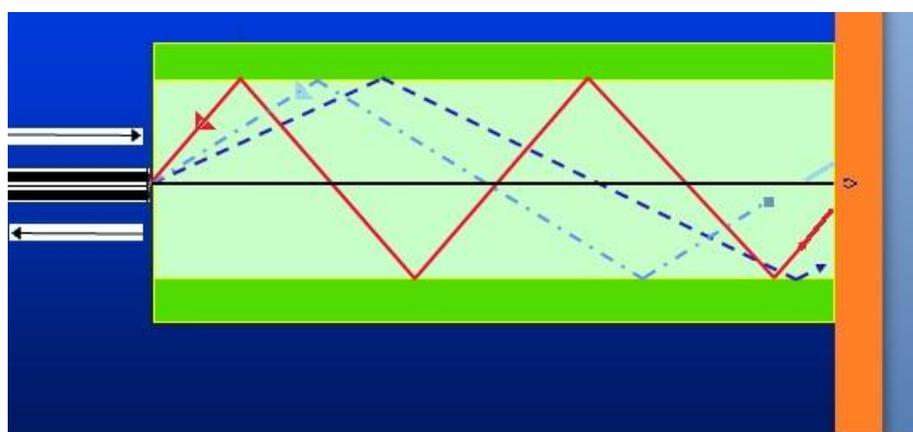


Figura 3.11: Emenda SM/MM , espelhamento na ponta da fibra MM e o fenômeno da MMI.

No caso da construção do nosso interferômetro, é necessário que essa energia retorne para a fibra monomodo de origem, o que não altera significativamente a configuração do interferômetro. Isso foi feito através de uma técnica de espelhamento do sinal na ponta clivada da fibra multimodo, representada na Figura pela tira em laranja. Sendo numa estrutura SMS ou do tipo espelhada (reflexiva), como construímos, apenas uma parte da energia é reacoplada para o modo fundamental

da fibra monomodo. Nesse acoplamento e reacoplamento, os vários modos dentro da fibra multimodo sofrem interferência.

O sensor MMI tem um funcionamento baseado na resposta à estímulos mecânicos que acabam por gerar interferência entre os modos que se propagam dentro na fibra multimodo. Esta interferência é caracterizada pela redistribuição desses modos ou alteração de fase entre eles. A figura 3.12 mostra o exemplo de uma estrutura do tipo SMS, onde também ocorre o fenômeno MMI. Neste caso, a fibra multimodo utilizada é do tipo gradual.

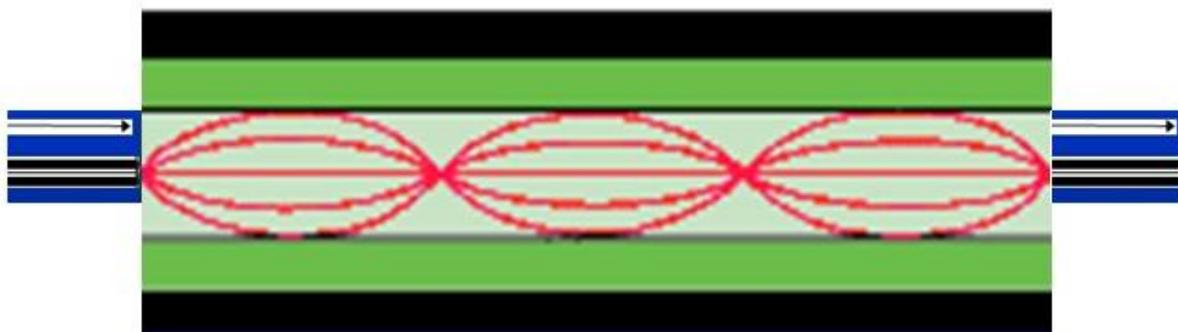


Figura 3.12 : estrutura do tipo SMS utilizado fibra multimodo do tipo gradual

Trabalhos passados [16] demonstraram a utilização deste tipo de estrutura SMS como sensor modalmétrico distribuído para medição de estiramentos e distúrbios ao longo da fibra [18], ou seja, como estruturas de detecção que se baseiam na interferência multimodal que ocorre em cada eventualidade mecânica na fibra multimodo gradual. Cada vez essa fibra multimodo, no dispositivo SMS, fica sujeita a essas pressões externas, um novo tipo de acoplamento na fibra monomodo é estabelecido.

Uma propriedade encontrada em estruturas do tipo SMS é a chamada self-imaging ou auto-imageamento [26]. Esse fenômeno pode ser descrito como uma propriedade dos guias de onda multimodo pelo qual o perfil do campo de entrada é reproduzido em uma única ou em múltiplas imagens em intervalos periódicos ao longo da direção de propagação do guia [6]. Apesar do fenômeno do auto-imageamento ter sido começado a ser estudado nas fibras ópticas do tipo multimodo degrau, esse fenômeno é latente nas fibras ópticas multimodo gradual, pelo fato da luz ir se focalizando e se desfocalizando de forma curvilínea em intervalos de tempos periódicos [19], conforme pode ser visto pela figura 3.12.

Assim, quando uma perturbação mecânica/acústica em uma estrutura do tipo SMS ou do tipo espelhada (reflexiva) acontece [21], a fibra óptica multimodo nesses dispositivos se comporta como uma perfeita transmissora dessas perturbações [28], estendendo-se da faixa 20 KHz até 1MHz, aproximadamente.

Um estímulo externo foi planejado para ser emulado à fibra multimodo, que será a cabeça sensora para o nosso dispositivo de detecção de descargas elétricas parciais. O nosso sensor MMI foi projetado na bancada para ser sensibilizado por uma frequência de 130 KHz através de uma cerâmica piezoelétrica, emulando o que cita a literatura [1, 2] uma máquina elétrica que emite ondas mecânicas ultrassônicas provocadas por descargas elétricas parciais. Quando isso acontece na fibra multimodo, o sinal externo oriundo da vibração ocasiona uma modulação na fibra multimodo. Os raios que são desacoplados em vários modos de propagação na fibra multimodo e depois reacoplados no retorno à fibra monomodo, interferem entre si com mudanças na fase. Assim, é determinado um novo padrão temporal de interferência equivalente à excitação mecânica empregada.

Quando a potência do modo fundamental na fibra monomodo é reacoplada na fibra multimodo, essa potência será reacoplada majoritariamente em modos de baixa ordem [25]. Assim, usando somente os dois primeiros modos, temos matematicamente a interferência entre esses modos na fibra multimodo [27]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \frac{2\pi \Delta n L}{\lambda}, \quad (3.33)$$

Onde,

I : potência do modo fundamental;

I_1 : potência do primeiro modo de mais baixa ordem;

I_2 : potência do segundo modo de mais baixa ordem;

Δn : diferença dos índices de refração na fibra multimodo;

L : comprimento da fibra multimodo;

λ : comprimento de onda no espaço livre.

Quando existe uma perturbação na fibra multimodo, a distribuição de potência dos modos de baixa ordem na fibra alterará, gerando a interferência. O diâmetro do núcleo de uma fibra monomodo é até 20 vezes menor do que uma fibra multimodo. Assim, quando há uma emenda entre a fibra monomodo e a fibra multimodo, seja no caso da estrutura SMS ou reflexiva (espelhada), há uma filtragem dos modos quando a luz é transmitida da fibra monomodo para a fibra multimodo,

caracterizando um acoplamento modal. Este acoplamento modal caracteriza-se, justamente, pela interferência entre os modos de propagação na fibra multimodo, na qual somente alguns desses modos serão reinjetados na fibra monomodo [25].

A perturbação mecânica aplicada à fibra multimodo faz ocorrer uma modulação espacial da fase do grupo de raios que é convertida em variação de intensidade óptica quando o sinal é reinjetado na emenda fibra monomodo/fibra multimodo[10]. O sensor MMI cria um sinal de interferência na emenda SM/MM que modula o re-acoplamento na fibra monomodo para o comprimento de onda de operação, sendo o motivo a superposição de N modos de propagação [17]. A intensidade da interferência multimodal pode ser escrita também como [10]:

$$I' = I_{CW} \pm I(r, \theta), \quad (3.34)$$

Onde,

I_{CW} : nível DC de intensidade óptica

$I(r, \theta)$: Termo Cruzado de Interferência

O desenvolvimento do sensor para descargas elétricas parciais envolve aspectos tanto da interferência multimodal quanto o fenômeno do auto-imageamento. A presença de um sinal de pressão na fibra óptica multimodo gera uma alteração no perfil de reimageamento. Então, há uma modulação na fase, fazendo com que o perfil de reacoplamento da luz que retorna à fibra monomodo seja diferente do perfil de entrada inicial. Resumindo, a vibração mecânica emulada na fibra multimodo pela cerâmica piezoelétrica alterará as fases dos modos de propagação dentro na fibra multimodo, causando na emenda monomodo/multimodo uma alteração para modulação na amplitude.

3.6. Modelagem matemática do interferômetro MMI

É possível fazer uma modelagem matemática do sensor MMI baseada no tratamento matemático dado ao modulador Mach-Zehnder [22,24] (MZM – Mach-Zehnder Modulator), um dispositivo da óptica integrada baseado no interferômetro de Mach-Zehnder [12]. A Figura 3.13 mostra um exemplo de MZM utilizado no LACOP.

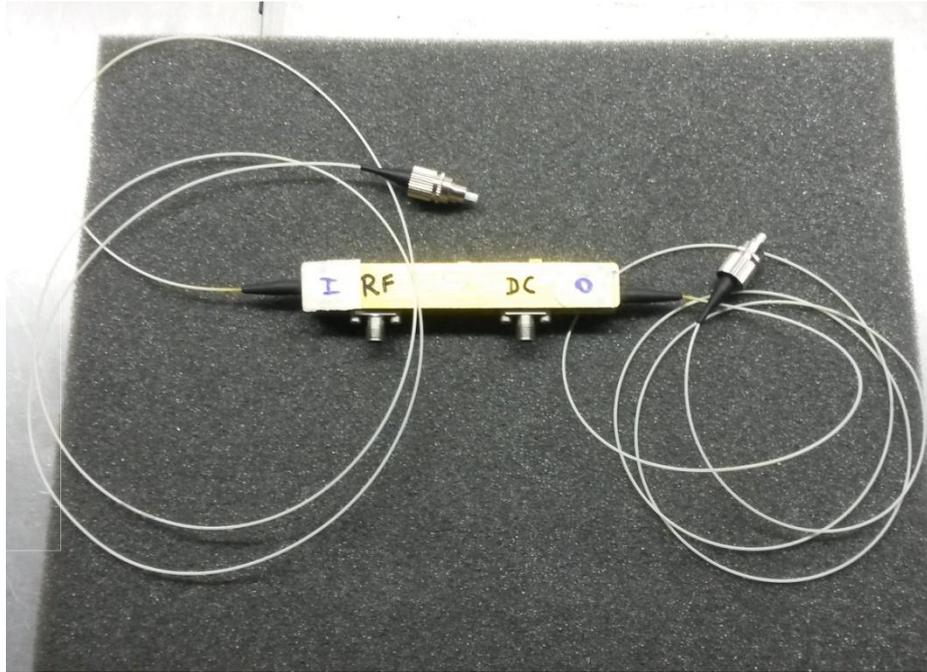


Figura 3.13: Exemplo de modulador Mach-Zehnder utilizado no LACOP.

As quatro portas do MZM têm a seguinte função:

INPUT (I): entrada da potência óptica, ou seja, do sinal da portadora óptica ;

RF: entrada de um sinal modulante;

DC: entrada de um sinal DC que ajusta a região de modulação

OUTPUT (O): saída do sinal óptico modulado.

O princípio de funcionamento do MZM baseia-se na Figura 3.14 [13], um esquema simplificado da sua estrutura interna. A potência óptica acoplada pelo terminal de entrada na Figura 3.14 (ou pelo terminal *INPUT* na Figura 3.13) é dividida igualmente entre dois guias ópticos, que são denominados braços do modulador. O sinal modulante a ser acoplado na porta RF da Figura 3.13, que são as tensões $V_1(t)$ e $V_2(t)$ da Figura 3.14, alteram o índice de refração de um material não-linear de segunda ordem que constitui os braços do modulador. Um exemplo desse material é o Niobato de Lítio (LiNbO_3).

Assim, quando não há sinal modulante, ou seja, quando não há variação da tensão $V_1(t)$ e $V_2(t)$, não há alteração do índice de refração nos braços do modulador. Os sinais ópticos divididos chegam na saída no MZM (*OUTPUT* da Figura 3.13) sem diferença de fase, numa interferência

construtiva, com sinal de potência igual a da entrada. Por outro lado, quando varia-se a tensão $V_1(t)$ e $V_2(t)$, ou seja, na presença de um sinal modulante, os sinais ópticos divididos chegam com uma diferença de fase entre eles, o que causa uma interferência destrutiva na saída do MZM, acarretando numa redução da potência óptica em relação ao valor da intensidade da potência de entrada.

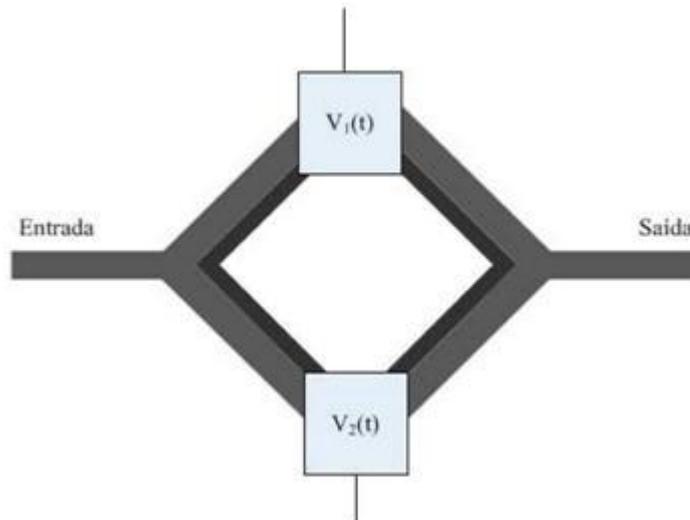


Figura 3.14: Esquema simplificado interno de um MZM.

Pode-se, então, fazer uma analogia entre o MZM e o sensor MMI desenvolvido nesta obra. Enquanto que, no MZM, a divisão da potência óptica é feita nos braços do interferômetro, no dispositivo MMI a potência óptica é dividida em vários modos na passagem da fibra monomodo para a fibra multimodo. Depois de serem refletidos no espelhamento, feito através de um bulbo de mercúrio, os sinais são reacoplados com diferença de fase na fibra monomodo quando houver a presença de uma deformação causada na fibra por um sinal de pressão modulante externo. Esse sinal de pressão modulante externo que causará a deformação na fibra será o sinal oriundo de um gerador de sinais conectado à uma cerâmica piezoelétrica, uma senoide de amplitude 10 V e frequência de 130 KHz, emulando uma onda mecânica na frequência do ultrassom emitida pela descarga parcial. Essa senoide que emula a descarga parcial faz o papel do sinal RF, na comparação com o MZM.

3.6.1. Função de transferência

O MZM é um dispositivo da óptica integrada não-linear. Sua função de transferência (FT) é do tipo senoidal, conforme equação 3.35, pode ser usada também para modelar matematicamente a FT do sensor MMI.

$$FT(D_{in}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi D_{in}}{D_{\pi}} \quad (3.35)$$

Onde,

D_{in} = parâmetro de deformação a qual a fibra é sujeita na entrada que caracteriza sua modulação.

D_{π} = parâmetro de deformação para qual ocorre interferência total destrutiva na saída do acoplador óptico.

Deste modo, quando $D_{in} = D_{\pi}$, tem-se $FT = 0$, como é mostrado a seguir:

$$FT = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi D_{\pi}}{D_{\pi}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \pi = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0 \quad (3.36)$$

Agora, fazendo $D_{in} = 0$, tem-se $FT = 1$, como também é mostrado a seguir:

$$FT = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi 0}{D_{\pi}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 0 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1 \quad (3.37)$$

A função de transferência tem, então, o formato da Figura 3.15 .

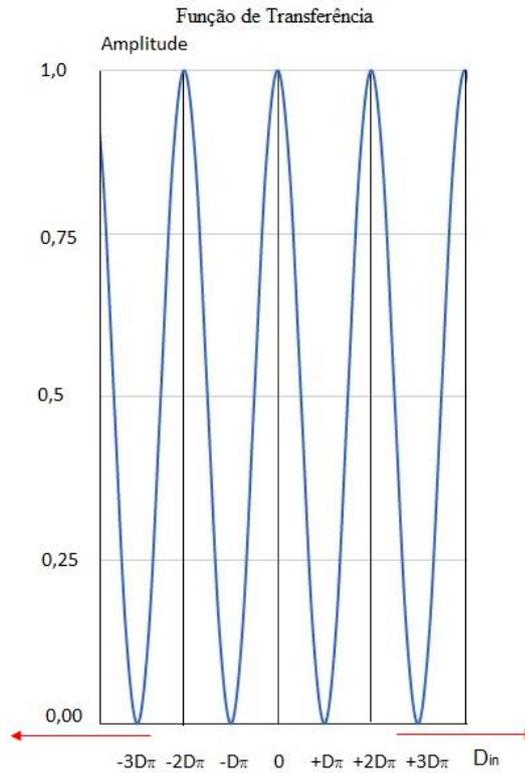


Figura 3.15: Função de transferência do sensor MMI

Analisando visualmente a FT do sensor MMI, os pontos de pico da senoide correspondente aos valores da FT do sensor MMI, cuja derivadas naqueles pontos são zero, correspondem às regiões onde a Função de Transferência tem característica não-linear. Afastando-se dos picos, a FT mostra-se como uma reta, apresentando um comportamento linear, onde a derivada é diferente de zero, podendo ser positiva na reta crescente ou negativa na decrescente. Modulando-se com um sinal de pressão na entrada, uma D_{in} na região linear, reta da FT, será produzida uma menor distorção do sinal modulado $S_m(t)$. Por outro lado, quando há modulação próxima da área curva da FT, na região não-linear, o sinal modulado apresenta fortes distorções harmônicas.

É importante destacar que essa função sofre deslocamentos no eixo x [29,30], ou seja, ela não é imóvel e centralizada no eixo da coordenada 0 em x como mostra a Figura 3.15. Isto é devido à característica do sensor MMI ser instável na fase, devido à variações mecânicas e de temperatura do ambiente. A cada momento vários e diferentes modos somam-se com diferença de fase no reacoplamento com a fibra monomodo. Pode-se dizer que a FT do MZM é mais estável que a do sensor MMI, pois enquanto no MZM a luz percorre apenas dois braços para haver a interferência, ou seja, um modo em cada braço do MZM, no sensor MMI há múltiplos caminhos que luz percorre antes de haver a interferência.

O deslocamento da função de transferência pode ser modelado na FT do sensor MMI através de um parâmetro chamado $D_{\Delta A}$, conforme mostra a equação a seguir:

$$FT(D_{in}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi(D_{in} + D_{\Delta A})}{D_{\pi}} \right] \quad (3.38)$$

$$D_{\Delta A} = D_{\Delta T} + D_{\Delta M} \quad (3.39)$$

$D_{\Delta A}$: parâmetro de deformação que modela o deslocamento da FT;

$D_{\Delta T}$: parâmetro de deformação ocasionado pela variação de temperatura;

$D_{\Delta M}$: parâmetro de deformação ocasionado pelas vibrações externas do ambiente.

O parâmetro $D_{\Delta A}$ faz com que a fase do interferograma varie aleatoriamente em função dos parâmetros ambientais.

Lembrando que D_{π} é o parâmetro de deformação para qual ocorre interferência total destrutiva na saída do acoplador óptico. É uma constante do sensor MMI, não medida no momento, que depende de seus parâmetros como geometria de construção, tipo e comprimento da fibra multimodo utilizada. Com essa deformação, tem-se uma variação de π radianos no interferograma.

Lembrando também que D_{in} é a deformação de entrada, equivalente no nosso caso do sensor MMI para detecção de descargas elétricas parciais, ao sinal de pressão modulante oriundo do piezoelétrico que causa a deformação na fibra ou seja:

$$D_{in} = D_{sinal}(t) = A \sin(W_0 t) + B \quad (3.40)$$

A : Tensão aplicada à cerâmica Piezoelétrica, $A = 10$ V nos testes.

B : Tensão DC do gerador, $B = 0$ V nos testes.

W_0 : $2\pi f_0$, onde f_0 é a Frequência do gerador de sinais e $f_0 = 130$ KHz nos testes.

Substituindo 3.6 em 3.4, tem-se:

$$FT(D_{sinal}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi(D_{sinal} + D_{\Delta A})}{D_{\pi}} \right] \quad (3.41)$$

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left\{ \frac{\pi[A \sin(W_0 t) + B + D_{\Delta A}]}{D_{\pi}} \right\} \quad (3.42)$$

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi A \sin(W_0 t) + \pi B + \pi D_{\Delta A}}{D_{\pi}} \right] \quad (3.43)$$

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left[\frac{\pi(B + D_{\Delta A})}{D_{\pi}} + \frac{\pi A \sin(W_0 t)}{D_{\pi}} \right] \quad (3.44)$$

Utilizando a propriedade da regra dos cossenos, onde:

$$\cos(a + b) = \cos(a) \cos(b) - \sin(a) \sin(b)$$

Tem-se:

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left\{ \cos \left[\frac{\pi(B + D_{\Delta A})}{D_{\pi}} \right] \cos \left[\frac{\pi A \sin(W_0 t)}{D_{\pi}} \right] - \sin \left[\frac{\pi(B + D_{\Delta A})}{D_{\pi}} \right] \sin \left[\frac{\pi A \sin(W_0 t)}{D_{\pi}} \right] \right\} \quad (3.45)$$

Adotando que:

$$b = \frac{\pi(B + D_{\Delta A})}{D_{\pi}} \quad (3.46)$$

$$c = \frac{\pi A}{D_{\pi}} \quad (3.47)$$

Agora substituindo b e c na equação 3.11, tem-se:

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \{ \cos(b) \cos[c * \sin(W_0 t)] - \sin(b) \sin[c * \sin(W_0 t)] \} \quad (3.48)$$

É possível, de acordo *Yariv & Yeh* [14] reescrever a equação 3.14 em uma série formada por funções de Bessel de primeira espécie de ordem n , dada por:

$$J_n(c) \text{ para } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

De acordo com a identidade da função de Bessel, tem-se:

$$\cos[c * \sin(W_0 t)] = J_0(c) + 2J_2(c) * \cos(2W_0 t) + 2J_4(c) * \cos(4W_0 t) + \dots \quad (3.49)$$

$$\sin[c * \sin(W_0 t)] = 2J_1(c) * \sin(1W_0 t) + 2J_3(c) * \sin(3W_0 t) + \dots \quad (3.50)$$

Fazendo-se as substituições temos:

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \{ \cos(b) [J_0(c) + 2J_2(c) * \cos(2W_0 t) + 2J_4(c) * \cos(4W_0 t) + \dots] - \sin(b) [2J_1(c) * \sin(1W_0 t) + 2J_3(c) * \sin(3W_0 t) + \dots] \} \quad (3.51)$$

Multiplicando $\cos(b)$ e $\sin(b)$ com termos da série:

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} [J_0(c) \cos(b) + 2J_2(c) \cos(b) \cos(2W_0t) + 2J_4(c) \cos(b) \cos(4W_0t) + \dots \quad (3.52)$$

$$- 2J_1(c) \sin(b) \sin(1W_0t) - 2J_3(c) \sin(b) \sin(3W_0t) - 2J_5(c) \sin(b) \sin(5W_0t)$$

$$+ \dots]$$

Simplificando, temos a equação do sinal modulado:

$$S_m(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} J_0(c) \cos(b) + J_2(c) \cos(b) \cos(2W_0t) + J_4(c) \cos(b) \cos(4W_0t) + \dots \quad (3.53)$$

$$- J_1(c) \sin(b) \sin(1W_0t) - J_3(c) \sin(b) \sin(3W_0t) - J_5(c) \sin(b) \sin(5W_0t) + \dots$$

Nota-se que o termo $B + D_{\Delta A}$ na equação 3.42 é responsável pelo controle de estabilidade de fase do interferograma. Percebe-se também que b somente altera a amplitude dos harmônicos e c indica a geração dos diversos harmônicos.

4. Montagem experimental do interferômetro multimodal

4.1. Testes iniciais de aumento de sensibilidade com o espelho fixo

Após explicação da interferência multimodal mostrado na seção 3.5, testes iniciais foram feitos para testar o aumento ou não da sensibilidade do dispositivo com o emprego de um tipo de espelhamento na ponta da fibra multimodo. Com a ponta da fibra multimodo somente clivada, de acordo com Fresnel, aproximadamente só 4% da potência injetada é refletida novamente para dentro da fibra. Nosso objetivo foi, então, tentar aumentar a potência introduzida na fibra por reflexão a fim de conseguirmos visualizar um padrão de interferência no osciloscópio com maior visibilidade, ou seja, com uma maior clareza do padrão de franjas de interferência.

