LUIZ PINHEIRO CORDOVIL DA SILVA

**Transformador Óptico por Interferometria de Luz
Branca para Medição de Altas Tensões**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de mestre em engenharia.

São Paulo
2005

LUIZ PINHEIRO CORDOVIL DA SILVA

**Transformador Óptico por Interferometria de Luz
Branca para Medição de Altas Tensões**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de mestre em engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Elétrica

Orientador:
Prof. Dr. Josemir Coelho Santos

São Paulo
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Luiz Pinheiro Cordovil da

**Transformador óptico por interferometria de luz branca para
medição de altas tensões / L.P.C. da Silva. -- São Paulo, 2005.
63p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas.**

**1.Sensores ópticos 2.Alta tensão 3.Medidas de alta tensão
4.Interferometria de luz branca I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas II.t.**

À minha mãe Adalgiza Pinheiro Costa... Com infinita gratidão.

Aos meus irmãos José, Sebastião e Nice.

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. Josemir Coelho Santos pelo apoio, amizade e confiança em mim depositados durante todo o processo de orientação.

Ao amigo Luiz Carlos Gonçalves Donizetti pelas conversas e discussões sobre temas relevantes.

Ao amigo José Carlos Juliano de Almeida, pela colaboração.

Ao amigo Jonas Rubinni Júnior, pelo constante apoio.

Ao amigo Geraldo Itagiba Andrade, pela assistência prestada durante o trabalho.

Ao amigo João Antônio Fernandes pelo grande incentivo.

Aos amigos Eduardo Maciel Gonzalez e Alice Satiyo Otsubo.

Aos funcionários do Pea: Adelino, Marcos e Edson.

À Fapesp, pelo apoio concedido na forma de Auxílio à pesquisa.

À Capes pelo apoio financeiro concedido na forma de bolsa de mestrado.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, colaboraram na realização deste trabalho.

A B S T R A C T

A new approach to perform measurement of potentials in high voltage levels using electrooptical Pockels sensors is presented here. This work describes an application of the White Light Interferometry technique to a high voltage optical fiber measurement system.

In this system the information is encoded in the spectrum of the light, allowing the measurement to be independent of the optical power transmitted by the optical fiber link. A prototype was built and tested under excitation of a.c. voltages up to 20 kV in 60 Hz showing good response and demonstrating the feasibility of this method.

R E S U M O

No presente trabalho é apresentada uma nova abordagem para medida de potenciais em altos níveis de tensão que utilizam sensores eletro-ópticos Pockels. Também descreve a aplicação da técnica de interferometria de luz branca em sistemas de alta tensão por fibras ópticas.

Neste sistema a informação é codificada no espectro da luz, permitindo assim que a medida seja independente da potência óptica transmitida pelo link de fibras ópticas. Um protótipo foi construído e testado sob excitação de tensão a.c. até 20 kV em 60 Hz mostrando boa resposta e demonstrando a viabilidade deste método.

S U M Á R I O

DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTOS	
ABSTRACT	
RESUMO	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Uso de Sensores Eletro-ópticos na Medição de Altas Tensões em Sistemas Elétricos de Potência.....	1
1.2 Uso da Técnica de Interferometria de Luz Branca como Solução para Problemas Associados aos Sensores Eletro-ópticos Polarimétricos.....	2
1.2.1 Objetivo.....	2
1.3 Organização do Trabalho.....	2
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 Sensores a Fibras Ópticas.....	3
2.1.1 Configurações dos Sensores a Fibra Ópticas.....	8
2.1.2 Sensores Intrínsecos.....	9
2.1.3 Sensores Extrínsecos.....	11
2.2 Técnicas de Modulação de Sensores Ópticos.....	13
2.2.1 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Intensidade.....	13
2.2.2 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Fase.....	15
2.2.3 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Comprimento de Onda.....	16

2.2.4 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Polarização.....	16
2.2.5 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Espectro.....	17
2.3 Princípio de Funcionamento do Interferômetro WLI.....	18
2.4 Sensores Ópticos de Tensão.....	24
2.4.1 Efeito Eletro-óptico.....	24
2.4.2 Efeito Pockels.....	26
2.4.3 Moduladores Eletro-ópticos.....	28
2.4.4 Moduladores Eletro-ópticos em Configuração Longitudinal.....	30
3 Materiais e Métodos.....	34
3.1 Método de Interferometria de Luz Branca (WLI) Aplicado à Medição de Tensão Elétrica.....	34
3.1.1 Modulador Pockels como Interferômetro de Birrefringência	34
3.1.2 Sistema WLI Constituído pelo Modulador Pockels ligado em Série com um Interferômetro Birrefringente de Atraso de Fase Fixo.....	37
3.1.3 Técnica de WLI Aplicada ao Sensor Pockels de Alta Tensão para Construção de Transformador Óptico de Alta Tensão.....	38
3.1.4 Transformador Óptico de Alta Tensão Usando Configuração WLI.....	40
3.2 Protótipo Construído.....	42
3.2.1 Projeto e Construção de Moduladores Eletro-ópticos para Medição de Altas Tensões.....	44
3.2.2 Projeto e Construção da Célula Eletro-óptica Sensora de Alta Tensão.....	47
3.2.3 Montagem do Enlace Óptico.....	49
3.2.4 Projeto e Construção do Interferômetro Recuperador.....	51
3.2.5 Circuitos Eletrônicos Associados aos Equipamentos de Processamento dos Sinais Ópticos.....	52