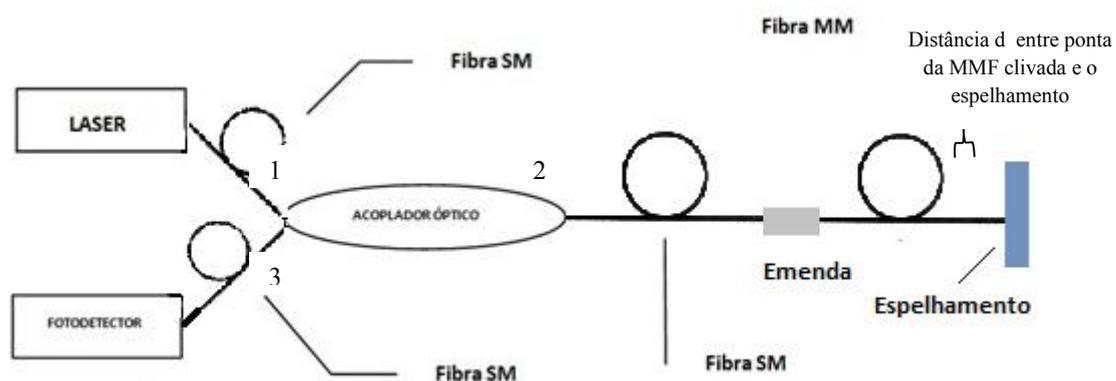


Figura 4.1: Configuração experimental básica do sensor.

Como montagem inicial para o espelhamento, visualizado na configuração experimental básica do sensor, Figura 4.1, temos os seguintes equipamentos e elementos:

LASER – injeta uma potência óptica de 6dBm, no comprimento de onda $\lambda = 1.550$ nm, no terminal 1 do acoplador óptico através de um trecho de fibra monomodo.

Acoplador Óptico – elemento de distribuição do sinal óptico entre os terminais 1, 2 e 3. Quando a potência óptica é injetada no terminal 1, ela é redirecionada para o terminal 2, que é conectada ao espelhamento. A potência que é injetada ao terminal 2 é direcionada ao terminal 3

somente, onde está o fotodetector. Há um isolador óptico entre o terminal 1 e o LASER que impede que haja o redirecionamento da potência óptica para o LASER.

Fotodetector – responsável por converter a potência óptica injetada no terminal 3 em tensão elétrica, que pode ser analisada através de um osciloscópio. O ganho deste fotodetector foi configurado para 30 dB.

Fibra SM – Trecho de Single Mode Fiber (fibra monomodo)

Fibra MM – Trecho de Multi Mode Fiber (fibra multimodo)

Emenda – junção entre a fibra monomodo e a fibra multimodo realizada através de uma máquina de fusão.

Espelhamento – setup inicial com o espelhamento através de um espelho fixo.

Foi posta a ponta da fibra multimodo clivada, num suporte para fibra e em cima de uma base, a aproximadamente 1 mm de distância de um espelho fixo, como mostra a Figura 4.2. Nessa posição, observa-se um padrão temporal de interferência visualizado na Figura 4.3, onde o Osciloscópio foi ajustado aqui com 5 mV por divisão para tensão e 5 ms na base de tempo. Quando se desloca o conjunto base mais suporte que fixa a fibra ou o espelho transversalmente, ou seja, impedindo que espelhamento faça aumentar a potência refletida para dentro da fibra, nota-se o desaparecimento do padrão temporal de interferência e a presença somente de ruído no sinal, do tipo branco, como é visto na Figura 4.4 por um padrão típico desse sinal, com amplitudes aleatórias com valor máximo de aproximadamente de 5 mV_p ao longo do tempo. Já o padrão temporal de interferência com a presença de espelho fixo apresenta até 40 mV_{pp} de amplitude do sinal.

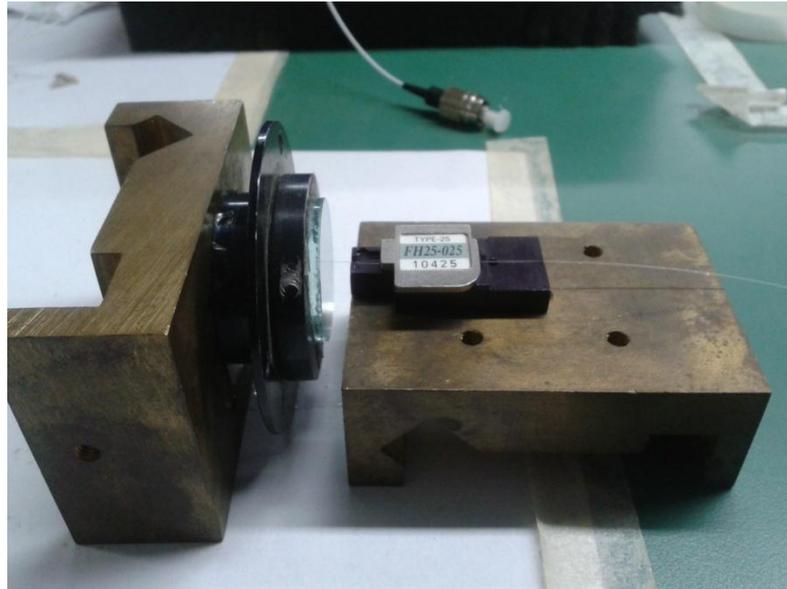


Figura 4.2: Configuração inicial para testes com espelhamento fixo da fibra multimodo.

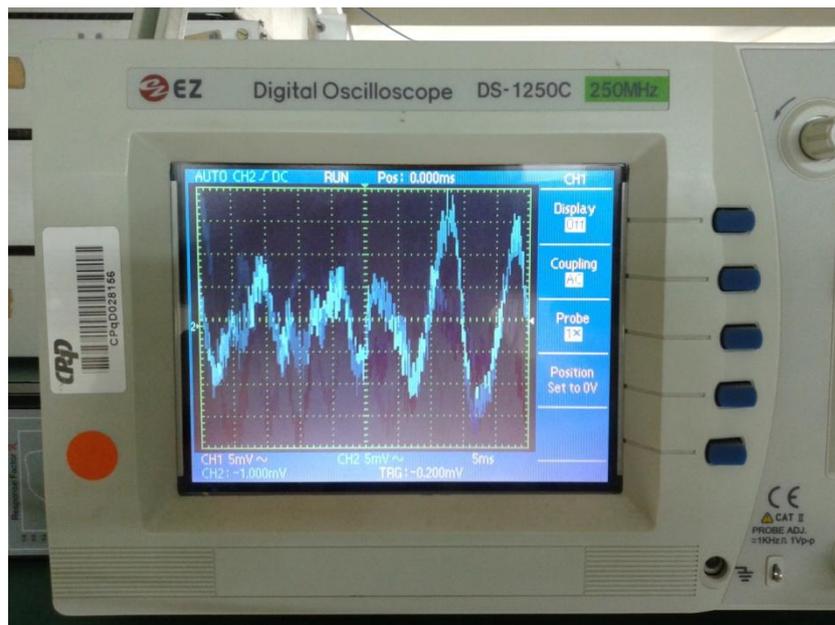


Figura 4.3: Padrão de interferência de espelhamento com a presença do espelho fixo. Osciloscópio ajustado com 5mV por divisão para tensão e 5ms na base de tempo.

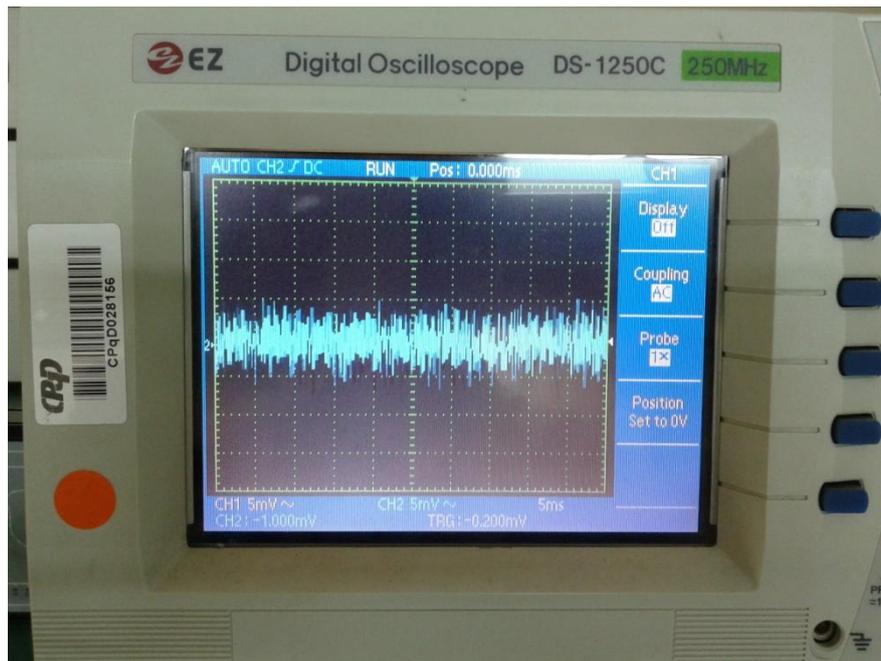


Figura 4.4: Sinal de ruído quando retiramos o espelhamento por espelho fixo da ponta da fibra multimodo.

4.2. Espelhamento com o bulbo de mercúrio

Foi observado, então, um aumento da sensibilidade do interferômetro com a presença do espelhamento através do espelho fixo. Porém, a construção da cabeça sensora do futuro sensor, com essa configuração, se tornaria demasiadamente complexa e instável, pois, na prática, o conjunto espelho fixo e fibra multimodo deveria possuir as seguintes características:

a) Estabilidade no posicionamento de aproximadamente 1 mm de distância, no mínimo, entre o espelho fixo e a ponta da fibra multimodo clivada, para que a reflexão pudesse ocorrer de forma satisfatória;

b) O conjunto fibra e espelho fixo tinha que permanecer imóvel/estável.

c) Como já citado anteriormente, uma das vantagens dos sensores ópticos é o fato de eles serem leves e de tamanho reduzido. O conjunto da Figura 4.2 não permitia essa característica.

O objetivo foi, então, aumentar ainda mais a sensibilidade do interferômetro multimodal pelo aumento da visibilidade das franjas. Com outra técnica de espelhamento da fibra multimodo que incrementa o valor da Irradiância I , foi possível ganhar algumas dezenas de mV no padrão temporal de interferência, mantendo as mesmas configurações iniciais da potência do LASER e do ganho do fotodetector.

Desta forma, passa-se a utilizar para o espelhamento da potência óptica na extremidade da fibra multimodo, um bulbo de mercúrio de um termômetro clínico. O mercúrio passa a ser o responsável pela reflexão. Alguns bulbos de termômetros de mercúrio foram retirados, conforme mostra a Figura 4.5. Um grande problema é como colocar a ponta clivada da fibra multimodo dentro do orifício do bulbo de mercúrio sem desgastá-la e, assim, sem comprometer o sinal, uma vez que tal orifício tem $500\ \mu\text{m}$ de diâmetro, aproximadamente, e o diâmetro da fibra multimodo é de $125\ \mu\text{m}$. Ou seja, trata-se de muito dimensões reduzidas para um ajuste somente manual.

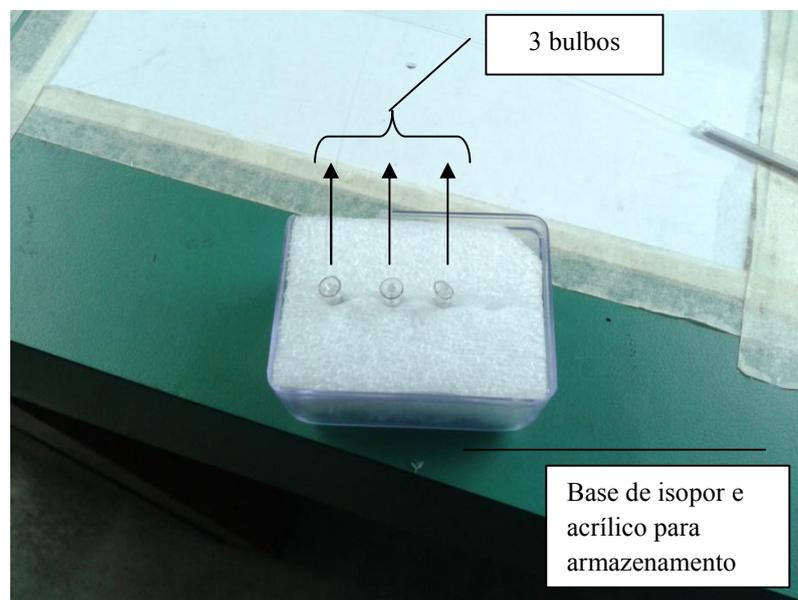


Figura 4.5: Bulbos de mercúrio retirados de termômetros.

Para este fim, foi desenvolvida uma máquina de posicionamento, como mostra a Figura 4.6. Este mecanismo prende a fibra multimodo através de um fixador de acrílico do tipo “abre e fecha”. A fibra então fica presa nesse aparato. O bulbo de mercúrio é fixado numa base plástica, de cor branca como mostrada na Figura 4.6. Essa base é sustentada por um eixo móvel, que permite o deslocamento da base, e assim, do bulbo de mercúrio, em três direções, altura, largura e profundidade, conforme pode ser visto pelos 3 mancais também da Figura 4.6, sinalizados em vermelho. Isso permite ajustar, precisamente, a entrada do bulbo de mercúrio com ponta da fibra multimodo, não danificando e não perdendo a clivagem da ponta da fibra multimodo. A máquina de posicionamento foi planejada para haver um monitoramento visual do processo de qualquer posição a qualquer instante.

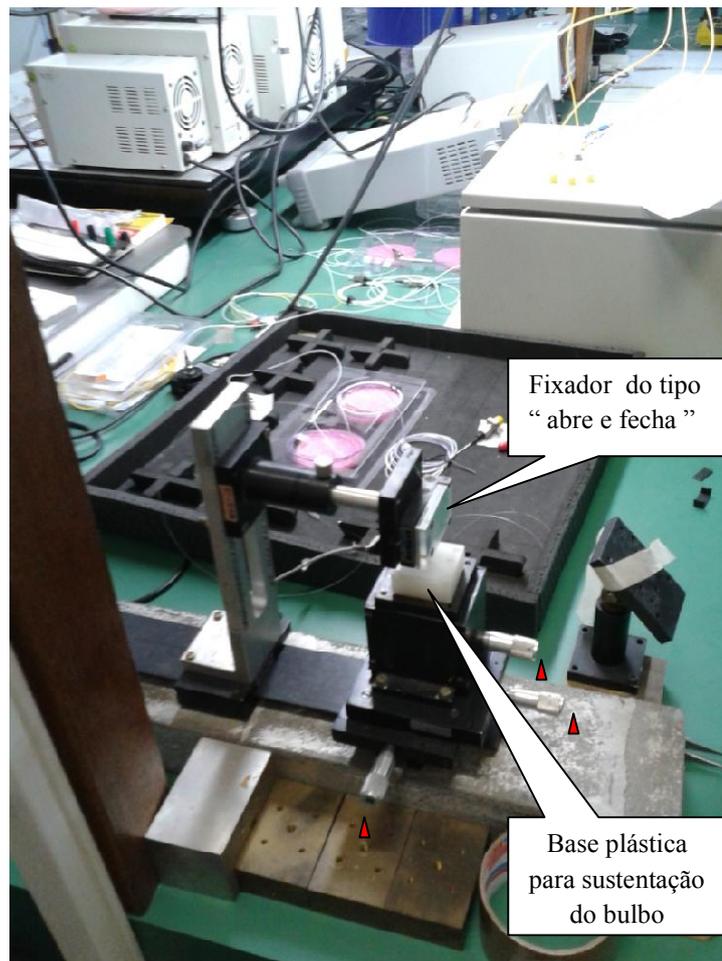


Figura 4.6: Máquina de posicionamento para fixação da ponta da fibra multimodo no bulbo de mercúrio.

Assim, depois de inserir a extremidade da fibra multimodo dentro do bulbo de mercúrio, é feito um ajuste vertical da fibra, comparando com a figura de interferência observada no osciloscópio. A Figura 4.7 mostra uma fibra multimodo posicionada dentro do bulbo de mercúrio. Na posição onde a sensibilidade de resposta ao espelhamento for eficaz, ou seja, na saída do fotodetector para o osciloscópio apresentar um ganho por reflexão, fixou-se a posição da fibra no bulbo com cola instantânea para que a mesma não saia da posição. Como esse processo de clivagem e posicionamento de uma fibra multimodo no bulbo através desse mecanismo é manual, observam-se diferenças de ganho na repetição do processo. O importante, contudo, para haver um ganho desejável é evitar o desgaste através do contato da ponta clivada da fibra multimodo com o fundo de vidro do bulbo de mercúrio. Com essa precaução, consegue-se, assim, um aumento de sensibilidade que é um

dos motivos do sucesso do uso bulbo de mercúrio para o aumento da visibilidade das franjas de interferência do sensor MMI.

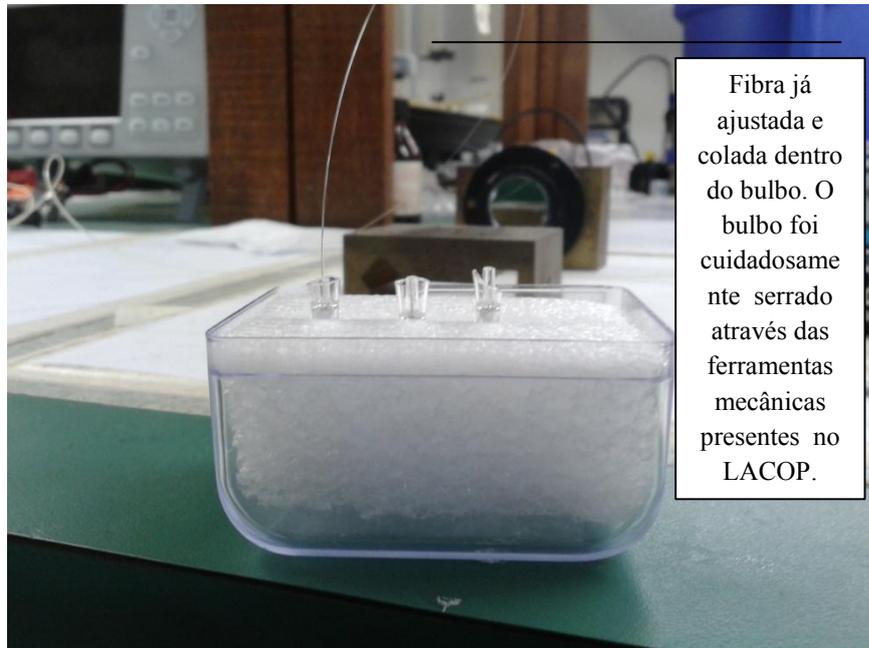


Figura 4.7: Fibra multimodo posicionada dentro do bulbo de mercúrio.

4.3. Emulação da emissão de sinais ultrassônicos pelas descargas parciais e o protótipo do interferômetro multimodal

4.3.1. O protótipo do sensor óptico

O objetivo principal deste trabalho é construir o encapsulamento da cabeça sensora do interferômetro multimodal. Assim, deve-se começar pela montagem de um protótipo e fazer os testes do sensor em bancada com o trecho fibra monomodo – emenda – fibra multimodo (espelhado pelo bulbo de mercúrio), ainda solto, visto na Figura 4.7. O propósito é emular, no laboratório, a ocorrência de descargas parciais em equipamentos elétricos de potência. A literatura [3,4] descreve que quando esses equipamentos apresentam danos, emitem sinais na faixa do ultrassom da ordem de 130 KHz, conforme foi visto na seção 2.1 sobre descargas elétricas parciais. Para esse fim, utilizamos uma cerâmica piezoelétrica ligada a um gerador de funções, configurado para oscilar na mesma frequência de 130 KHz. Um exemplo de cerâmica piezoelétrica é a cerâmica de titanato zirconato de chumbo (PZT) [15]. A Figura 4.8 mostra o esquema do protótipo do sensor interferométrico multimodal montado na bancada.

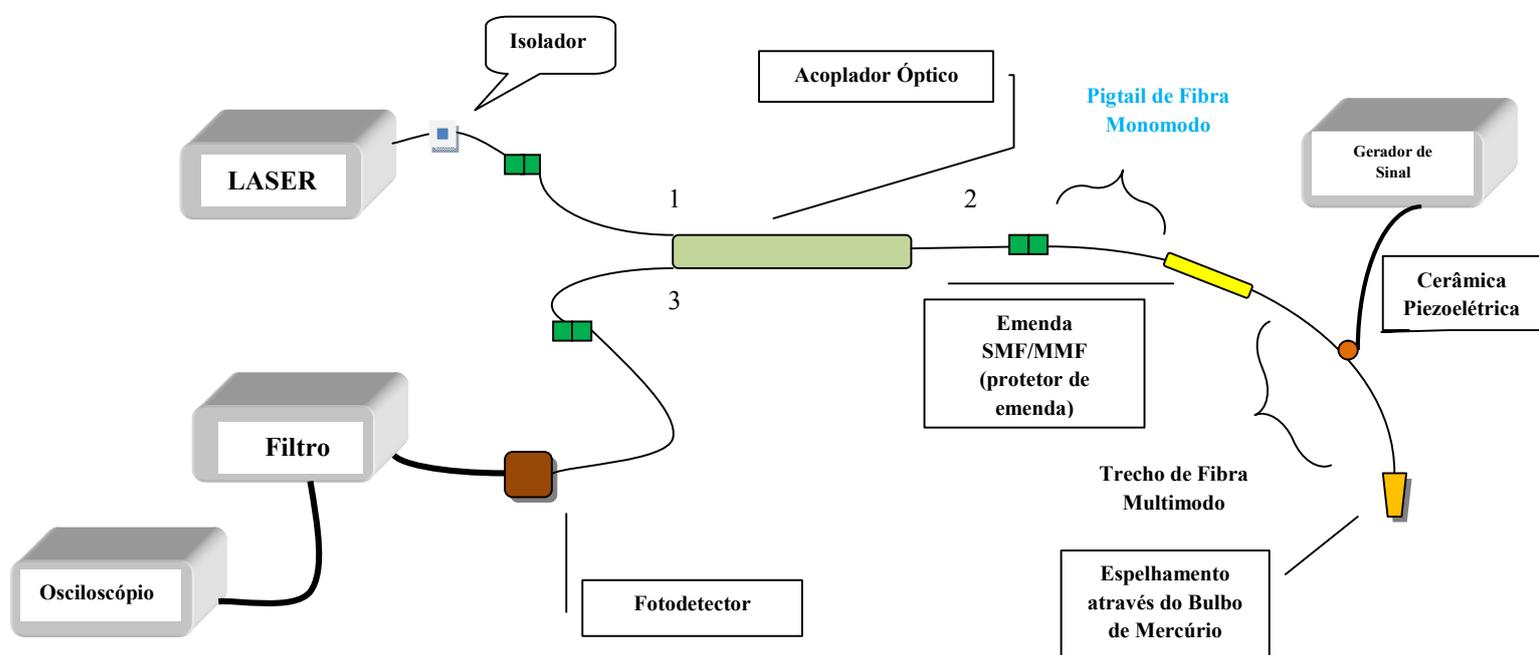


Figura 4.8: O protótipo do interferômetro multimodal feito na bancada.

Conforme a Figura 4.8, um LASER de emissão de onda contínua (CW), operando no comprimento de onda $\lambda = 1.550$ nm, da marca Agilent, modelo 8163B, é posto para emitir uma potência de 6 dBm, conforme mostra a Figura 4.9, que é injetada no terminal 1 do acoplador óptico 2x1. Entre a fonte LASER e o acoplador, é usado um isolador óptico com o objetivo de proteger o LASER de reflexões pela fibra.



Figura 4.9: Configuração inicial do LASER para a operação do protótipo do sensor interferométrico.

Um detalhe construtivo de grande importância, que tornou a manipulação do protótipo na bancada mais fácil e a tomada de resultados mais ágil, foi quando tornamos todas as três portas do acoplador óptico conectorizáveis (através de conectores FC, em verde na Figura). A Figura 4.10 mostra o acoplador já conectorizado, na bancada. Isso permite que na saída do acoplador se possa conectar várias fibras multimodos espelhadas no bulbo de mercúrio vindas da máquina de posicionamento, conforme visto na seção 4.2. Assim, foi possível fazer os testes da sensibilidade de ganho dos diferentes bulbos sem ter que fazer e refazer emendas a cada bulbo testado.

Assim, os resultados foram satisfatórios devido à configuração montada: o trecho pigtail monomodo – emenda (em amarelo na Figura 4.8) – fibra multimodo espelhada possui um conector FC na ponta oposta ao espelhamento. A potência óptica que vem do LASER, após passar pela emenda entre as fibras SM e MM, Figura 4.11, é desacoplada em vários modos, que são refletidos

com um maior ganho pela presença do espelhamento do bulbo de mercúrio, em laranja na Figura 4.8, (em comparação com o clivamento simples da sua ponta), e são reacoplados novamente na fibra monomodo.

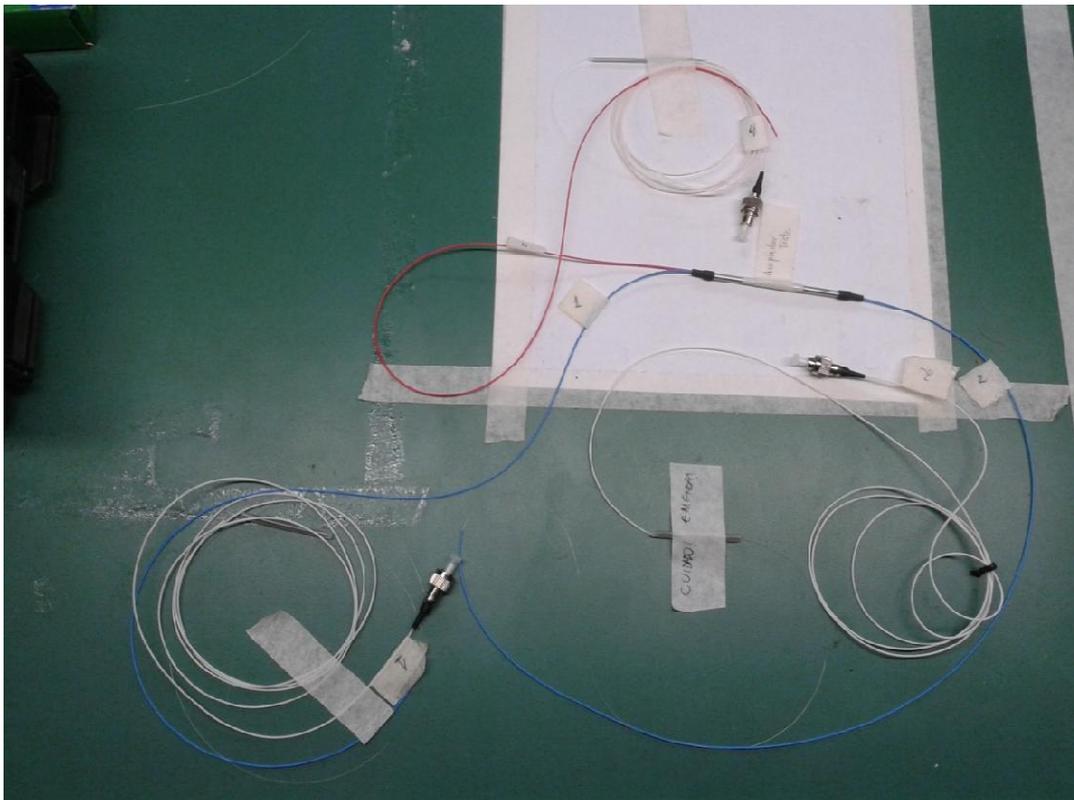


Figura 4.10: Acoplador óptico conectorizado desconectado em bancada.



Figura 4.11: Emenda entre SMF e MMF, interface onde ocorre a injeção e reinjeção dos modos interferentes.

O trecho de fibra multimodo espelhada na ponta pelo bulbo de mercúrio da Figura 4.8 é a parte principal da cabeça sensora do interferômetro multimodal para detecção de descargas parciais. O esforço principal deste trabalho é o encapsulamento deste trecho junto com o pigtail monomodo, unidos pela emenda SM/MM (Single Mode – Multi Mode). A partir de um gerador de sinais, da marca Tektronix, modelo AFG 3101, Figura 4.12, emulamos a situação, em bancada, da emissão de descargas parciais em equipamentos elétricos defeituosos. Quando isso ocorre, o equipamento danificado emite, segundo a literatura [3,4], sinais na frequência do ultrassom na ordem de 130 KHz. Assim, configura-se o gerador de sinais para oscilar, então, na frequência de 130 KHz com uma tensão de 10 Vpp sobre a cerâmica piezoelétrica, Figura 4.12. Essa cerâmica tem a função de converter a variação de tensão do gerador de sinais em variação de pressão sobre um pedaço da fibra multimodo, caracterizando a vibração ultrassônica, provocando uma deformação na fibra multimodo. Para ajudar na aderência da fibra multimodo com a cerâmica, foi colocada um pouco de plasticina, conhecida coloquialmente como “massa de modelar”, conforme pode ser visto na Figura 4.13 e Figura 4.14.

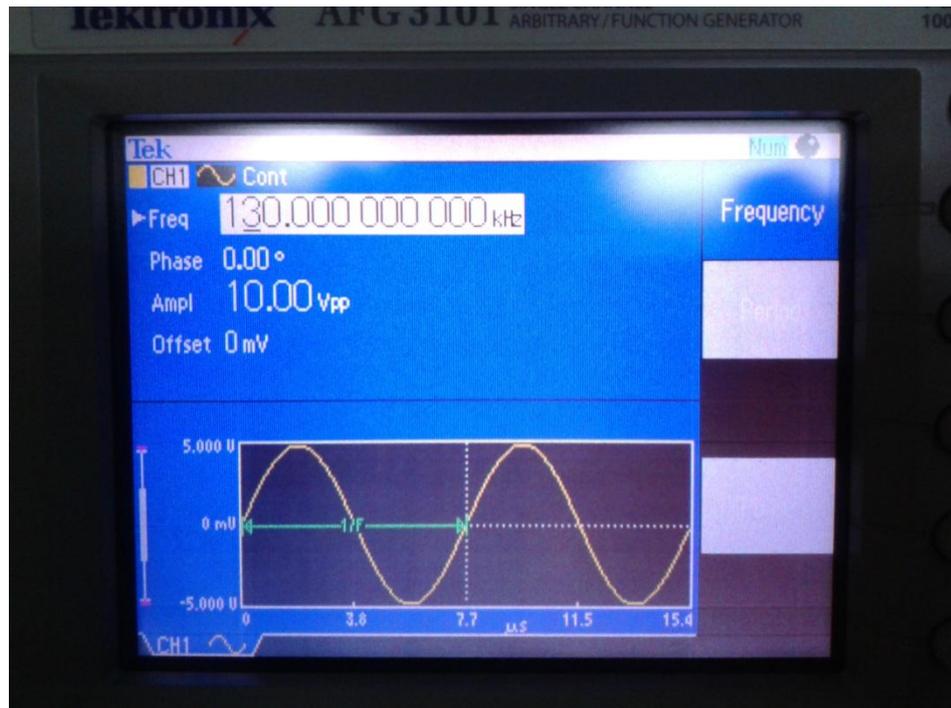


Figura 4.12: Gerador de sinais configurado em 130 KHz e 10 Vpp para emulação em bancada dos sinais ultrassônicos emitidos quando há descargas parciais em uma máquina elétrica defeituosa.



Figura 4.13: Cerâmica piezoelétrica.

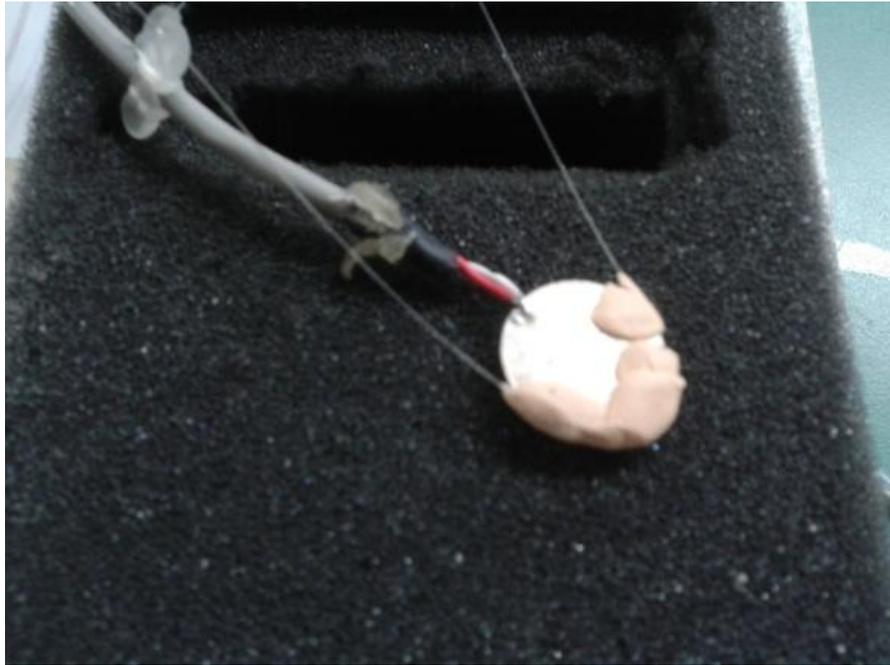


Figura 4.14: Cerâmica piezoelétrica vibrando sobre a fibra multimodo fixada com a ajuda de plasticina.

A vibração mecânica provocada pela cerâmica piezoelétrica na fibra óptica provoca um rearranjo na distribuição de modos. Estes, ao retornarem para a fibra óptica monomodo são reacoplados com alteração na fase. Desta forma, um novo padrão de interferência é estabelecido, e proporcional à vibração mecânica utilizada. É essa a Figura de interferência que se visualiza no osciloscópio, depois que o sinal passa outra vez pelo acoplador 2x1 e então é detectado pelo fotodetector (marca ThorLabs, modelo PDA10CS – InGaAs, com amplificação de 0 a 90 dB, trabalhando entre os comprimento de onda de 700nm e 1800nm). Como manipulamos o LASER no comprimento de onda de 1550 nm, este fotodiodo está apto. A Figura 4.15 mostra o fotodetector utilizado.



Figura 4.15: Fotodetector usado na construção do sensor modalmétrico.

Como foi visto na seção 3.6.1, vide a diversidade de componentes harmônicas geradas na modulação pela cerâmica piezoelétrica no fenômeno interferométrico, fica difícil observar uma correlação entre a frequência de excitação da cerâmica piezoelétrica e o sinal visualizado no osciloscópio. Portanto, foi posto, inicialmente, para os testes, um filtro passivo, Figura 4.16. Esse equipamento, na verdade, é composto por dois módulos: um módulo filtro passa-baixa superior e um módulo filtro passa-alta inferior, Figura 4.18. Quando juntamos a saída do filtro passa-alta com a entrada do filtro passa-baixa, criamos um Filtro passa-faixa, Figura 4.17. Assim, a entrada do fotodetector ficou configurada para ser ligada no terminal INPUT inferior do conjunto e a saída para o Osciloscópio no terminal OUTPUT superior do conjunto.



Figura 4.16: Filtro passivo.



Figura 4.17: Filtro passivo na configuração passa-faixa.

Assim sendo, pode-se configurar o filtro para selecionar a faixa de frequência que é de interesse. Assim, definiu-se, como um padrão, a frequência de corte de 70,7 KHz para o filtro passa-alta e 200 KHz para o filtro passa-baixa. Assim, foi estabelecido, com a combinação da resposta dos dois filtros, um novo filtro passa-faixa entre 70,7 e 200 KHz, Figura 3.19, com uma largura espectral que fornece uma margem de segurança suficiente para detectarmos o sinal de interesse de 130 KHz proveniente do gerador de sinais.



Figura 4.18: Módulos filtros passa-baixa e passa-alta.



Figura 4.19: Configuração padrão do filtro passa-faixa: entre 70,7 a 200 KHz. As frequências de corte são pré-configuradas.

4.3.2. Resultados com o protótipo do interferômetro multimodal

A partir da configuração do protótipo do sensor interferométrico multimodal, detalhada na seção 4.3.1, partiu-se para a execução de algumas emulações na bancada. Esses testes iniciais permitiram, por exemplo, testar diferentes trechos vindos da máquina de posicionamento mostrada na Figura 4.6 para escolher qual o trecho fibra multimodo mais bulbo de mercúrio que proporcionaria um superior ganho de reflexão no espelhamento, como será visto ainda nesta seção 4.3.2. Assim, a troca foi feita substituindo o conjunto fibra multimodo mais bulbo de mercúrio que saía do ajuste da máquina de posicionamento, como é visualizado na Figura 4.20. O trecho completo foi constituído de um pigtail monomodo, com uma saída FC na ponta, em verde na Figura 4.20, que podia ser conectorizado a qualquer momento na saída do acoplador. Em seguida vinha a emenda

SM/MM e o trecho de fibra multimodo com o espelhamento através do bulbo de mercúrio na extremidade.



Figura 4.20: Trecho do protótipo MMI que foi sendo trocado para escolha do melhor ganho de espelhamento pelo bulbo de mercúrio.

A configuração dos equipamentos da Figura 4.8 foi a seguinte:

Equipamento	λ de Operação	Potência de Operação
LASER	1550 nm	6 dBm
Equipamento	Frequência de Oscilação	Tensão
Gerador de Sinal	130 KHz	10 Vpp
Equipamento	λ de Operação	Ganho
Range do Fotodetector	700-1800nm	30 dB

Tabela 4.1: Parâmetros de configuração dos equipamentos na emulação com o protótipo do sensor.

Nas próximas 3 seções, mostraremos os resultados dos testes realizados em bancada e visualizados qualitativamente na tela do Osciloscópio.

4.3.2.1. Padrão de interferência para a ponta da fibra multimodo apenas clivada

Com o propósito de realizar uma comparação qualitativa, mostra-se, de início, propositalmente, o nível do sinal resultante na saída do fotodetector apenas com a ponta da fibra multimodo clivada. Nesta situação, o nível de potência refletida é baixíssimo. De acordo com Fresnel, só aproximadamente 4% da potência retorna na reflexão. Estamos trabalhando, nesta situação, com o canal 1 (em amarelo) e com 50 mV/div na graduação da tensão do osciloscópio. Apesar da pequena intensidade do sinal de saída, nota-se no osciloscópio a presença ainda de uma modulação senoidal, caracterizada pela resposta de uma FFT em 130 KHz, justamente na frequência de vibração da cerâmica piezoelétrica, alimentada pelo gerador de funções, que excita mecanicamente a fibra multimodo, como já mostrado na Figura 4.14. O osciloscópio é configurado para a visualização, na mesma tela, do sinal e sua transformada rápida de Fourier FFT (Fast Fourier Transform). A FFT aparece em vermelho, com ajuste de 125 KHz/div de frequência na horizontal, setado com 10dB/div no Osciloscópio, Figura 4.21.

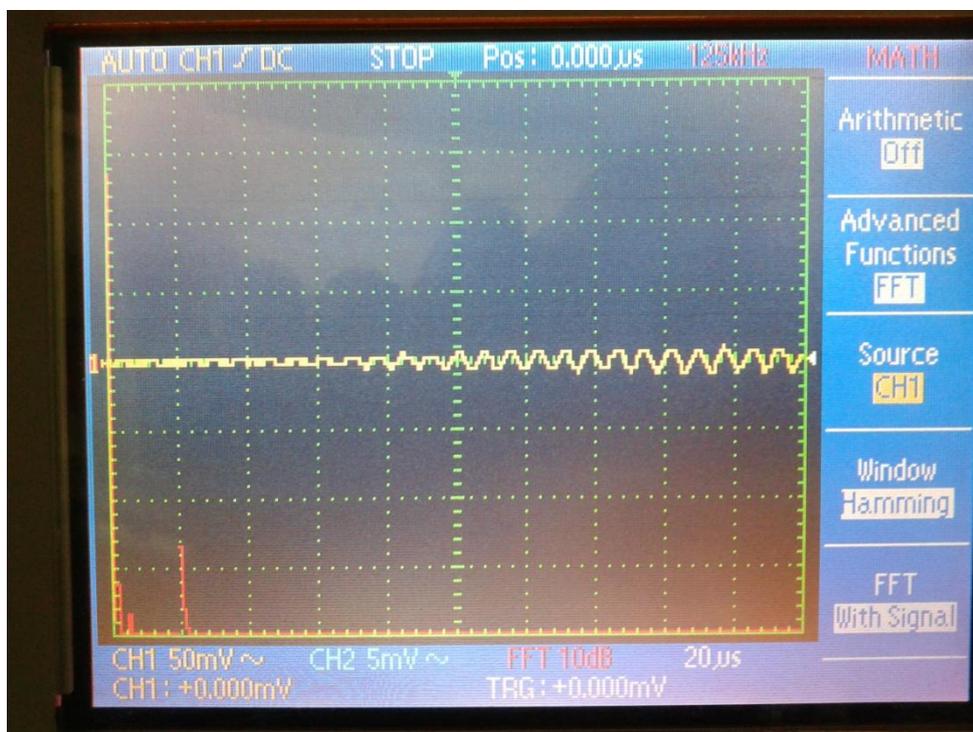


Figura 4.21: Pequena intensidade do sinal de saída no fotodetector quando a ponta da fibra multimodo está apenas clivada.

4.3.2.2. Padrão de interferência típico obtido com o espelhamento da fibra multimodo com o bulbo de mercúrio

Neste teste foi feito o uso do espelhamento da ponta da fibra multimodo no bulbo de mercúrio para aumentar o ganho de reflexão em relação à potência que chega no fotodetector. Percebe-se, na Figura 4.22, nitidamente, um ganho de sensibilidade do sinal comparado ao obtido com o clivamento puro e simples da extremidade da fibra multimodo visto na seção 4.3.2.1. Este foi um resultado típico alcançado com o uso da fibra multimodo mais bulbo de mercúrio usando o alinhamento feito na máquina de posicionamento. O melhor resultado da ponta da fibra com bulbo de mercúrio será mostrado na seção 4.3.2.3. Na Figura 4.22, o padrão temporal de interferência já está bem definido. Nesta situação, o filtro passa-faixa está configurado na posição padrão, entre 70,7 KHz e 200 KHz. Há também a visualização do sinal juntamente com sua FFT, em 130 KHz, ora bem mais perceptível.

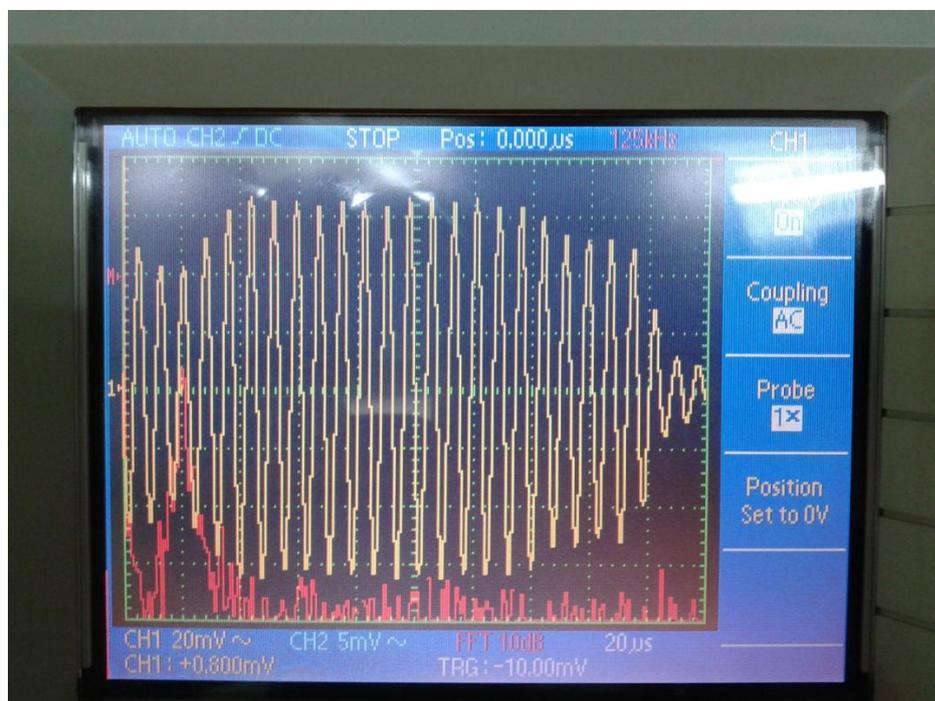


Figura 4.22: Aumento nítido no nível do sinal de saída do fotodetector quando há o espelhamento pelo bulbo de mercúrio.

4.3.2.3. Padrão de interferência otimizado obtido com o espelhamento da fibra multimodo com o bulbo de mercúrio.

Foram feitos dois testes em instantes diferentes, chamados aqui de t_1 e t_2 . Os resultados destes testes são mostrados nas Figuras 4.23 e 4.24.



Figura 4.23: Sinal de saída no fotodetector para o melhor espelhamento com o bulbo de mercúrio num instante de tempo t_1 .

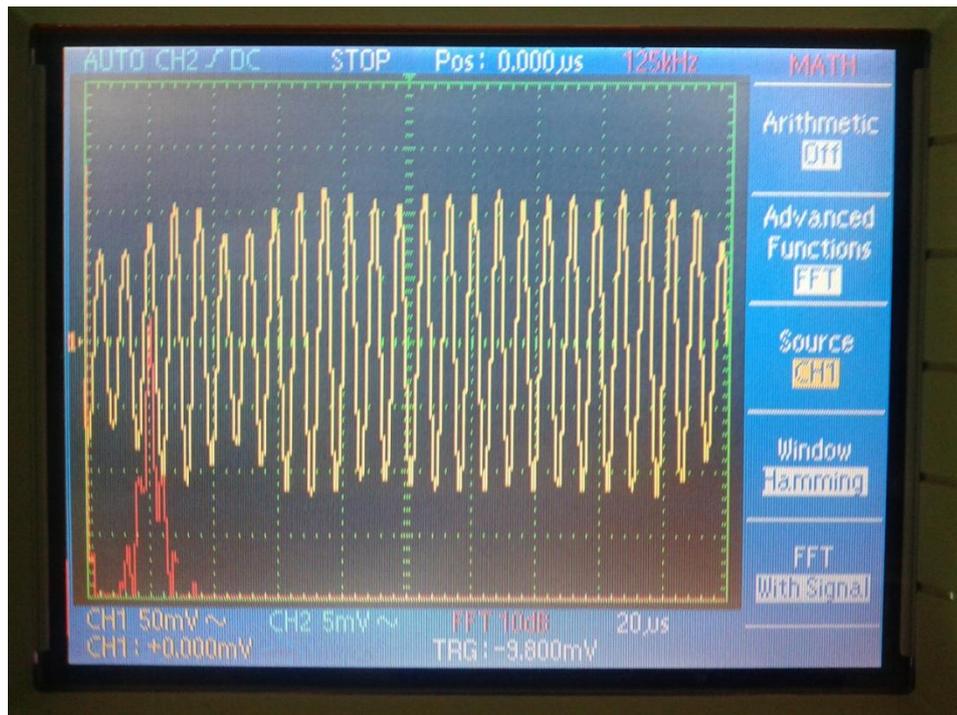


Figura 4.24: Sinal de saída no fotodetector para o melhor espelhamento com o bulbo de mercúrio num instante de tempo t_2 .

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram a visualização, no osciloscópio, de duas Figuras de interferência, em dois instantes, através do espelhamento provocado pelo acerto da fibra multimodo no bulbo de mercúrio de forma otimizada na máquina de posicionamento. Deslocamentos milimétricos verticais na máquina faziam com que a extremidade da fibra se aproximasse da base do bulbo de mercúrio. Foi preciso, então, ter um controle no ajuste deste interfaceamento para evitar o contato e assim, o desgaste da ponta da fibra multimodo clivada com o final do bulbo durante o posicionamento. Quanto mais preciso esse posicionamento, mais ganho de refletividade notávamos no osciloscópio. Para fixar a posição da fibra no bulbo, utiliza-se cola instantânea, como visto na figura 4.7. Nesta situação, consegue-se um sinal de saída mais elevado comparado a situações anteriores. Observando os valores das Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24, temos o comparativo na tabela abaixo:

Tipo de Espelhamento	V_{pp} Máxima do Sinal de Interferência
Ponta da MMF apenas clivada	20 mV
Bulbo de mercúrio com padrão de interferência típico	130 mV
Bulbo de mercúrio com padrão de interferência otimizado	280 mV

Tabela 4.2: Tabela mostrando o ganho de sensibilidade obtido com o espelhamento através do bulbo de mercúrio.

Mais uma vez, esse sistema estava funcionando com o filtro passa-faixa entre 70,7 KHz e 200 KHz, o que possibilita a visualização, no osciloscópio, do sinal FFT de forma bem forte em 130 KHz. Assim, a emulação na bancada da emissão de descargas parciais por uma máquina elétrica defeituosa, através de um gerador de sinais que excitava uma cerâmica piezoelétrica na frequência de vibração do ultrassom de 130 KHz, mostrou-se bem sucedida.

Retornando às Figuras 4.23 e 4.24, devido à instabilidade de fase do interferograma da figura 3.15, quando a D_{in} (equação 3.40) é aplicada, a mesma recai aleatoriamente em vários pontos da função de transferência da Figura 3.15 ao longo do tempo. Neste momento, há o filtro passa-faixa de largura de banda entre 70,7 KHz e 200 KHz que permite que se transmita apenas a frequência fundamental de 130 KHz. Assim, tem-se, em t_1 , na Figura 4.23, um $S_m(t)$ em que se pode visualizar um instante onde D_{in} modula tanto parte da região linear da FT, onde nota-se um aumento da amplitude do sinal, quanto parte da região não-linear da FT, onde nota-se uma diminuição da amplitude do sinal em 130 KHz.

Já na Figura 4.24, noutro instante de tempo t_2 , também tomado de forma aleatória, pode-se visualizar no osciloscópio um $S_m(t)$ onde D_{in} modula a FT na região linear durante praticamente todo o intervalo de tempo, já que não há a queda no nível de sinal da frequência fundamental em 130 KHz, única até então habilitada a passar pelo filtro passa-faixa.

Nas Figuras 4.25, 4.26 e 4.27, a largura do filtro passa-faixa é aumentada para que haja a percepção das componentes harmônicas geradas pela equação 3.53. Na Figura 4.25, o filtro passa-faixa é regulado entre 70,7 KHz e 283 KHz. Habilita-se na saída, então, um $S_m(t)$ resultante do somatório das componentes em W_0 e $2W_0$, conforme pode ser visto pela presença das FFT's dos sinais em 130 KHz e no 2º harmônico, 260 KHz.