4	Resultados Experimentais.....	56
5	Discussão dos Resultados e Conclusões.....	60
	Referências Bibliográficas.....	62

Listas de Figuras

Capítulo 2

Figura 2.1	Sensor óptico genérico.....	3
Figura 2.2	Distribuição dos artigos apresentados na OFS-15 de acordo com as grandezas medidas.....	5
Figura 2.3	Distribuição dos trabalhos apresentados na OFS-15 de acordo com as tecnologias empregadas na construção dos sensores.....	5
Figura 2.4	Sensor baseado em fibra óptica intrínseco: a) Casca da fibra em trecho sensibilizado e b) Casca da fibra substituída por amostra a ser monitorada.....	9
Figura 2.5	Diagrama de blocos com os tipos mais importantes de sensores ópticos intrínsecos.....	10
Figura 2.6	Sensor a fibras ópticas extrínseco.....	11
Figura 2.7	Diagrama de blocos com os tipos mais importantes de sensores ópticos extrínsecos.....	12
Figura 2.8	Esquema básico de um sensor de microcurvatura: a) Configuração típica e b) Detalhe das placas dentadas.....	14
Figura 2.9	Sensor de macrocurvatura.....	14
Figura 2.10	Esquema de um sensor a fibras ópticas utilizando a configuração Mach-Zehnder.....	15
Figura 2.11	Sensor em redes de Bragg a fibras óptica.....	16
Figura 2.12	Padrão teórico de intensidade de saída de um interferômetro de Luz branca.....	23
Figura 2.13	Modulador eletro-óptico longitudinal.....	29
Figura 2.14	Modulador eletro-óptico transversal.....	30
Figura 2.15	Princípio do efeito eletro-óptico e do modulador eletro-óptico longitudinal.....	31

Figura 2.16	Curva de resposta do modulador Pockels para uma tensão senoidal aplicada no cristal.....	32
-------------	--	----

Capítulo 3

Figura 3.1	Curva de resposta do sistema sensor WLI para uma tensão senoidal aplicada no interferômetro sensor.....	40
Figura 3.2	Transformador óptico de alta tensão que usa configuração WLI.....	41
Figura 3.3	“Meia-cana” de acrílico utilizada para acondicionar cristais eletro-ópticos longos e delgados de BGO.....	46
Figura 3.4	a) Esquema representativo da composição das “medalhas” com o cilindro de acrílico contendo o cristal eletro-óptico e b) Vista lateral em corte do aspecto final do modulador eletro-óptico longitudinal para medição de altas tensões.....	47
Figura 3.5	Vista em corte da célula eletro-óptica de alta tensão.....	48
Figura 3.6	a) Fotografia da célula eletro-óptica de alta-tensão e b) Célula de alta tensão e o transformador de potencial (TP).....	49
Figura 3.7	Diagrama de blocos da unidade de processamento eletrônico de sinal.....	54
Figura 3.8	Foto mostrando o sistema completo de processamento dos sinais óptico e eletrônico do protótipo do TP óptico. (a) unidade de processamento eletrônico de sinais, (b) acoplador direcional, (c) unidade contendo a fonte óptica e o interferômetro recuperador, (d) atenuador óptico variável, (e) osciloscópio digital e (f) fibras ópticas do enlace de comunicação entre os interferômetros sensor e recuperador.....	55

Capítulo 4

Figura 4.1	Valores típicos observados experimentalmente. Traço superior: tensão aplicada ao TP óptico. Traço inferior: tensão observada na saída do processador eletrônico de sinais. Atenuações inseridas no enlace a) -2,5 dB, b) -7,49 dB e c) -11,46 dB.....	58
------------	---	----

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1	Grandezas passíveis de serem medidas pelos sensores ópticos Intrínsecos.....	10
Tabela 2.2	Grandezas passíveis de serem medidas pelos sensores ópticos extrínsecos.....	12

Capítulo 4

Tabela 4.1	Valores de atenuação introduzidos no enlace, valores de tensão pico a pico e rms presentes na saída do processador de sinais do TP óptico e variação percentual do valor rms relacionados. Durante a variação da atenuação do enlace a tensão aplicada ao TP óptico foi mantida constante num valor de referência de 4,5 kV _{pp}	56
------------	---	----