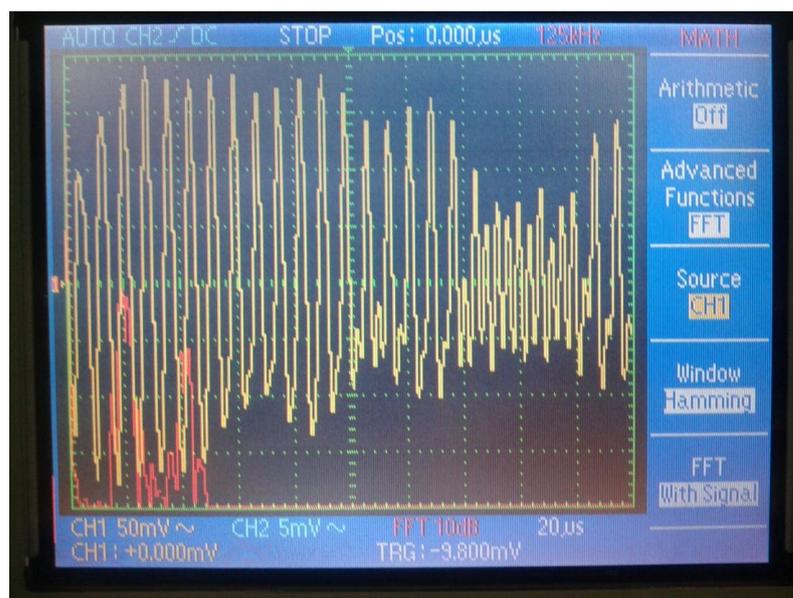


Figura 4.25: $S_m(t)$ e FFT quando o filtro passa-faixa está ajustado de 70,7 KHz a 283 KHz. Presença da FFT na frequência fundamental, em 130 KHz, e do 2º harmônico em 260 KHz.

Na Figura 4.26, o filtro passa-faixa é ajustado para 70,7 KHz e 400 KHz. O sinal modulado na saída passa a ser visualizado agora, com a componente fundamental, em 130 KHz (W_0), com a 2ª harmônica, em 260 KHz ($2W_0$) e com a 3ª harmônica, em 390 KHz ($3W_0$), conforme pode ser visto pelas FFT's.

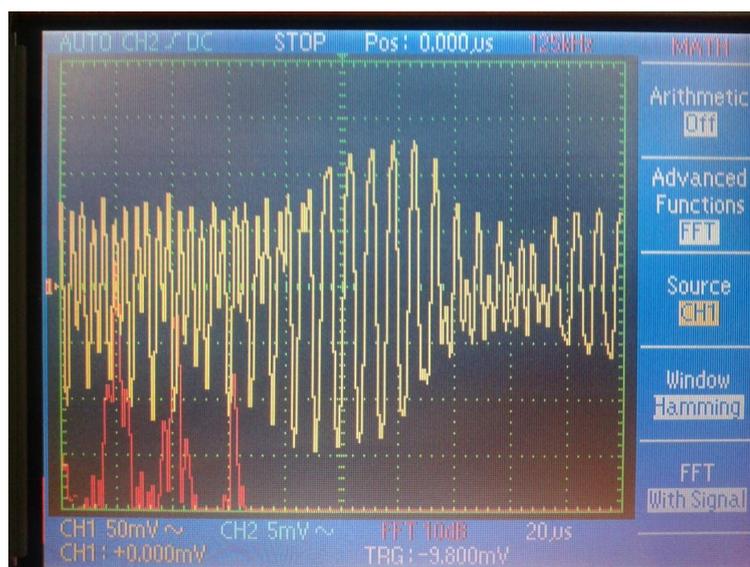


Figura 4.26: $S_m(t)$ e FFT quando o filtro passa-faixa está ajustado de 70,7 KHz a 400 KHz. Presença da FFT na frequência fundamental, em 130 KHz, do 2º harmônico em 260 KHz e do 3º harmônico em 390 KHz.

Já na Figura 4.27, a largura do filtro passa-faixa foi estendida de 70,7 KHz até 556 KHz. Pode-se visualizar agora, no osciloscópio, um $S_m(t)$ resultado da soma das componentes em W_0 , $2W_0$, $3W_0$ e $4W_0$ da equação 3.19, conforme pode ser observado pela presença das FFT's dos sinais em 130 KHz, 260 KHz, 390 KHz e 520 KHz, 1º, 2º, 3º e 4º harmônicos, respectivamente.

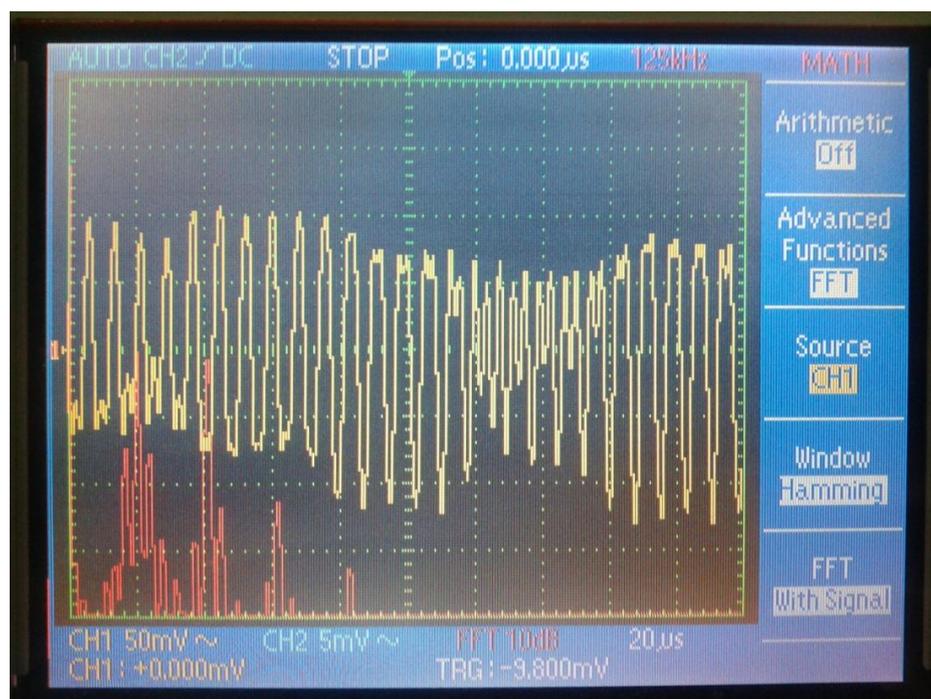


Figura 4.27: $S_m(t)$ e FFT quando o filtro passa-faixa está ajustado de 70,7 KHz a 556 KHz. Presença da FFT na frequência fundamental, em 130 KHz, do 2º harmônico em 260 KHz e do 3º harmônico em 390 KHz e do 4º harmônico, em 520 KHz.

Enfim, baseado nos resultados da tabela 4.2, foi escolhido o trecho de fibra multimodo mais bulbo de mercúrio que iríamos utilizar na cabeça sensora do interferômetro multimodal: aquele cujo padrão de interferência para o espelhamento do sinal com bulbo de mercúrio mostrou-se com sensibilidade elevada, ou seja, o padrão de interferência otimizado da seção 4.3.2.3. Assim, o próximo passo foi o encapsulamento do mesmo, que será visto na seção 4.4.

4.4.O Encapsulamento do interferômetro multimodal

4.4.1.Montagem do encapsulamento da região sensora

Após os resultados satisfatórios conseguidos com o protótipo do sensor MMI montado na bancada vistos na seção 4.3.2.3, a próxima etapa foi encapsular a região sensora do interferômetro para que o mesmo pudesse ser levado para os testes de campo.

Começamos preparando o invólucro metálico da região sensora do interferômetro. A geometria dessa envoltória é de um paralelepípedo com uma abertura circular em uma das suas bases maiores para o encaixe de um disco magnético de neodímio, como mostram as Figuras 4.28 a 4.31. Esse disco magnético irá se acoplar na última etapa da montagem do projeto, como mostra a Figura 4.32. Antes, tivemos que trabalhar nas duas tampas do conjunto metálico.

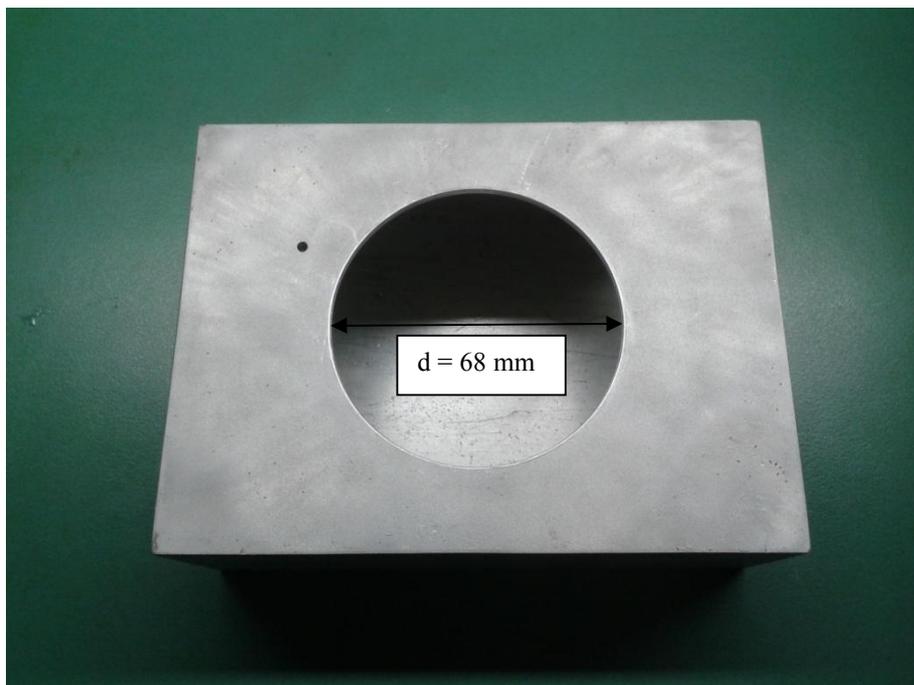


Figura 4.28: Vista superior da envoltória metálica do encapsulamento com o orifício para o disco magnético.

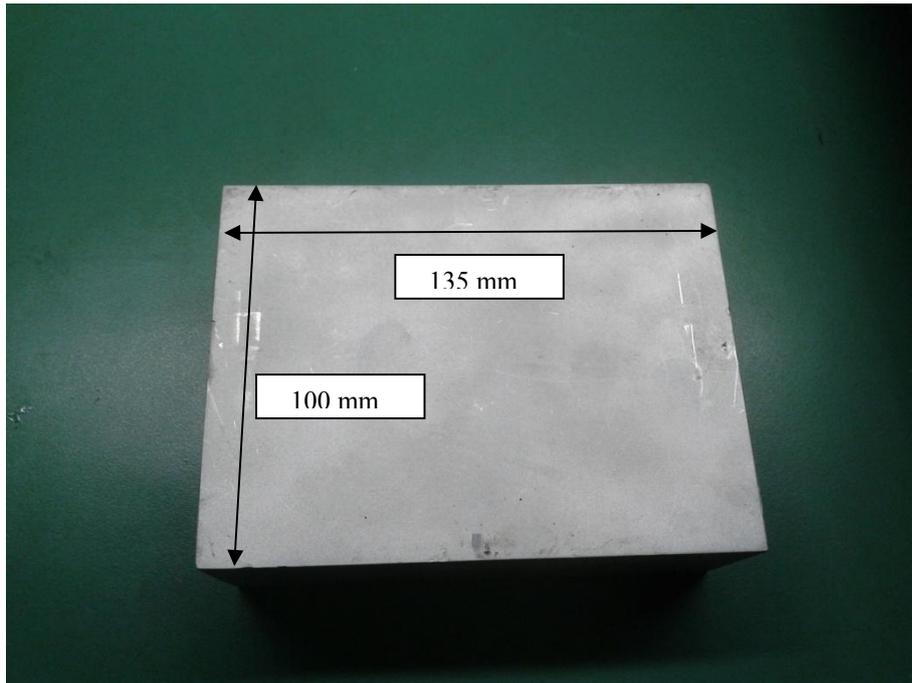


Figura 4.29: Vista inferior da envoltória metálica do encapsulamento.



Figura 4.30: Vista lateral da envoltória metálica do encapsulamento.

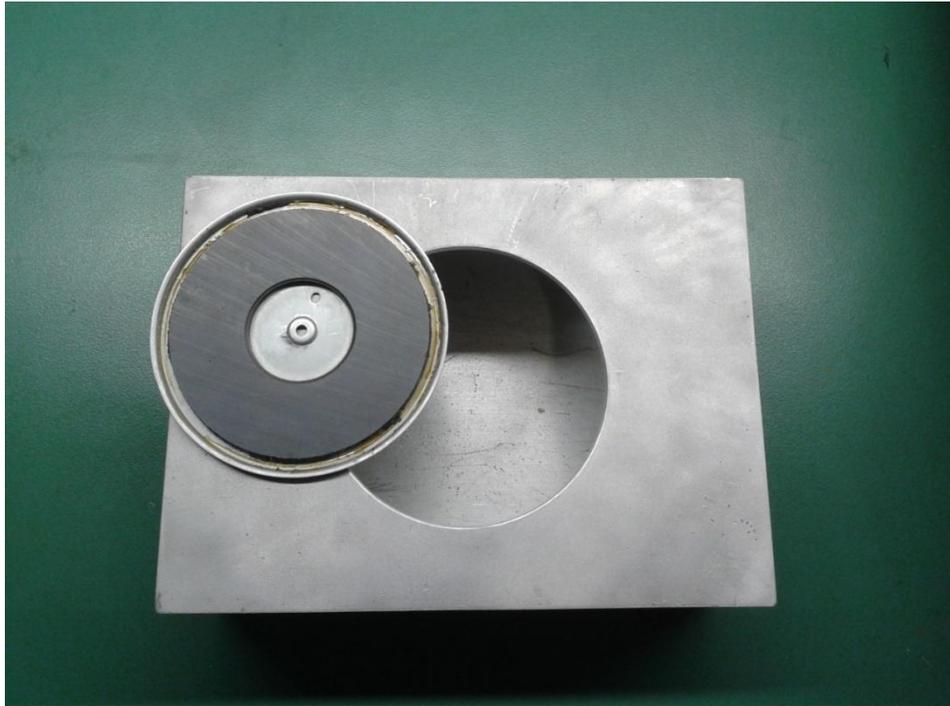


Figura 4.31: Vista superior da envoltória metálica do encapsulamento com o disco magnético para encaixe.

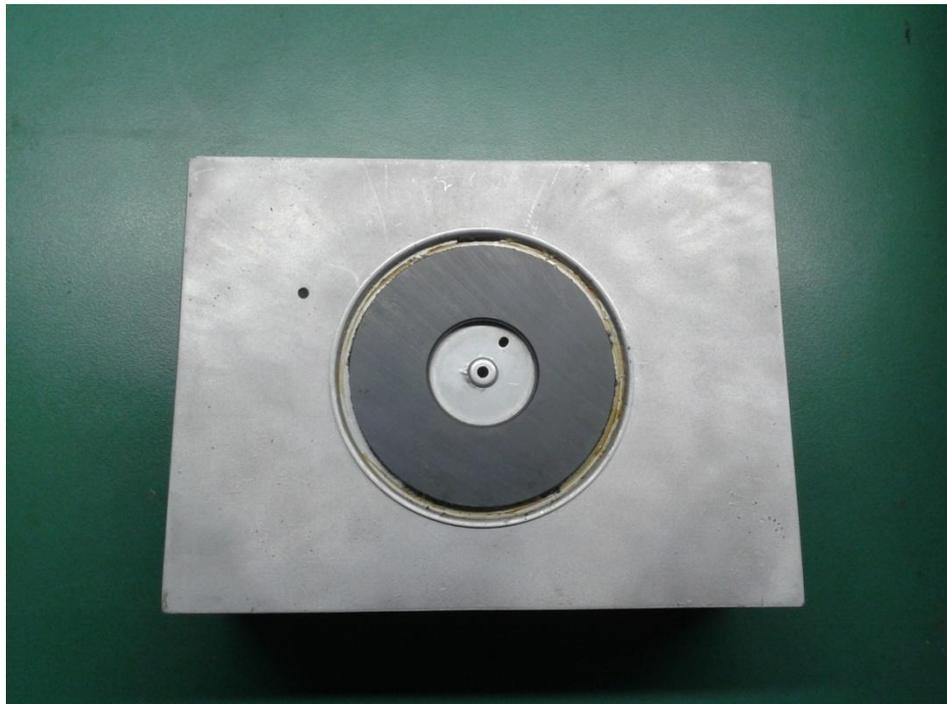


Figura 4.32: Vista superior da envoltória metálica do encapsulamento com o disco magnético já encaixado.

Uma das tampas foi fechada e fixada com a ajuda de 4 parafusos nas bordas, como mostram as Figuras 4.33 e 4.34. Os quatro suportes metálicos para o rosqueamento dos parafusos foram presos com resina epóxi. A fixação dos parafusos nos suportes metálicos é mostrada na Figura 4.35.

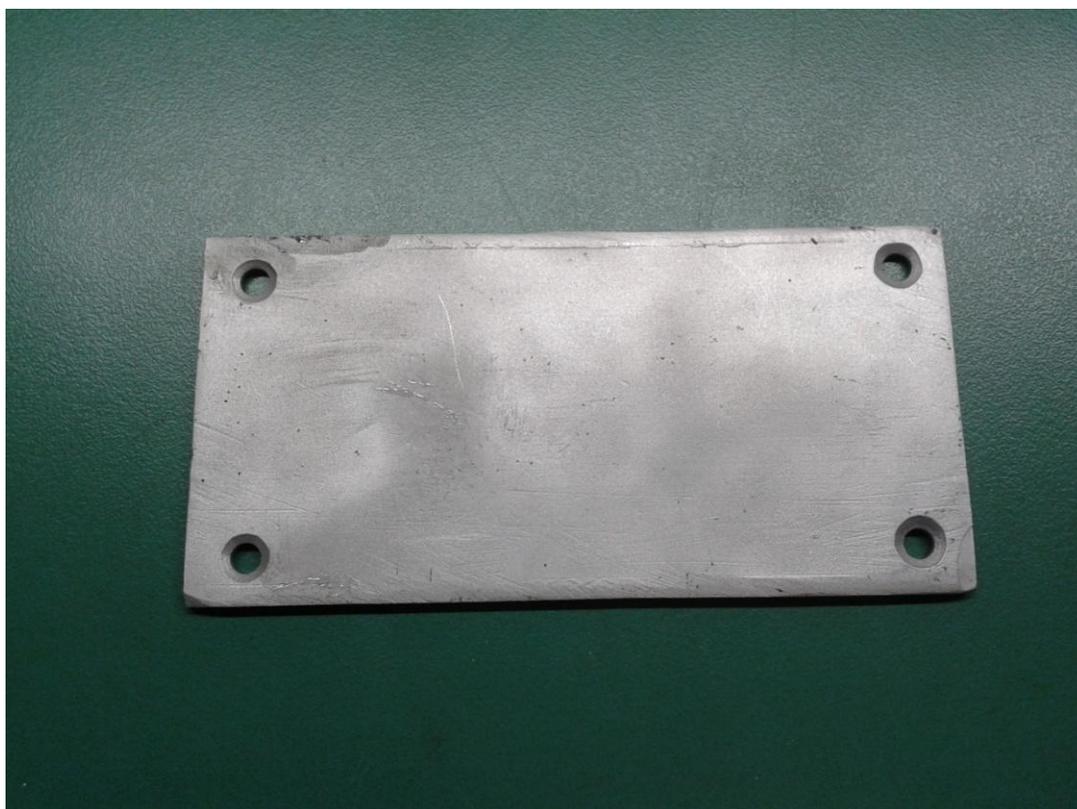


Figura 4.33: Uma das tampas para fechamento com a perfuração nas bordas para a passagem dos parafusos.



Figura 4.34: Exemplo da colagem de 2 suportes metálicos para rosqueamento dos parafusos com resina epóxi.

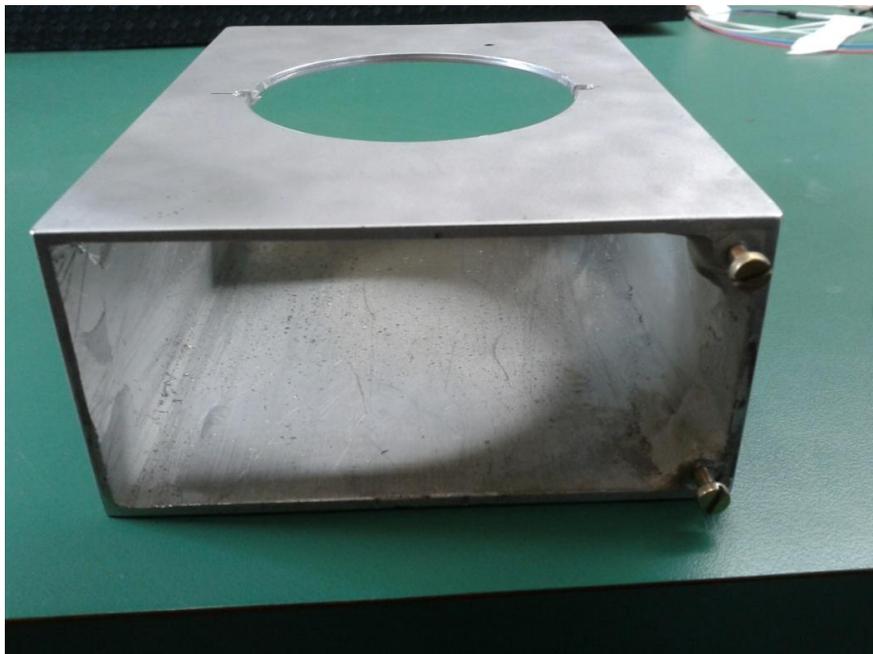


Figura 4.35: Fixação dos parafusos nos suportes metálicos.

Na outra tampa do encapsulamento tínhamos que fazer o mesmo processo anterior para a fixação dos parafusos. Porém, agora, tínhamos que inserir nessa tampa mais 5 orifícios : um central para a fixação de um adaptador FC (Figura 4.36), e mais quatro, como mostra a Figura 4.37. Esses últimos serviram para prender uma placa interna na caixa metálica. Essa placa de dentro do invólucro tem como objetivo dar suporte físico ao restante do cabo pigtail resultante da emenda da fibra monomodo com a fibra multimodo, que é a parte chave do sensor multimodal interferométrico.



Figura 4.36: Adaptador FC para fixação em uma das tampas do invólucro.



Figura 4.37: Tampa com 5 orifícios para fixação de componentes, além dos 4 para a fixação da tampa.

Para a confecção dessa placa interna, reaproveitamos uma placa de rede usada em computador estilo desktop, mostrado na Figura 4.38. Para que o conjunto coubesse dentro do encapsulamento, foi necessário fazer o corte da placa metálica nas regiões hachuradas, mostrada na Figura 4.38.

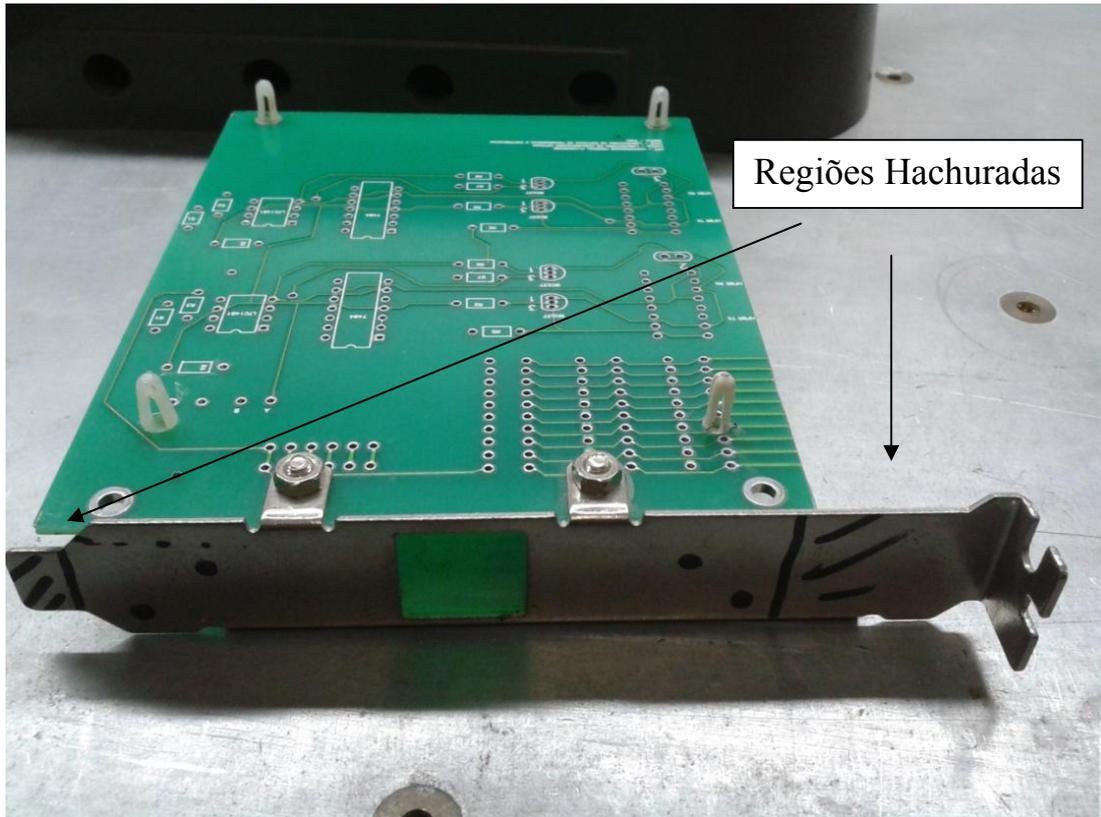


Figura 4.38: Reaproveitamento da placa de fenolite e da tampa metálica da placa de rede para confecção da placa de suporte do pigtail monomodo.

Também foi preciso fazer os furos para a fixação da placa da Figura 4.38 na tampa lateral, para o fechamento do encapsulamento metálico. Para isso, utilizamos a própria maquinaria presente no LACOP, como furadeira, como mostrado na Figura 4.39. Utilizamos a mesma ferramenta para furar mais quatro pequenos orifícios próximos das extremidades da placa de fenolite, com a intenção de acoplar 4 prendedores plásticos. Estes seriam o suporte para o acomodamento do excesso de pigtail monomodo. A peça resultante dessas alterações é mostrada em detalhes nas Figuras 3.40 e 4.41.



Figura 4.39: Furadeira presente no LACOP sendo utilizada para a confecção dos furos na tampa lateral.

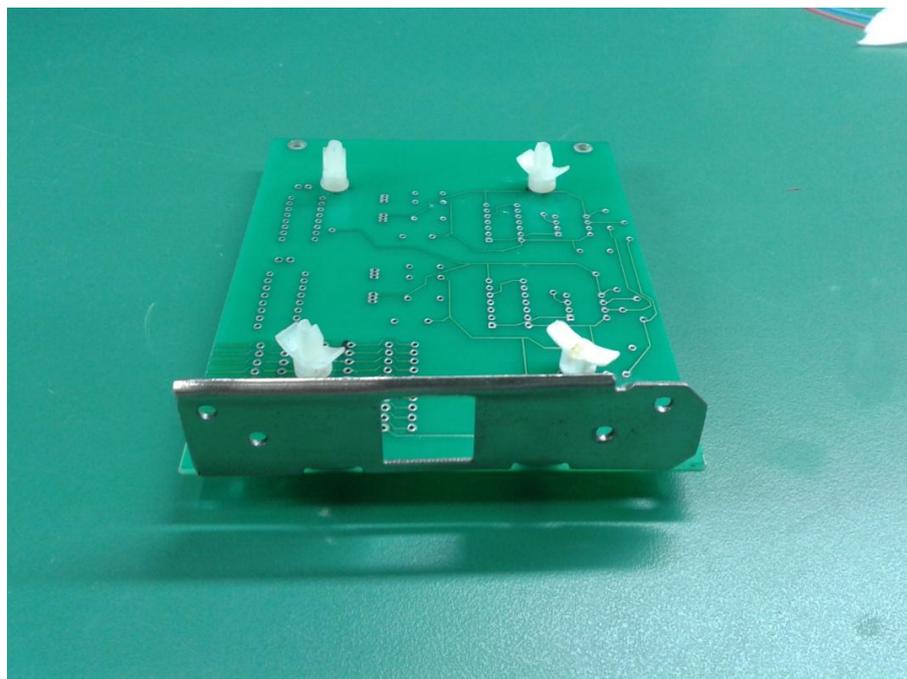


Figura 4.40: Vista superior frontal da placa de suporte do pigtail monomodo.

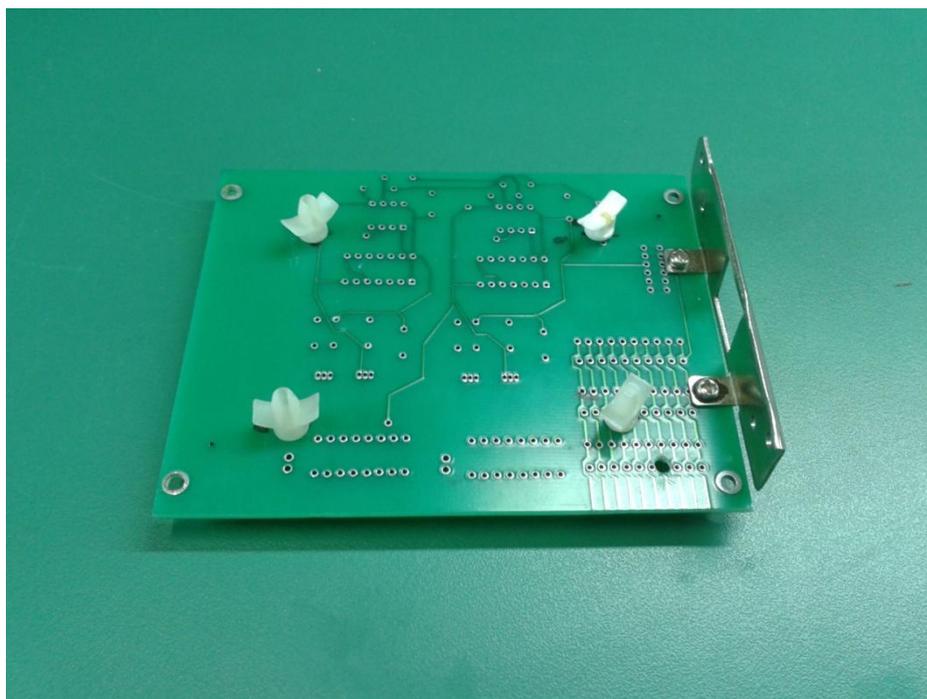


Figura 4.41: Vista superior lateral da placa de suporte do pigtail monomodo.

Partiu-se, então, para o encaixe do adaptador FC/FC na tampa metálica lateral, visto na Figura 4.42, respeitando o alinhamento com a placa de suporte do pigtail, visto na Figura 4.41. Fixamos a placa de suporte com a tampa lateral, conforme pode ser visto na Figura 4.43.

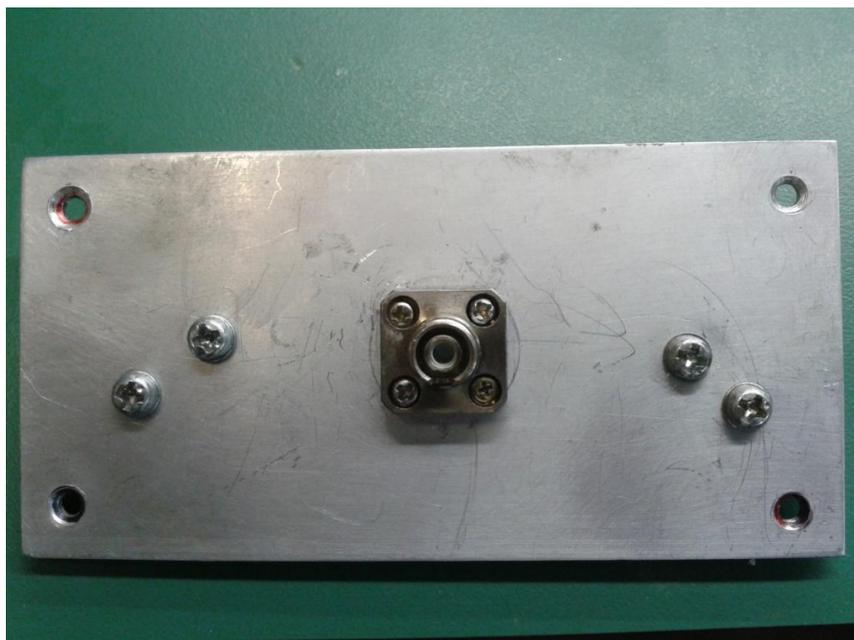


Figura 4.42: Adaptador FC encaixado na tampa lateral.

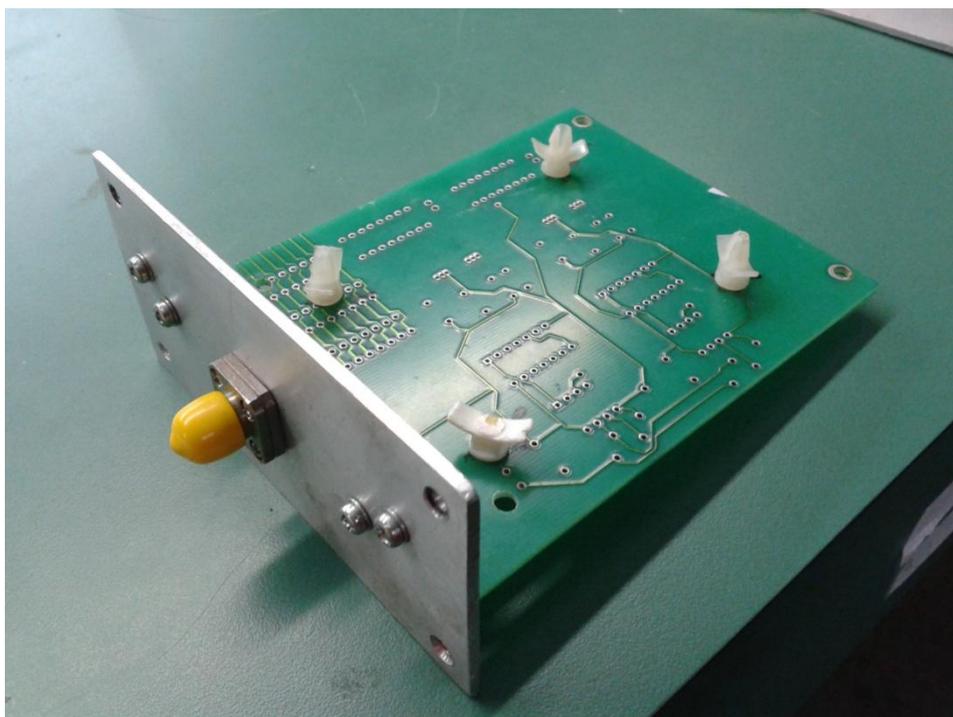


Figura 4.43: Placa de suporte do pigtail conectada à tampa já com a presença do adaptador.

Depois de fazer toda a estrutura mecânica do encapsulamento, deixamos por final a fração mais sensível da montagem: trazer a cabeça sensora do dispositivo, ou seja, a parte da fibra multimodo sensível à vibração mecânica, espelhada na ponta pelo bulbo de mercúrio, junto com o pigtail monomodo, para a montagem (Figura 4.20). Entre elas está a emenda responsável pelo fenômeno da interferência multimodal. Toda essa parte foi retirada do protótipo do interferômetro multimodal feito na bancada. O primeiro objetivo foi utilizar a maior quantidade possível do comprimento da fibra multimodo, que foi instalada na parte traseira do disco magnético acoplado à carcaça metálica do sensor, visualizado nas Figuras 4.44 e 4.45.



Figura 4.44: Parte frontal do disco magnético que foi acoplado à carcaça metálica do sensor interferométrico multimodal.



Figura 4.45: Parte traseira do disco magnético que foi acoplado à carcaça metálica do sensor interferométrico multimodal.

A forma de utilizar uma maior quantidade de fibra multimodo foi espiralar aproximadamente 1,5 m de fibra multimodo na parte traseira do disco magnético, em aproximadamente 15 voltas. Com isso, a intenção era que a parte magnetizada do encapsulamento, colado ao corpo da máquina elétrica defeituosa, transfira para a fibra multimodo aderida atrás do disco, os sinais de vibração nas frequências de ultrassom características emitidas pelas descargas parciais.

Como já mencionamos, esse processo de aderência da fibra por trás do disco magnético requereu muita técnica e atenção, pois só dispúnhamos de uma peça magnética para a construção do protótipo e, além disso, o trecho a ser colado vinha junto, numa ponta, com o bulbo de mercúrio responsável pelo espelhamento do sinal e na outra extremidade pelo conector FC, passando pela emenda de ligação entre a fibra multimodo e o pigtail monomodo, onde ocorre o fenômeno da interferência multimodal. Trabalhando com a máquina de posicionamento para fixação da ponta da fibra multimodo no bulbo de mercúrio, esse trecho foi aquele que obteve-se o melhor resultado com o espelhamento, apresentando mais alta sensibilidade, como visto na seção 4.3.2.3. Assim, uma falha nesse procedimento de colagem da fibra multimodo no disco magnético comprometeria todo o trabalho de ajuste na máquina de posicionamento para dar um maior ganho de visibilidade para as franjas de interferência. Esta falha, que se traduziria na confecção de uma emenda, além de provocar uma queda de intensidade no valor da visibilidade ν , seria um obstáculo para a disposição circular da fibra multimodo no disco magnético.

Tínhamos que encontrar uma maneira de ir colando a fibra no disco metálico, com um maior número de voltas para aumentar a região sensível do dispositivo. Resolvemos usar plasticina para prender a fibra sobre o disco em disposições circulares, pois após a colagem a massa de modelar podia ser facilmente retirada, sem romper a fibra. Começamos a colar a fibra multimodo no disco a partir de 1/3 do seu comprimento vindo da sua emenda com a fibra monomodo, pois tínhamos que dar uma folga para a fibra multimodo para eventuais curvaturas dentro do encapsulamento. Assim, começamos a fazer o setup inicial com a massa de modelar, retendo a fibra a partir do centro do disco, como mostra a Figura 4.46 e enrolando a fibra em espiral no disco, com aproximadamente 0,5 cm de distância entre as fibras adjacentes, como mostram as Figuras 4.47, 4.48 e 4.49. O início do processo de dispor a fibra em espiral pelo centro do disco, e não começar pela parte externa da placa, explica-se pelo fato que na outra ponta da fibra, a extremidade da fibra multimodo espelhada pelo bulbo de mercúrio, não podia fazer curvatura acentuada, pelo risco de romper. Portanto, com essa configuração de colagem da fibra, a posição do bulbo de mercúrio (a parte final do enrolamento), ficou na extremidade do disco, numa posição em que o bulbo e a fibra multimodo estão numa mesma direção, sem curvatura e sem risco de rompimento do conjunto, como mostra a Figura 4.48.

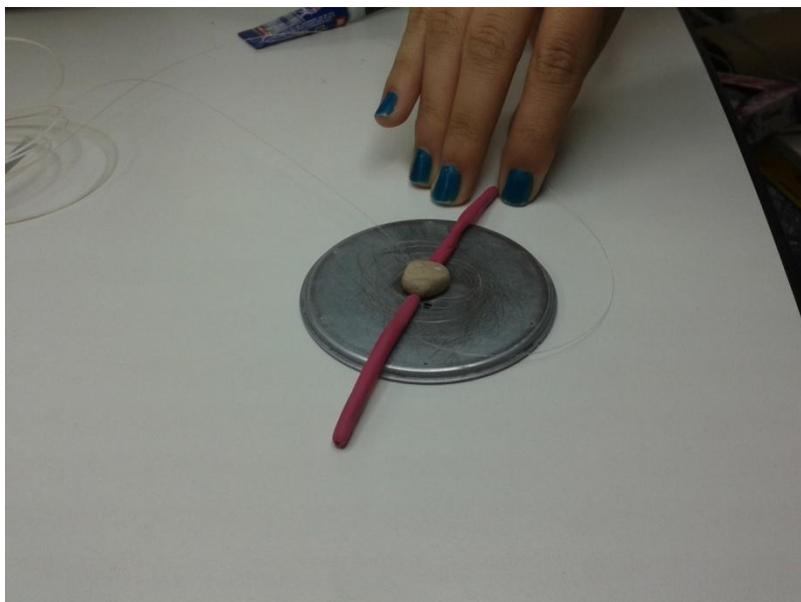


Figura 4.46: Começo da fixação da fibra multimodo a partir do centro do disco metálico.

Além do mais, no centro do disco há um orifício para a fixação de um parafuso que prende o disco magnético à carcaça do encapsulamento. A colocação desse parafuso poderia quebrar o bulbo de mercúrio caso esse fosse situado no centro da placa. Isto corroborou ainda mais com a nossa decisão de posicionar o bulbo para a parte extrema do disco. Para fazermos as circunferências concêntricas de raios maiores, fomos levantando a massa de modelar do centro para as pontas até chegarmos às configurações mostradas nas Figuras 4.47 e 4.48, onde tivemos que deixar um espaço reservado na lateral do disco para a colagem do bulbo de mercúrio. Na Figura 4.48 está com o esboço pronto, fixado apenas pela massa de modelar, apto para ser colado. Para chegar nessa configuração, muito esforço e paciência foram compreendidos e várias circunferências tiveram que ser redesenhadas.



Figura 4.47: Esboço da colagem da fibra com o espaçamento na extremidade do disco para a fixação do bulbo.

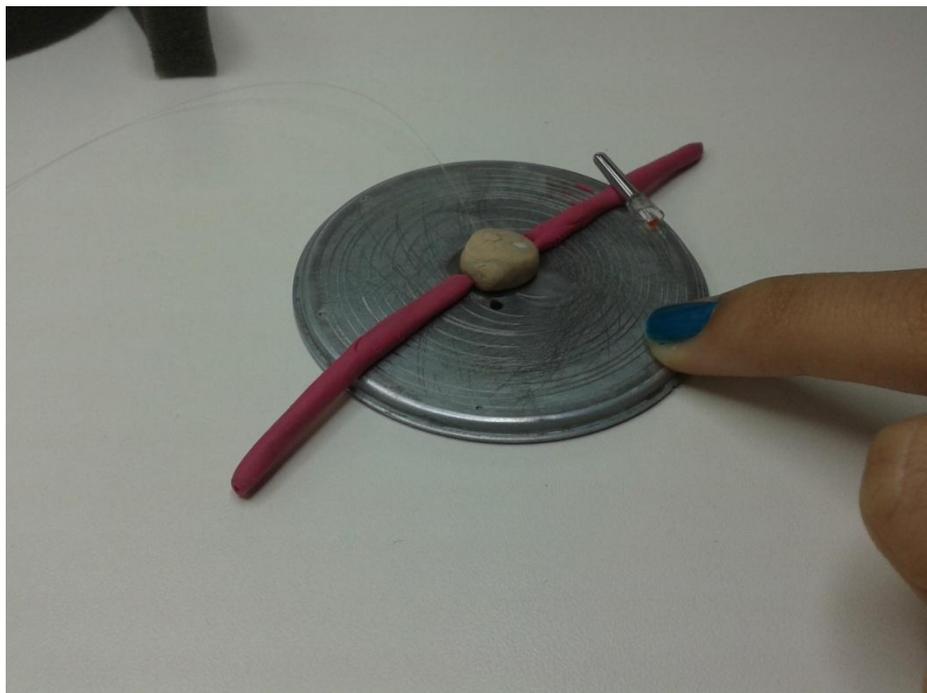


Figura 4.48: Configuração da fibra multimodo espiralada com o bulbo pronta para ser colada no disco magnético.

Com a fibra multimodo disposta em forma de espiral, usamos cianoacrilato líquido, conhecido popularmente como cola instantânea, conforme pode ser visto na Figura 4.49, com a ajuda de uma haste flexível com algodão na ponta para aderir a fibra ao disco metálico. Para prender o bulbo de mercúrio, usamos resina epóxi líquida, pois além de ter plasticidade, essa tomava a forma do bulbo, permitindo um processo de colagem mais eficiente e menos agressivo do que comparado a resina epóxi sólida. Esta necessitaria de esforço para aderência no corpo de vidro do bulbo, o que não era recomendável pelo risco de quebra. Por fim, deixamos o conjunto secando à temperatura ambiente, protegido contra choques e poeira por um dia.



Figura 4.49: Fibra espiralada no disco metálico secando, protegida contra choques com a ajuda de uma espuma.

Faltava agora, então, acoplar todas as partes feitas em separado para montar e enfim, fechar a estrutura do encapsulamento do sensor interferométrico multimodal. Juntamos a carcaça metálica ao disco magnético, conforme vê-se na Figura 4.50. A parte do ímã do disco ficou externamente ao encapsulamento, pois esta se fixará à máquina elétrica no futuro teste de campo. Podemos observar na Figura 4.50, então, a parte interna do disco magnético, a região metálica, onde foram colados a

fibra multimodo e o bulbo de mercúrio, um trecho de fibra multimodo livre, a emenda da fibra multimodo com a fibra monomodo e o conector FC.



Figura 4.50: Disco magnético ajustado na carcaça metálica do encapsulamento.

Foi juntada, então, a placa de suporte do pigtail monomodo conectado à tampa metálica lateral já com a presença do adaptador FC/FC, como mostra a figura 4.51. A disposição das quatro alças plásticas, mostrada na Figura 4.43, para a circulação do pigtail monomodo, foram em 4 pontos das diagonais do formato retangular da placa de fenolite. Cada perfuração para colocação da presilha tinha aproximadamente 3 cm de distância para cada canto da placa, na direção diagonal. A intenção da colocação das presilhas desse modo foi aumentar o máximo possível o raio de curvatura para o enrolamento do trecho de fibra monomodo, para que não houvesse atenuação do sinal por curvatura acentuada em algum dos cantos da placa, conforme pode ser visto na Figura 4.51. O ideal para que essa atenuação não ocorra é que esse raio de curvatura seja maior ou igual a 1 centímetro. Para finalizar, foi feito o encaixe do conector FC no seu adaptador FC/FC da tampa. Poderíamos fazer esse encaixe no adaptador com o pigtail monomodo todo enrolado nas 4 alças na última volta. Porém, para evitar uma curvatura acentuada da fibra com o adaptador FC, que faria praticamente um ângulo de 90° , preferimos dar uma folga ao enrolamento e guiar a fibra monomodo de uma alça plástica mais distante para o adaptador FC, diminuindo assim sensivelmente o ângulo de inclinação da fibra com o adaptador FC, conforme pode ser visualizado na Figura 4.51.

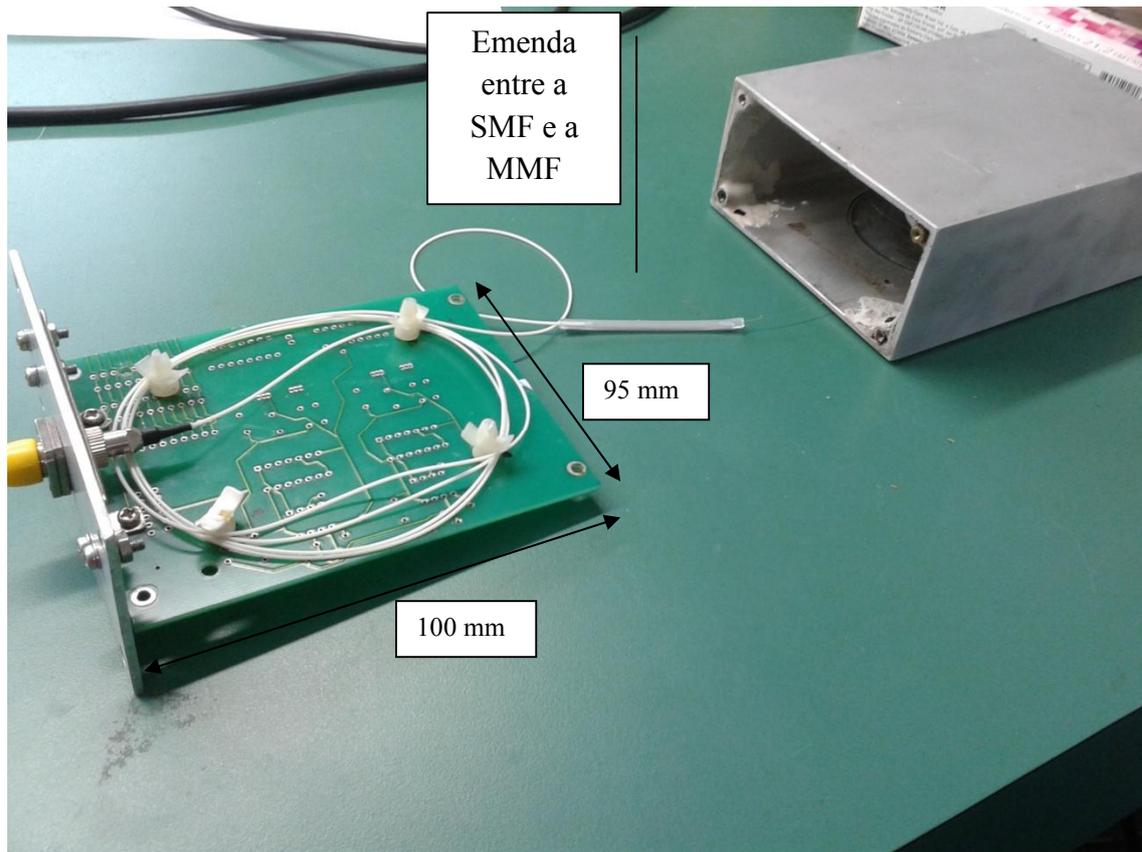


Figura 4.51: Pigtail monomodo já moldado pelas presilhas plásticas em formato circular.

Esses detalhes construtivos podem parecer insignificantes à primeira vista, mas são muito importantes quando trabalhamos em Comunicações Ópticas, pois a perda de potência por curvatura na fibra óptica poderia comprometer todo o esforço anterior de aumento de visibilidade das franjas. Antes de colocarmos a placa de suporte do pigtail para dentro do encapsulamento, prendemos o disco magnético na estrutura metálica, para que o mesmo não ficasse solto. Fizemos isso com a ajuda de uma alça metálica interna ao encapsulamento e de um parafuso que extravasa tanto o disco quanto a alça. A alça possui um rosqueamento interno para o parafuso ser dirigido, a partir de fora da estrutura, como mostra a Figura 4.52.



Figura 4.52: Alça metálica para fixação do disco magnético à carcaça metálica.

Internamente, a alça ficou com aproximadamente $1/3$ da altura da estrutura metálica. O comprimento restante, $2/3$ do total, foi suficiente para acomodação da placa de suporte do pigtail monomodo, como mostra a Figura 4.53. Restou então, para finalizar o encapsulamento da cabeça sensora do interferômetro multimodal, parafusar os oito parafusos das tampas laterais, sendo quatro de cada lado. Colocamos, depois, uma proteção no conector FC para que o mesmo não fosse contaminado com poeira. As Figuras 4.54 e 4.55 mostram o aspecto final do encapsulamento da cabeça sensora do sensor MMI para detecção de descargas parciais.



Figura 4.53: Alça metálica para fixação do disco magnético e placa de suporte do pigtail monomodo ajustados dentro da carcaça metálica.

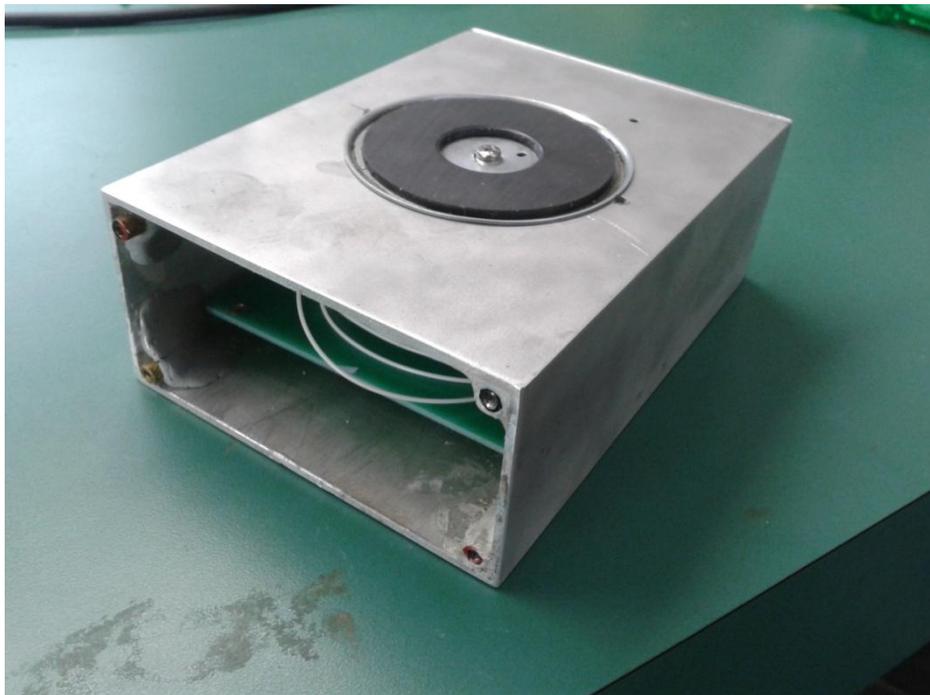


Figura 4.54: Uma tampa já colocada.

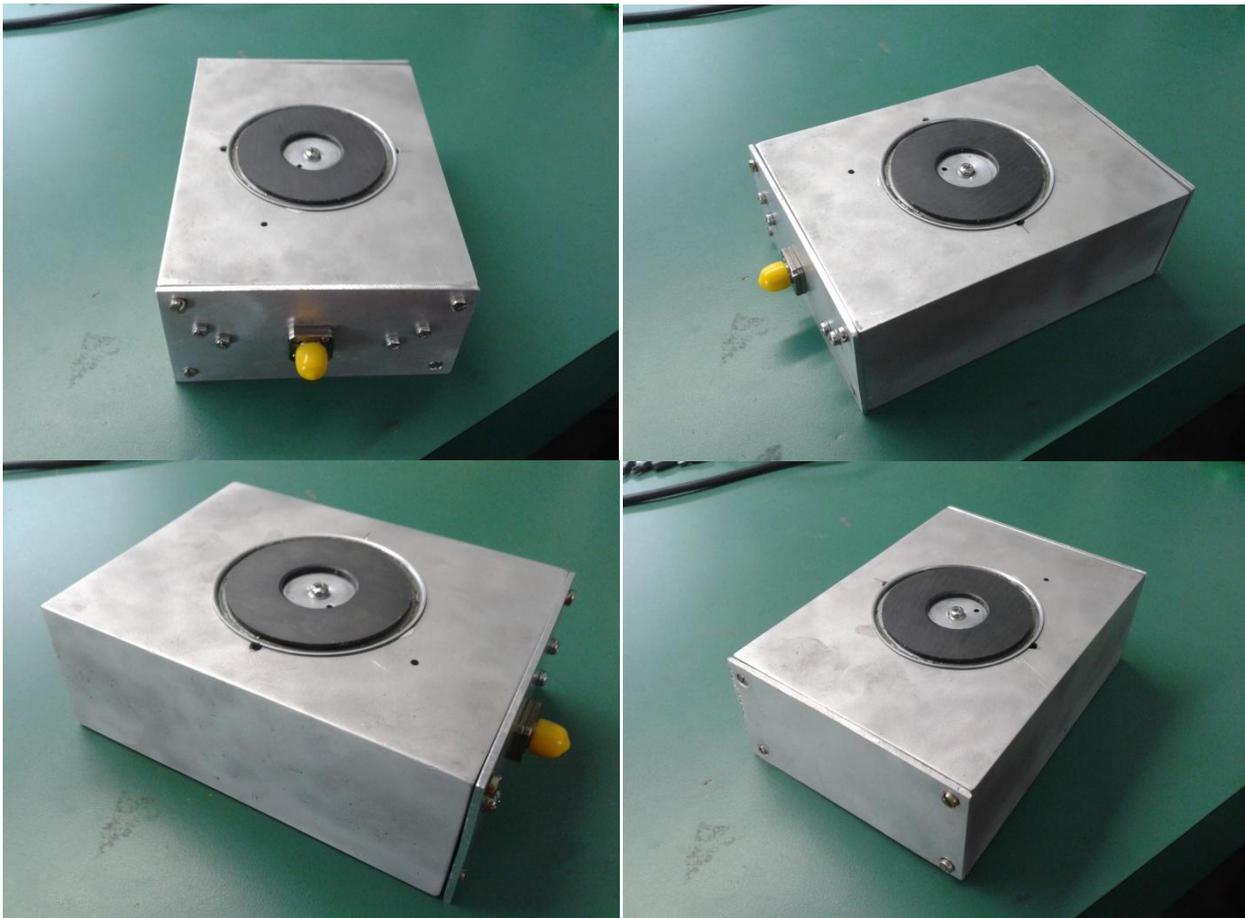


Figura 4.55: Diferentes perfis do encapsulamento da cabeça sensora do interferômetro multimodal .

5. Resultados com o encapsulamento do interferômetro multimodal nas condições dos testes de campo

5.1. Condições dos testes de campo

Com o encapsulamento da cabeça sensora pronto, esta parte já estava em condições para ser fixada numa máquina elétrica a ser analisada em campo. Tínhamos que pensar, agora, nas condições que o teste de campo seria realizado. Devido ao elevado nível de voltagem das linhas de transmissão, os equipamentos elétricos do interferômetro multimodal, como o LASER, o gerador de sinais, o filtro e o osciloscópio, tinham que ficar protegidos contra esses altos ruídos eletromagnéticos externos. Então, todos eles iriam ser levados para uma sala, distante aproximadamente 100 m da máquina elétrica a ser monitorada. Assim, necessitaríamos de um cabo óptico ligando a saída do acoplador, na sala de equipamentos, até o encapsulamento fixado na máquina elétrica, como esquematizado na Figura 5.1.

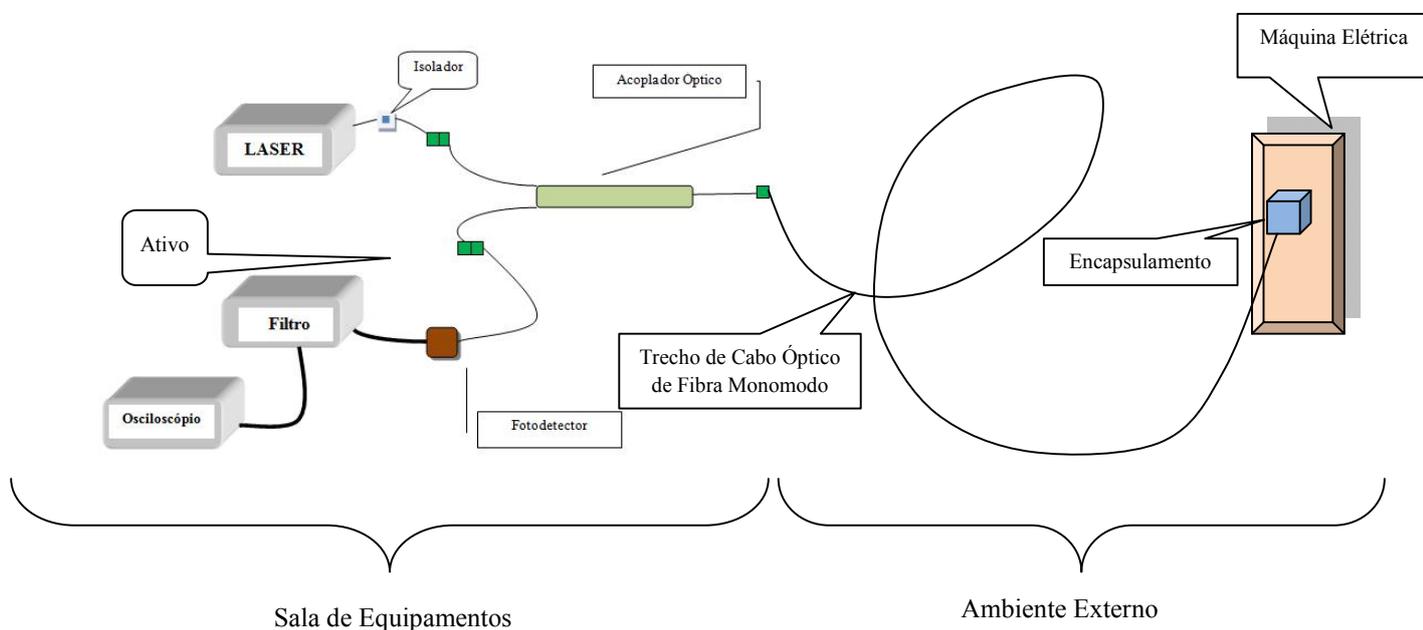


Figura 5.1: Configuração para testes de campo.

Emulamos tal situação, no laboratório, através de uma bobina de cabo óptico de 110 m aproximadamente, Figura 5.2. Esta bobina era composta de 4 fibras monomodo com conexão FC nas suas extremidades. Testamos as 4 fibras nesta configuração, mas a relação sinal/ruído com o

melhor desses 4 guias na configuração mostrada na Figura 5.1 não foi muito satisfatória, conforme pode ser visto pela Figura de interferência com franjas de pequenas amplitudes, visto na Figura 4.3, onde obtemos uma relação sinal/ruído praticamente $S/R = 1$. Isto aconteceu apesar de testarmos a integridade das 4 fibras monomodo com um medidor de potência óptica, limpamos e testamos as conexões FC novamente e de outra modificação que fizemos: substituir o filtro passivo por um filtro ativo centrado em 130 KHz. As vantagens do uso desse filtro são a presença de uma pré-amplificação do sinal e suas dimensões compactadas, por exemplo, comparadas com o outro módulo (Figura 4.16), propícias para serem transportadas até o teste de campo, como mostra a Figura 5.4.



Figura 5.2: Vista superior da bobina de cabo óptico contendo 4 fibras monomodo com saídas FC.

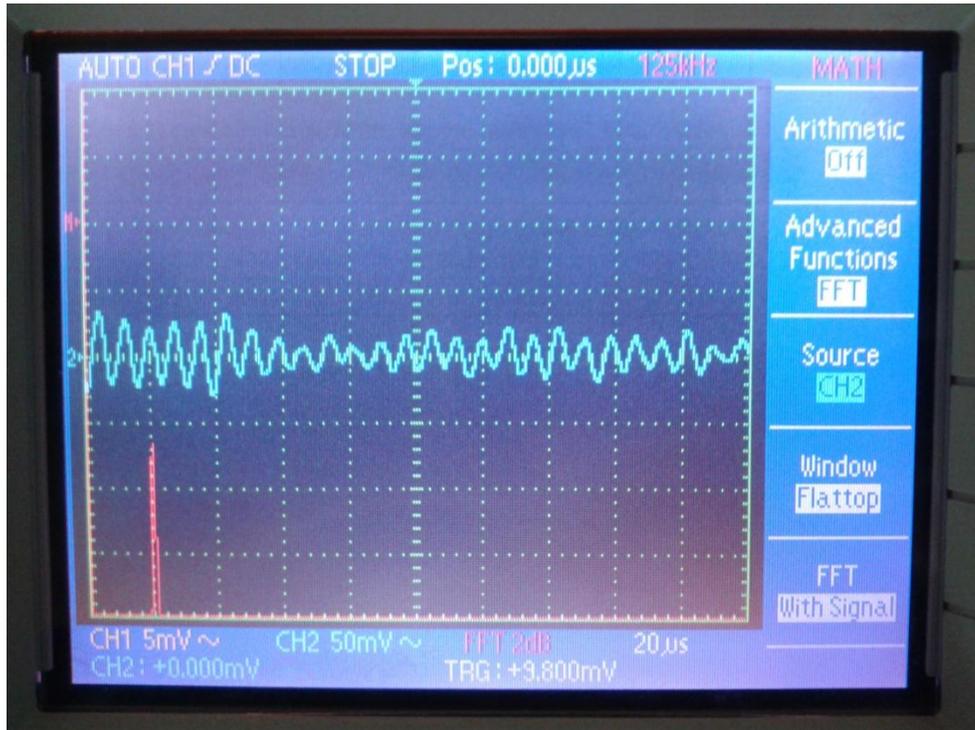


Figura 5.3: Figura de interferência de baixa magnitude quando um trecho de 110 m de fibra monomodo é ligado do encapsulamento à saída do acoplador.

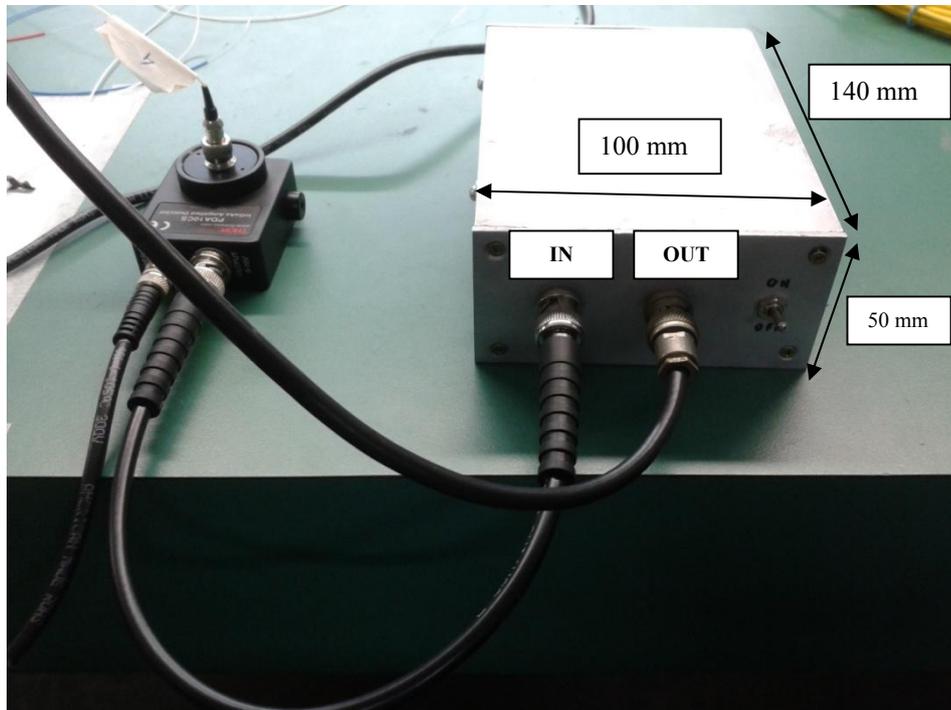


Figura 5.4: Filtro ativo com sua entrada ligada ao fotodetector e sua saída conectada ao osciloscópio.

Foi pensada, então, a seguinte solução: levar o acoplador óptico, que também é imune à interferência eletromagnética, para fora da sala de equipamentos, próximo do encapsulamento. A idéia era transportar o acoplador óptico com as mesmas características e estrutura, e somente encapsulá-lo.

Para isso, teríamos que usar 2 fibras da bobina, cada uma com 110 m: uma faria a ligação óptica entre a saída do LASER e a entrada do acoplador e a outra faria a junção entre saída do acoplador e a entrada do fotodetector, fazendo com que o acoplador óptico pudesse ser deslocado, conforme Figura 5.5. Entre o encapsulamento e o acoplador óptico, agora, foi utilizado um cabo monomodo de aproximadamente 3m. Assim, foi preciso fazer uma estrutura para que o acoplador óptico ficasse em ambiente externo. Essa construção precisava ter as mesmas três saídas FC do acoplador original, cada uma direcionada para o dispositivo correto.

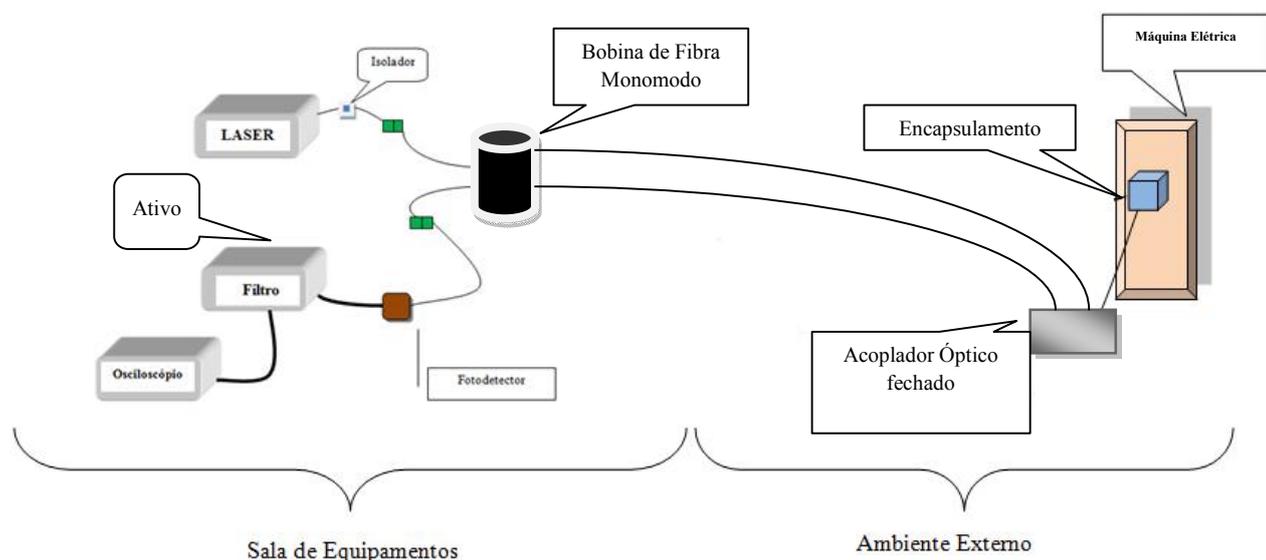


Figura 5.5: Solução levando o acoplador óptico para o ambiente externo.

Colocamos os 3 adaptadores FC em uma mesma face de uma estrutura plástica, conforme mostra a Figura 5.6 (os pigtaills em amarelo são somente para suporte, estão sem função). Na outra parte da estrutura plástica, anexamos uma placa de fenolite para dar o suporte físico ao adaptador óptico, fixado rente à placa lateral superior na Figura 5.7. Prendedores plásticos foram usados para dar contorno às fibras do acoplador e nos utilizamos de massa de modelar e resina epóxi para ajudar a fixar os componentes.

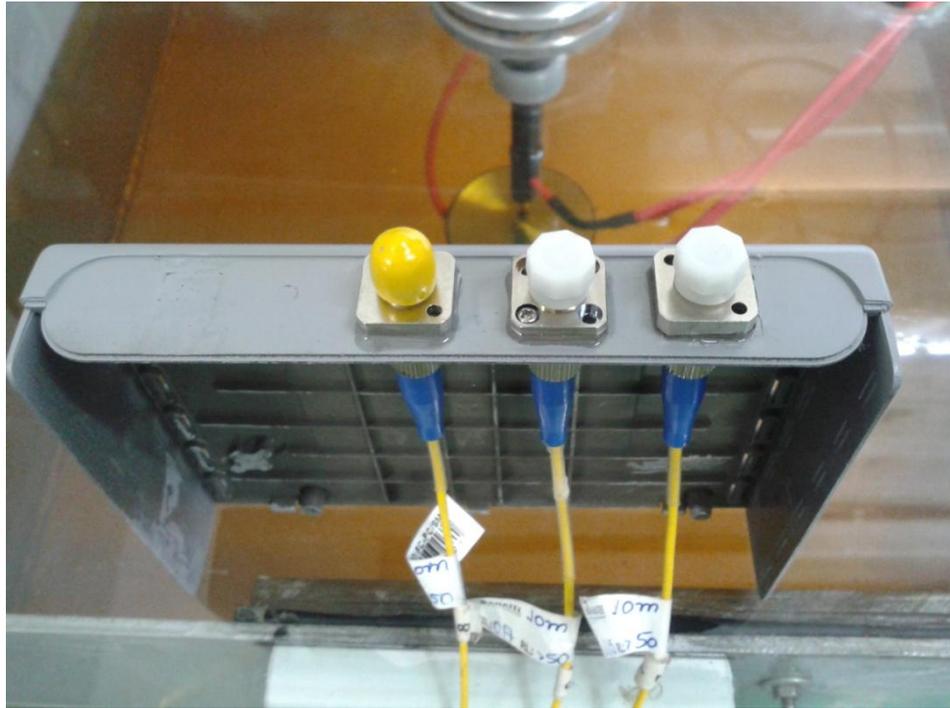


Figura 5.6: Os 3 adaptadores FC para as 3 portas do acoplador óptico fechado.

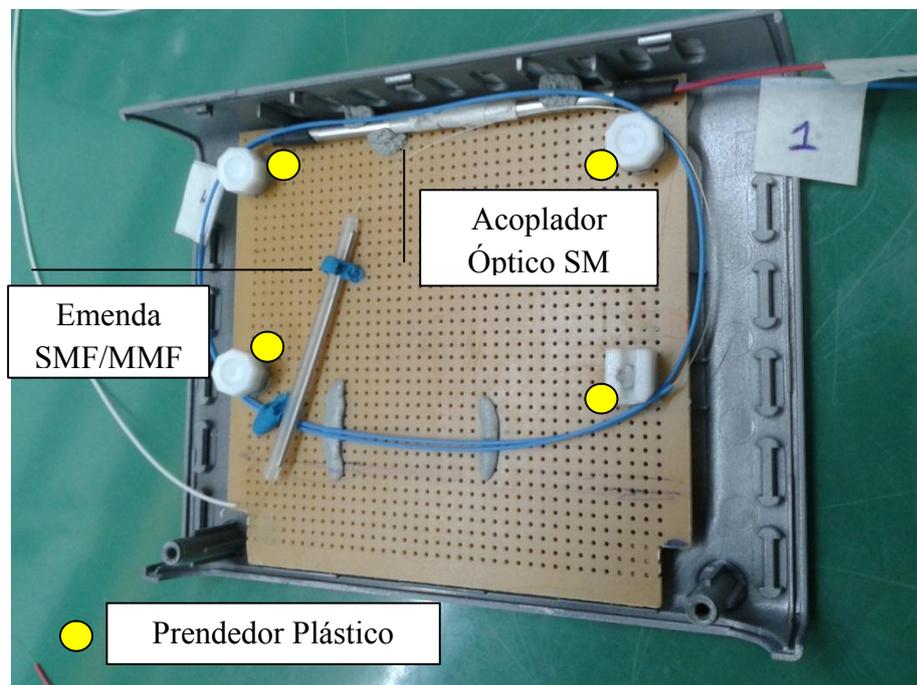


Figura 5.7: Acoplador óptico SM sendo montado para ser encapsulado.

As Figuras 5.8 e 5.9 mostram, respectivamente, o trabalho inicial e o adaptador óptico estruturado. É importante notar que respeitamos um limite de curvatura, para não atenuar demasiadamente os sinais. Enfim, fechamos o acoplador e numeramos as portas da seguinte maneira, como mostra a Figura 5.10: a porta 1 é a entrada da potência do LASER, a porta 2 é a ligação para a cabeça sensora do interferômetro, ou seja, para o encapsulamento e a porta 4 é saída para o Fotodetector.

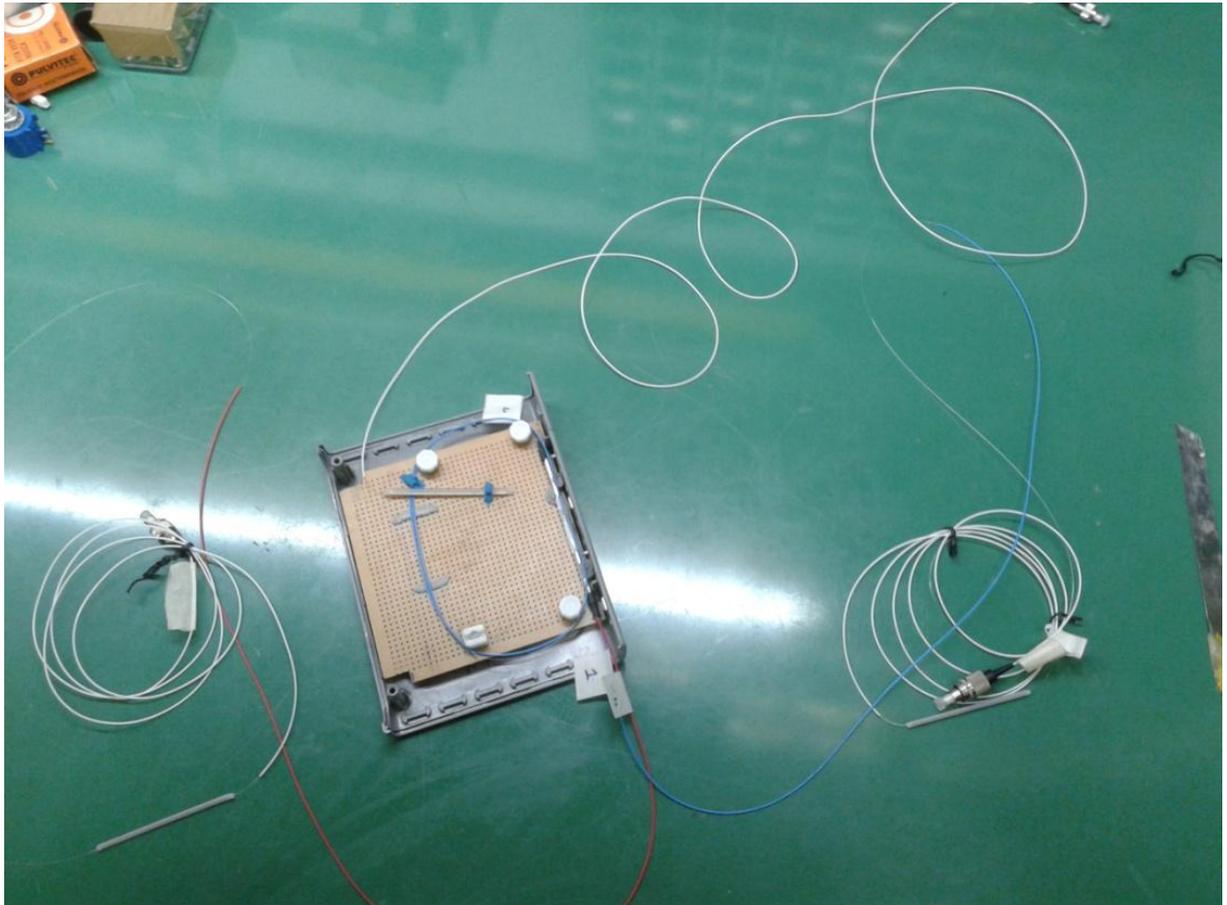


Figura 5.8: Adaptador óptico para ser encapsulado.

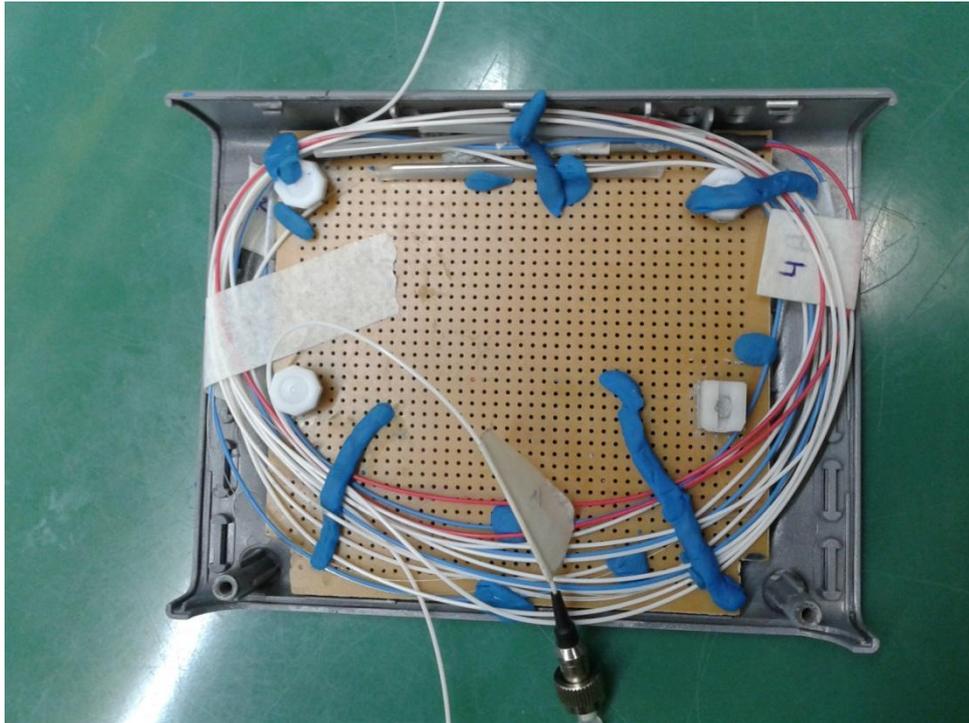


Figura 5.9: Adaptador óptico já estruturado sobre a placa de fenolite.

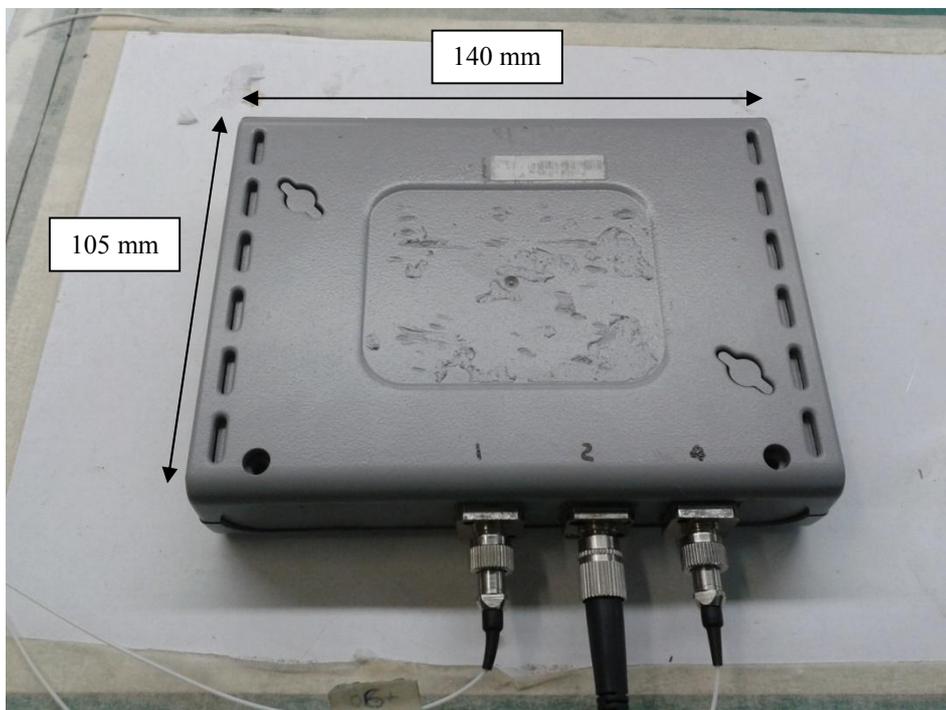


Figura 5.10: Adaptador óptico fechado.

Porém, lembremos, pela Figura 5.5, que entre a porta 1 e a saída do LASER e, entre a porta 4 e a entrada do fotodetector, colocamos para cada trecho, uma extensão de 110 m de fibra monomodo aproximadamente. Com isso, tentávamos melhorar a relação sinal/ruído da Figura de interferência do sinal de saída provocada pelos cabos. Conforme pode ser visto pela Figura 5.11, a fibra 9 vai em direção ao LASER e a fibra 8 da bobina conecta-se ao fotodetector.

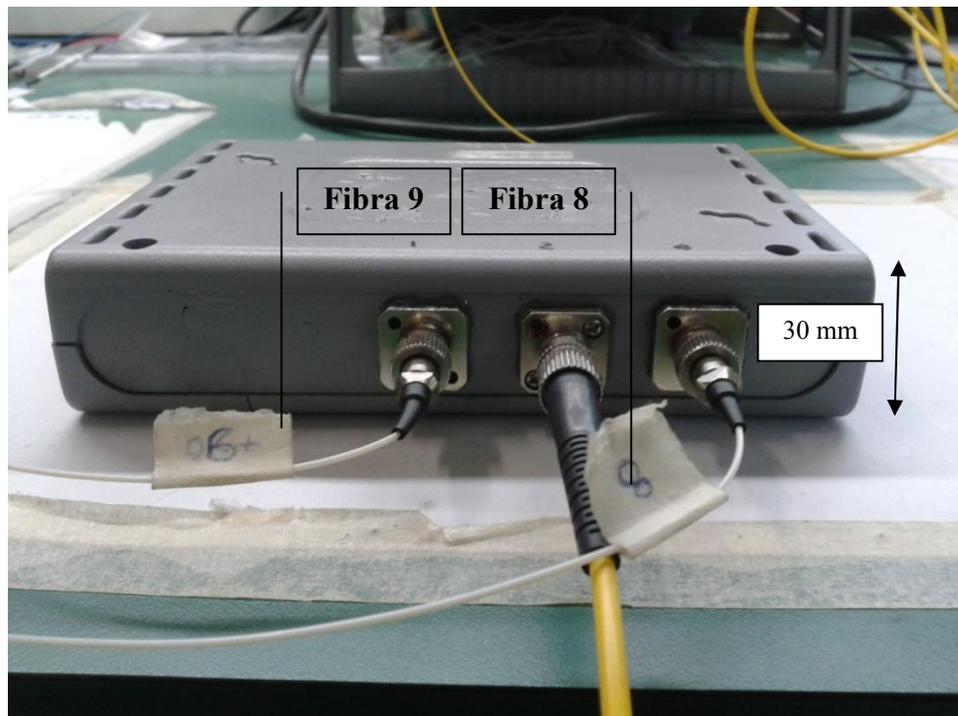


Figura 5.11: Acoplador óptico conectado para a emulação com as condições de distância do teste de campo.

Com isso, queríamos chegar, em bancada, nas condições mais próximas da montagem dos dispositivos dos testes de campo, que pudessem ser reproduzidas dentro do laboratório. Agora, com o encapsulamento da cabeça sensora pronto, o que fizemos foi colocar a cerâmica piezoelétrica para oscilar em 130 KHz sobre o disco magnético, emulando a vibração da frequência ultrassônica emitida por uma máquina elétrica quando ela emite descargas elétricas parciais. Isto pode ser visto na Figura 5.12.

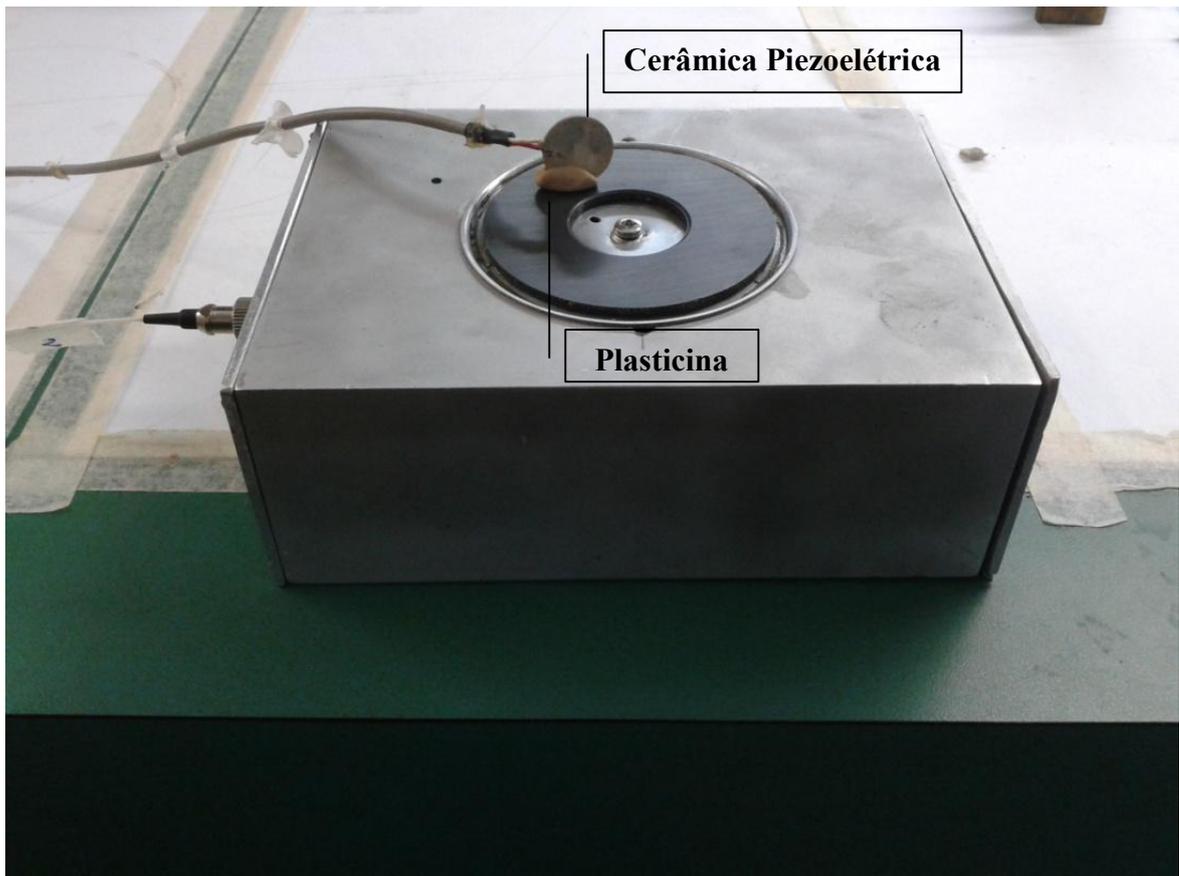


Figura 5.12: Cerâmica piezoelétrica fixada sobre o encapsulamento para realização da emulação.

Nesta nova configuração, da Figura 5.5, e aumentando a potência de emissão do LASER para 14 dBm, conseguimos uma relação sinal/ruído para a Figura de interferência vista no osciloscópio de aproximadamente $S/R=4$, onde antes tínhamos $S/R = 1$, conforme pode ser visto nas Figuras 5.13 e 5.14. Ou seja, anteriormente, na configuração da figura 5.1, sem levar o acoplador óptico para o ambiente externo, mesmo aumentando a potência óptica para 14 dBm, não conseguimos uma relação sinal/ruído satisfatória como $S/R = 4$. Comumente, obtivemos uma $S/R = 1$. Assim, com sucessos dos testes realizados em bancada, o interferômetro multimodal como sensor para descargas parciais de uma máquina elétrica de potência mostra-se apto para as futuras avaliações a serem realizadas em campo.

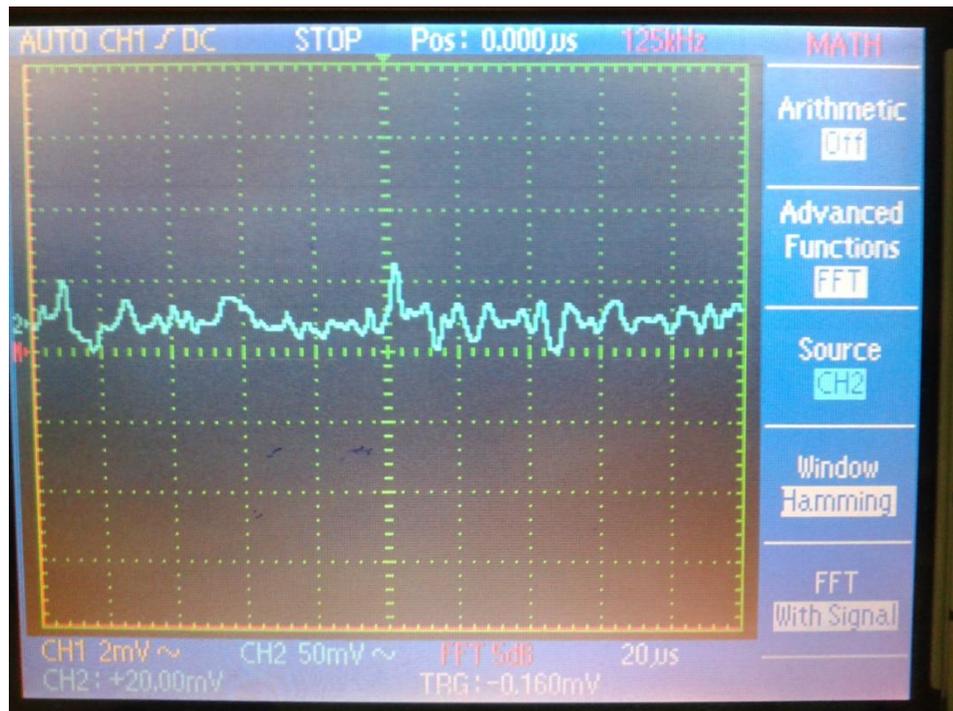


Figura 5.13: Ruído interferométrico sem a presença do sinal de emulação da cerâmica piezoelétrica.

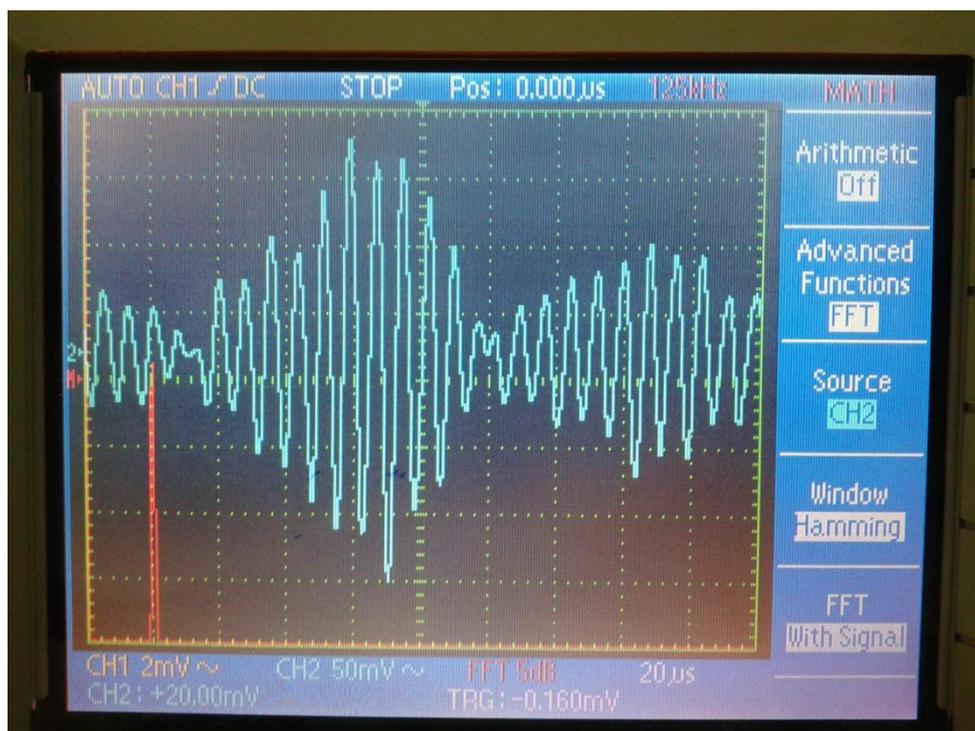


Figura 5.14: Figura interferométrica produzida pela cerâmica piezoelétrica na cabeça sensora do interferômetro multimodal.

6. Conclusão

Os resultados mostraram êxito na obtenção de um sinal de resposta na emulação da detecção de descargas parciais em máquinas elétricas de potência defeituosas com o uso de um sensor óptico interferométrico multimodal.

Sinais de respostas de alta sensibilidade, como figuras de interferência da ordem de 280 mV_{pp} puderam ser alcançadas na saída com o uso da técnica do espelhamento através do bulbo de mercúrio em detrimento do emprego da ponta da fibra multimodo simplesmente clivada ou do espelho fixo. Isto representou um ganho na refletividade de 14 vezes e 2 vezes, respectivamente.

A tomada de decisão para a construção do protótipo do interferômetro multimodal baseado num acoplador óptico que desde o início seria conectorizado nas 3 portas com saídas FC fez grande diferença para a obtenção dos resultados de forma mais célere. Deste modo, não precisamos fazer e refazer emendas para os testes com os trechos de fibra multimodo espelhadas no bulbo de mercúrio. Tal ideia foi fundamental para o sucesso do encapsulamento do acoplador projetado para ser levado para fora da sala de equipamentos. A máquina de posicionamento também foi de grande valia para o sucesso da técnica do espelhamento pelo bulbo de mercúrio, representando um ganho de refletância na comparação com a ponta da fibra multimodo apenas clivada.

O encapsulamento da cabeça sensora do interferômetro multimodal concentrou a maior parte dos esforços e se constituiu na parte principal da descrição desta dissertação. Pelo tipo de trabalho realizado, pode-se dizer que a modelagem desse interferômetro é algo menos explorado frente aos já tradicionais sensores ópticos disponíveis a FBG (Redes de Bragg), por exemplo, que comparativamente, têm sua instalação em campo de forma mais elaborada do que o por esta obra apresentado.

Os resultados dos testes, com a emulação da distribuição dos equipamentos do interferômetro multimodal em campo, indicam que o sensor já está apto para ser testado nas condições para qual foi idealizado em campo.

6.1. Sugestão para trabalhos futuros

O objetivo deste trabalho foi a construção de um sensor para detecção de descargas parciais em máquinas elétricas de potência com sinais de anomalias. Porém, não tratamos da questão da localização da emissão dos sinais de frequências ultrassônicas na superfície da máquina elétrica.

Fica a sugestão, para os trabalhos futuros, do estudo para a implementação de uma rede de sensores sobre superfície da máquina elétrica a ser monitorada, a fim da determinação, com precisão, da região avariada.

Referências Bibliográficas

- [1]SOARES,Edmundo Antônio.*Sensores de Fibras Ópticas*.Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações, Volume 4, Nº1, dezembro 1989.
- [2]BARBERO, Andrés Pablo López, *Sistema para Caracterização de Circuitos Ópticos a Fibras Altamente Birrefringentes*,Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, ITA, São José dos Campos,SP, 1995.
- [3]S.M. MARKALOUS, *Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using acoustic and electromagnetic signal*, Tese de Doutorado, University of Stuttgart, 2006.
- [4]*Desenvolvimento de Sistemas Inteligentes Baseados em Sensores a Fibra Óptica para Transformadores de Potência*, DESENVOLVIMENTO DE SENSORES ÓPTICOS PARA DETEÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS, Relatório ANEEL: 0372-009/2007, Novembro 2012.
- [5]UDD, Eric. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*.New Jersey.Wiley-Interscience, pp. 1-8, 2006.
- [6]SOLDANO,Lucas B., PENNINGS, Erik C. M..*Optical Multi-Mode Interference Devices Based on Self-Imaging: Principles and Applications*, Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, No. 4, April 1995.
- [7]FOWLES, Grant R. *Introduction to Modern Optics*.2ª Edição.New York,Dover Publications,pp.58-103, 1989
- [8]HALLIDAY;RESNICK;WALKER,Jearl.*Fundamentos de Física: Óptica e Física Moderna, Volume 4*. 8ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, pp. 1-89, 2009.
- [9]HECHT, Eugene.*Optics*.4ª Edição.San Francisco:Addison Wesley, pp.385,442, 2002.

[10]BALOD, Yanes Checcacci , *Dispositivos à Fibra Óptica Baseados em Interferência Multimodal (MMI) para Telecomunicações e Sensoriamento*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, UFF, Niterói, 2011.

[11]Figura disponível em: www.unisat.com.br

[12]XAVIER NETO, Pressley, *Análise de Distorções Harmônicas em Modulador Mach-Zehnder para Uso em Sensores e Sistemas de Telecomunicações*, Dissertação de Graduação em Engenharia de Telecomunicações, UFF, Niterói, 2013.

[13]Figura disponível em: www.teleco.com.br

[14]M. R. SPIEGEL, "Manual de fórmulas e tabelas matemáticas", Porto Alegre: Bookman, pp. 153-163,2004.

[15]CARNEIRO, Alexander Cascardo, *Técnica Auto-referenciável de Interrogação de Grade de Bragg para Medição Simultânea de Temperatura e Vibrações*, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, UFF, Niterói, 2014.

[16]RIBEIRO, R.M. and WERNECK, M.M.. *An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge*.Sensors and Actuators A, 111, 210- 215, 2004.

[17]RIBEIRO, Ricardo M., BALOD, Yanes C., BARBERO, Andrés P. L. e SANTOS, Paulo A. M. *Monitoramento da Integridade Física de Cabos Ópticos de Telecomunicações Usando um Sistema Modalmétrico no Domínio do Tempo-* XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'08), 02-05 de Setembro de 2008, Rio de Janeiro, RJ.

[18]RIBEIRO, Ricardo M., *"Spectral Response of a Modalmetric Optical Sensor Based on the Graded-Index Multimode Fibre"*, submetido ao Optics Communications (2008).

- [19]RIBEIRO, Ricardo M., BALOD, Yanes C. e BARBERO, Andrés P. L.. *Acopladores à Fibra Óptica Monomodo-Multimodo como Dispositivos para Telecomunicações e Sensores*. XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'09), 29 de Setembro a 02 de outubro de 2009, Blumenau, SC.
- [20]R.A. Perez-Herrera, M.Lopez-Amo, *Fiber optic sensor networks*. Optical Fiber Technology,2013.
- [21]W. Ciurapinski, M.Zyczkowski, A. Górka, M. Kondrat. *Monitoring of the Optical Fiber Network by modal Interference Sensor*, ICTON,2005.
- [22]Pue Wei, Xuekang Shan, Xiaohan Sun. *Frequency response of distributed fiber-optic vibration sensor based on nonbalanced Mach-Zehnder interferometer*.Optical Fiber Technology 19, 2013.
- [23]Culshaw, Brian. *Fibre optic sensor: integration with micromachined devices*. Sensors and Actuators A, 1995.
- [24]Yinping Miao, Kaliang Zhang, Bo Liu, Wei Lin, Jianquan Yao. *Characteristics of bend sensor based on two-notch Mach-Zehnder fiber interferometer*.Optical Fiber Technology 18, 2012.
- [25]Denis Donlagié, Brian Culshaw.*Microbend Sensor Structure for Use in Distributed and Quasi-Distributed Sensor Systems based on Selective Launching and Filtering of the Modes in Graded Index MultimodeFiber*.Journal of lightwave technology, Vol. 17, No. 10, October 1999.
- [26]Chrisada Sookdhis, Ting Mei, Hery Susanto Djie.*Wavelength Monitoring With Low-Contrast Multimode Interference Waveguide*. IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 17, No. 4, April 2005.
- [27]Yu Liu, Li Wei.*Low-cost high-sensitivity strain and temperature sensing using graded-index multimode fibers*.Applied Optics, Vol. 46, No. 13, 1 May (2007).

[28]J. Tschepe, K. Desinger, M. Herring, G. Müller. *The Transmission of High and Low Power Acoustical Transient Waves Via Optical Fibers*. 1051-0117/94/0000-1899 IEEE, 1994.

[29]MARÇAL, Luiz Antônio Perezi, *Novas Técnicas de detecção de fase óptica em interferômetros homódinos aplicadas à caracterização de atuadores piezoelétricos flexionais*, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UNESP, Ilha Solteira,SP, 2008.

[30]MENEZES, João Paulo Crivellaro de, *Análise teórica e experimental de um método interferométrico de detecção de fase óptica, auto-consistente e com elevada faixa dinâmica, aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexionais*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UNESP, Ilha Solteira,SP, 2009.

Apêndices

APÊNDICE A – Manual de operação do detector óptico PDA10CS

PDA10CS Operating Manual - Switchable Gain, Amplified InGaAs Detector

Description:

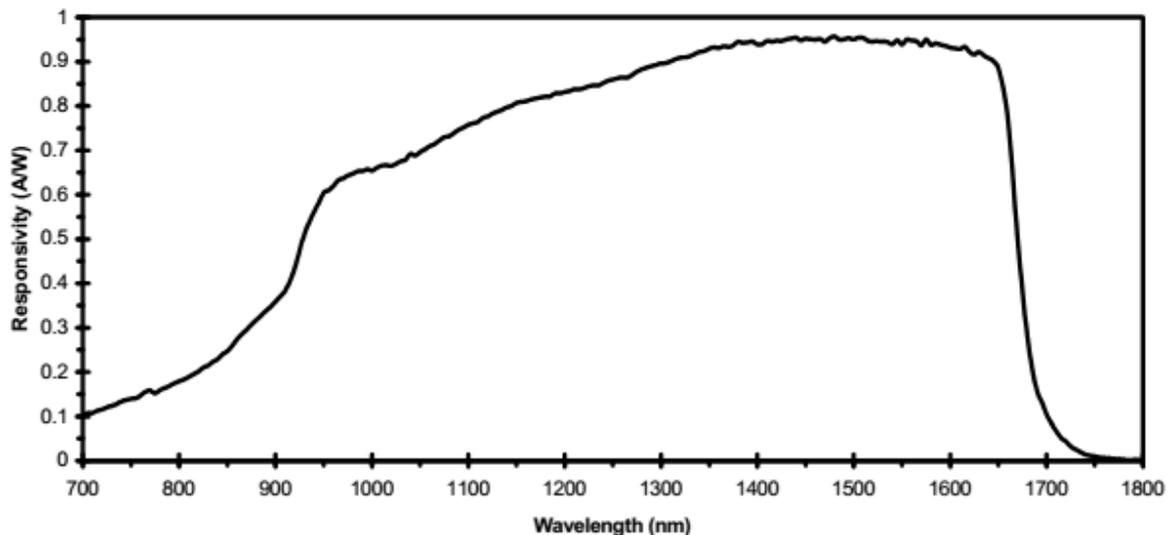
The PDA10CS is an amplified, switchable-gain, InGaAs detector designed for detection of light signals over 700 – 1800nm wavelength range. An eight-position rotary switch allows the user to vary the gain in 10 dB steps. A buffered output drives 50Ω load impedances up to 5 volt. The PDA10CS housing includes a removable threaded coupler (SM1T1) and retainer ring (SM1RR) that is compatible with any number of Thorlabs 1" threaded accessories. This allows convenient mounting of external optics, light filters, apertures, as well as providing an easy mounting mechanism using the Thorlabs cage assembly accessories.

The PDA10CS has two #8-32 tapped mounting holes with a 0.25" mounting depth and includes a 120VAC power AC/DC supply. The PDA10CS-EC has two M4 tapped mounting holes and includes a 230VAC AC/DC power supply.

Specifications:

General Specifications			
Detector:	InGaAs PIN	Gain Switch:	8-Pos Rotary
Active Area:	Ø1mm (0.8mm ²)	On / Off Switch:	Slide
Surface Depth:	0.07" (1.9mm)	Output:	BNC
Wavelength Range:	700-1800nm	Optical Head Size:	2.76" x 2.06" x 0.88" 70.1 x 52.3 x 22.4 mm
Peak Wavelength (λ_p):	1550nm	Weight ³ :	0.15 / 2.1lbs
Peak Response:	0.95 A/W @ λ_p	Accessories:	SM1T1, SM1RR
Output Voltage ¹ (50Ω):	0-5V	AC Power Supply:	AC-DC Converter
(Hi-Z):	0-10V	Power Supply	31W
Output Impedance:	50Ω	Input Power ⁴ :	100-120VAC, 50-60Hz (220-240VAC -EC)
Max Output Current:	100mA	Storage Temp:	-55 to 125 °C
Load Impedance:	50Ω – Hi-Z	Operating Temp:	0 to 40 °C
Gain Adj. Range:	70dB		
Gain Steps:	8x 10dB steps		

Figure 1 – PDA10CS Spectral Responsivity



Performance Specifications			
0dB Setting		40dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	1.51 x 10 ³ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	1.51 x 10 ⁵ V/A ±2%
(50Ω):	0.75 x 10 ³ V/A ±2%	(50Ω):	0.75 x 10 ⁵ V/A ±2%
Bandwidth:	17MHz	Bandwidth:	320kHz
Noise (RMS):	600μV	Noise (RMS):	300μV
NEP (@ λ _p):	6 x 10 ⁻¹¹ W/√Hz	NEP (@ λ _p):	1.4 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	5mV (10mV max)	Offset:	10mV (20mV max)
10dB Setting		50dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ³ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ⁵ V/A ±2%
(50Ω):	2.38 x 10 ³ V/A ±2%	(50Ω):	2.38 x 10 ⁵ V/A ±2%
Bandwidth:	8.5MHz	Bandwidth:	90kHz
Noise (RMS):	320μV	Noise (RMS):	475μV
NEP (@ λ _p):	1 x 10 ⁻¹¹ W/√Hz	NEP (@ λ _p):	1.5 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	6mV (12mV max)	Offset:	15mV (40mV max)
20dB Setting		60dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	1.5 x 10 ⁴ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	1.5 x 10 ⁶ V/A ±5%
(50Ω):	0.75 x 10 ⁴ V/A ±2%	(50Ω):	0.75 x 10 ⁶ V/A ±5%
Bandwidth:	1.9MHz	Bandwidth:	33kHz
Noise (RMS):	310μV	Noise (RMS):	850μV
NEP (@ λ _p):	3 x 10 ⁻¹² W/√Hz	NEP (@ λ _p):	1.5 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	6mV (15mV max)	Offset:	20mV (75mV max)
30dB Setting		70dB Setting	
Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ⁴ V/A ±2%	Gain ¹ (Hi-Z):	4.75 x 10 ⁶ V/A ±5%
(50Ω):	2.38 x 10 ⁴ V/A ±2%	(50Ω):	2.38 x 10 ⁶ V/A ±5%
Bandwidth:	775kHz	Bandwidth:	12 kHz
Noise (RMS):	300μV	Noise (RMS):	1.5mV
NEP (@ λ _p):	1.25 x 10 ⁻¹² W/√Hz	NEP (@ λ _p):	2 x 10 ⁻¹² W/√Hz
Offset:	8mV (15mV max)	Offset:	40mV (200mV max)

- Note 1: The PDA10CS has a 50Ω series terminator resistor (i.e. in series with amplifier output). This forms a voltage divider with any load impedance (e.g. 50Ω load divides signal in half).
- 2: All measurements performed with a 50Ω load unless stated otherwise.
- 3: Detector Package / Power Supply.
- 4: Although the power supply is rated for 31W the PDA10CS actual usage is <5W over the full operating range.

Setup

- Unpack the optical head, install a Thorlabs TR-series ½" diameter post into one of the #8-32 (M4 on -EC version) tapped holes, located on the bottom and side of the head, and mount into a PH-series post holder.
- Connect the power supply 3-pin plug into the power receptacle on the PDA10CS.
- Plug the power supply into a 50-60Hz, 100-120VAC outlet (220-240VAC for -EC version).
- Attach a 50Ω coax cable (i.e. RG-58U) to the output of the PDA. When running cable lengths longer than 12" we recommend terminating the opposite end of the coax with a 50Ω resistor (Thorlabs p/n T4119) for maximum performance. Connect the remaining end to a measurement device such as an oscilloscope or high speed DAQ card. **Caution:** Many high speed oscilloscopes have input impedances of 50Ω. In this case, do not install a 50Ω terminator. The combined loads will equal 25Ω which could allow ~135mA of output current. This will damage the output driver of the PDA10CS.
- Power the PDA10CS on using the power switch located on the top side of the unit.
- Install any desired filters, optics, adapters, or fiber adapters to the input aperture. **Caution:** The PDA10CS was designed to allow maximum accessibility to the photodetector by having the front surface of the diode flush with the outside of the PDA housing. When using fiber adapters, make sure that the fiber ferrule does not crash into the detector. Failure to do so may cause damage to the diode and / or the fiber. An easy way to accomplish this is to install a SM1RR retaining ring (included with the PDA10CS) inside the 1" threaded coupler *before* installing the fiber adapter.
- Apply a light source to the detector. Adjust the gain to the desired setting.

Operation

Thorlabs PDA series are ideal for measuring both pulsed and CW light sources. The PDA10CS includes a reverse-biased PIN photo diode, mated to a switchable gain transimpedance amplifier, and packaged in a rugged housing. The thin profile housing allows the PDA10CS to fit into small spaces. All controls and connections are orthogonal to the light path providing easier access and minimizing the light path footprint.

Output

The maximum output of the PDA10CS is 10 volts for high impedance loads (i.e. $R_{LOAD} \geq 5k\Omega$) and 5 volts for 50Ω loads. Adjust the gain so that the measured signal level out of the PDA10CS is below 10 volts (5 volts with a 50Ω load) to avoid saturation. If necessary, use external neutral density filters to reduce the input light level. The BNC output signal is buffered with an amplifier capable of driving 50Ω loads. A 50Ω series resistor is included on the output to impedance match a 50Ω coax cables. For best performance, Thorlabs recommends operating the PDA10CS with a 50Ω terminating load located at the end of the coax cable. While this is not necessary, it eliminates ringing and distortion due to impedance mismatches.

Gain Adjustment

The PDA10CS includes a low noise, low offset, high gain transimpedance amplifier that allows gain adjustment over a 70dB range. The gain is adjusted by rotating the gain control knob, located on the top side of the unit. There are 8 gain positions incremented in 10dB steps. It is important to note that the bandwidth will decrease as the gain increases. See the specifications above to choose the best gain vs. bandwidth for a given input signal.

Light to Voltage Conversion

The Spectral Responsivity, $\mathfrak{R}(\lambda)$, can be obtained from Figure 1 to estimate the amount of output voltage to expect. The light to voltage conversion can be estimated by factoring the wavelength-dependent responsivity of the InGaAs detector with the transimpedance gain as shown below:

$$\text{E.g. 1 – Output [V/W]} = \text{transimpedance gain [V/A]} \times \mathfrak{R}(\lambda) \text{ [A/W]}$$

For low terminating resistors, $<5k\Omega$ or 1% error, an additional factor needs to be included in the above formula. As described above the output includes a 50Ω series resistor (R_S). The output load creates a voltage divider with the 50Ω series resistor as follows:

$$\text{E.g. 2 – Scale Factor} = R_{LOAD} / (R_{LOAD} + R_S)$$

Where R_{LOAD} is the terminating resistor and $R_S = 50\Omega$. For a standard 50Ω terminator, the gain will be scaled by $\frac{1}{2}$ as shown below:

$$\text{Scale Factor} = 50\Omega / (50\Omega + 50\Omega) = 0.5$$

$$\text{E.g. 3 – Output [V/W]} = \text{transimpedance gain [V/A]} \times \mathfrak{R}(\lambda) \text{ [A/W]} \times \text{Scale Factor}$$

Maintaining the PDA10CS

There are no serviceable parts in the PDA10CS optical head or power supply. The housing may be cleaned by wiping with a soft damp cloth. The window of the detector should only be cleaned using isopropyl alcohol and optical grade wipes. If you suspect a problem with your PDA10CS please call Thorlabs and technical support will be happy to assist you.

Contact

Americas
Thorlabs Inc.
435 Route 206 North
Newton NJ 07860
USA
Ph: (973) 579-7227
Fax: (973) 300-3600
www.thorlabs.com
Email: techsupport@thorlabs.com

Europe
Thorlabs GmbH
Gaußstr. 11
85757 Karlsfeld
Germany
Ph: +49 (0) 8131-59-56-0
Fax: +49 (0) 8131-59-56-99
www.thorlabs.com
Email: Europe@thorlabs.com

UK and Ireland
Thorlabs, LTD.
1 Saint Thomas Place, Ely
Cambridgeshire CB7 4EX
Great Britain
Ph: +44 (0) 1353-654440
Fax: +44 (0) 1353-654444
www.thorlabs.com
Email: sales.uk@thorlabs.com

Scandinavia
Thorlabs Sweden AB
Box 141 94
400 20 Göteborg
Sweden
Ph: +46-31-733-30-00
Fax: +46-31-703-40-45
www.thorlabs.com
Email: Scandinavia@thorlabs.com

Japan
Thorlabs Japan, Inc
5-17-1, Ohtsuka
Bunkyo-ku, Tokyo 112-0012
Japan
Ph: +81-3-5977-8401
Fax: +81-3-5977-8402
www.thorlabs.jp
Email: sales@thorlabs.jp

WEEE

As required by the WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive) of the European Community and the corresponding national laws, Thorlabs offers all end users in the EC the possibility to return "end of life" units without incurring disposal charges.

This offer is valid for Thorlabs electrical and electronic equipment

- sold after August 13th 2005
- marked correspondingly with the crossed out "wheelie bin" logo (see fig. 1)
- sold to a company or institute within the EC
- currently owned by a company or institute within the EC
- still complete, not disassembled and not contaminated

As the WEEE directive applies to self contained operational electrical and electronic products, this "end of life" take back service does not refer to other Thorlabs products, such as

- pure OEM products, that means assemblies to be built into a unit by the user (e. g. OEM laser driver cards)
- components
- mechanics and optics
- left over parts of units disassembled by the user (PCB's, housings etc.).

If you wish to return a Thorlabs unit for waste recovery, please contact Thorlabs or your nearest dealer for further information.

Waste treatment on your own responsibility

If you do not return an "end of life" unit to Thorlabs, you must hand it to a company specialized in waste recovery. Do not dispose of the unit in a litter bin or at a public waste disposal site.

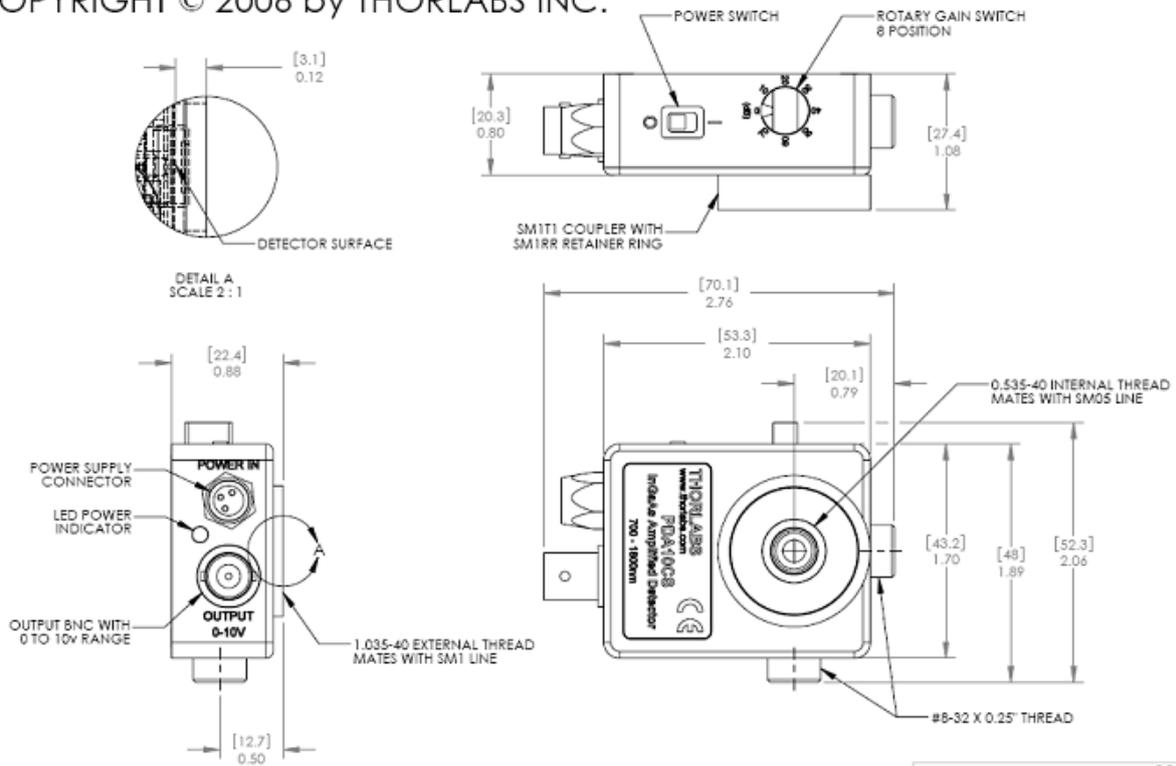
Ecological background

It is well known that WEEE pollutes the environment by releasing toxic products during decomposition. The aim of the European RoHS directive is to reduce the content of toxic substances in electronic products in the future. The intent of the WEEE directive is to enforce the recycling of WEEE. A controlled recycling of end of live products will thereby avoid negative impacts on the environment.



Figure 2. Crossed out "wheelie bin" symbol

COPYRIGHT © 2006 by THORLABS INC.



	NAME	DATE
DRAWN	EC	2/22/06
ENGR. APPR.	EC	2/22/06
MFG. APPR.	EC	2/22/06

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF THORLABS, INC. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF THORLABS, INC. IS PROHIBITED.

THORLABS INC. PO BOX 366
 NEWTON NJ

TITLE:
 InGaAs AMPLIFIED DETECTOR

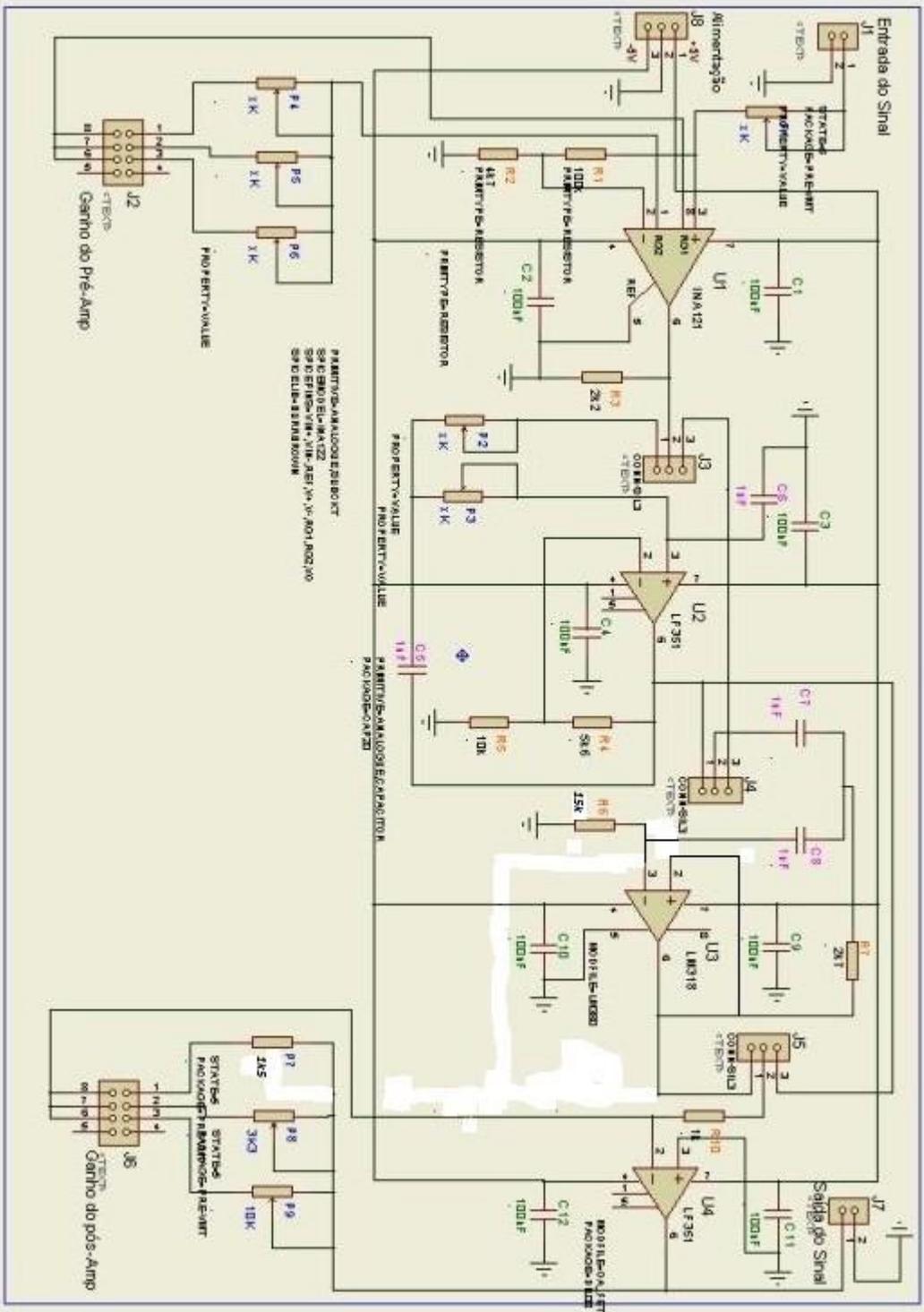
MATERIAL: PDA10CS SIZE: A REV. C

SCALE: 1:1 SHEET 1 OF 1

DWG. NO. 13058-E0W PART NO. PDA10CS

5 4 3 2 1

APÊNDICE B – Especificações do filtro ativo



		Ruido elevado											
V _{ipp} (mV)	f (kHz)	10	20	40	50	70	130	150	170	200	250	300	
100	V _{opp} (mV)	60	160	580	380	1.470	2.150	2.130	2.030	1.790	1.260	830	
400	V _{op} (mV)	180	620	2.360	3.570	4.850	3.660	3.260	2.850	2.280	1.480	550	
Deformação perceptível		Ruído Elevado											

APÊNDICE C – Imagens e resultados iniciais dos testes de campo com o sensor interferométrico multimodal

Resultados testes de campo

- Subestação Eletronorte de Imperatriz-MA



40

Resultados testes de campo

- Subestação Eletronorte de Imperatriz-MA



41

Resultados testes de campo

- Subestação Eletronorte de Imperatriz-MA



42

Resultados testes de campo

- Subestação Eletronorte de Imperatriz-MA



43

Resultados testes de campo

- Subestação Eletronorte de Imperatriz-MA

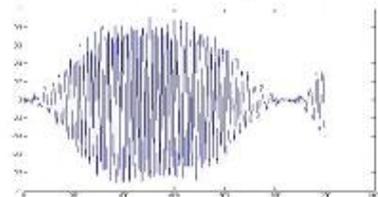


44

Resultados testes de campo

- Subestação Eletronorte de Imperatriz-MA

Figura mostrando a DP de maior amplitude : 0.9071 V

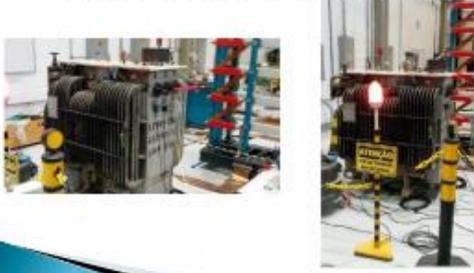


Maior DP – duração: 881 μ s

45

Resultados testes de campo

• Laboratório Eletrobras CEPEL/UFRJ - Cidade Universitária - RJ



46

Resultados testes de campo

• Laboratório Eletrobras CEPEL/UFRJ - Cidade Universitária - RJ



46

Resultados testes de campo

• Laboratório Eletrobras CEPEL/UFRJ - Cidade Universitária - RJ



47