Lista de Abreviaturas

BGO	Germanato de Bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$)
CSM	Charge Simulation Method
EMI	Electromagnetic Interference
EMP	Electromagnetic Pulse Interference
FEM	Finite Element Method
FOLCI	Fiber Optic Low Coherence Interferometry
GRIN	Gradual Index
LNO	Niobato de Lítio (LiNbO_3)
LTO	Tantalato de Lítio (LiTaO_3)
MPY634	Código do Multiplicador Analógico Fabricado pela Burr-Brown
OFS	Optical Fiber Sensor Conference
OPD	Optical path Difference
OPA655	Código do Amplificador Operacional fabricado pela Burr-Brown
OPA037	Código do Amplificador Operacional fabricado pela Burr-Brown
SLD	Superluminescent Diode
TIA	Transimpedance Amplifier
WLI	White Light Interferometry

Lista de Símbolos

I	Intensidade luminosa
U	Intensidade luminosa de uma componente da onda polarizada
$\Delta\phi$	Diferença de fase entre duas componentes da onda polarizada
Δn	Birrefringência Induzida
Δn_o	Birrefringência natural
$\gamma(\tau)$	Função de auto-correlação
$ \gamma_{11}(\tau) $	Grau de coerência
c	Velocidade da luz no vácuo
λ	Comprimento de onda da luz no vácuo
K	Visibilidade
K_o	Visibilidade da franja central
K_r	Visibilidade do interferômetro recuperador
$K_s = K_{os}$	Visibilidade do interferômetro sensor
$I(\sigma)$	Distribuição do espectro de intensidade de uma fonte óptica de banda larga
$\delta\sigma$	Largura da banda espectral
σ	Número de onda de uma componente espectral
σ_o	Número de onda central da fonte luminosa
I_o	Intensidade em (σ_o)
L_c	Comprimento de coerência
ΔL_r	Diferença de caminho óptico introduzido pelo interferômetro recuperador
ΔL_s	Diferença de caminho óptico introduzido pelo interferômetro sensor
T_1	Fator de transmissão do enlace óptico de ida
T_2	Fator de transmissão do enlace óptico de volta
T_s	Fator de transmissão do interferômetro sensor
T_r	Fator de transmissão do interferômetro recuperador
ΔL_s	Diferença de caminho óptico introduzido pelo interferômetro sensor
ΔL_r	Diferença de caminho óptico introduzido pelo interferômetro sensor recuperador
$[\eta]$	Tensor de impermeabilidade
η_{ij}	Elemento do tensor de impermeabilidade
n_x, n_y, n_z	Índice de refração nas direções x, y, z , respectivamente
n_o	Índice de refração ordinário
n_e	Índice de refração extraordinário
r_{ijk}	Coefficiente eletro-óptico de Pockels

s_{ijkl}	Coeficiente eletro-óptico de Kerr
$\vec{E}$	Campo elétrico
E	Intensidade do campo elétrico
V	Tensão elétrica aplicada
V_{π}	Tensão de meia-onda
ϕ_r	Atraso de fase fixo devido à lâmina retardadora
Γ	Atraso de fase induzido
L	Comprimento do cristal eletro-óptico
r_{41}	Coeficiente eletro-óptico de Pockels
$V(t)$	Tensão aplicada ao modulador eletro-óptico
V_s	Tensão aplicada no interferômetro sensor
$V_{out}(t)$	Tensão de saída do circuito de processamento eletrônico de sinais
$V_{out\ pp}$	Valor pico a pico de tensão do circuito de processamento eletrônico de sinais
$V_{out\ rms}$	Valor rms de tensão do circuito de processamento eletrônico de sinais
I_x	Intensidade da onda polarizada no eixo x
I_y	Intensidade da onda polarizada no eixo y
Δn_c	Birrefringência natural da lâmina retardadora
$\Delta\phi_c$	Atraso de fase óptico introduzido pela lâmina retardadora
α_s	Atenuação introduzida na luz transmitida pelo interferômetro sensor
α_r	Atenuação introduzida na luz transmitida pelo interferômetro
ΔL_r	Atraso de fase fixo do interferômetro recuperador
ΔL_s	Atraso de fase fixo do interferômetro sensor
W	Watt
ε	Permissividade dielétrica do meio
μ	Permeabilidade magnética do meio
V/m	Volts por metro
V_{D1}	Tensão na saída do transimpedância 1
V_{D2}	Tensão na saída do transimpedância 2

1. Introdução

1.1 Uso de Sensores Eletro-ópticos na Medição de Altas Tensões em Sistema Elétricos de Potência

Medidas em altas tensões têm sido feitas usando transformadores eletromagnéticos de tensão (*Voltage Transformer* - VT) e, em alguns casos, divisores capacitivos ou resistivos de tensão. A aplicação de novas tecnologias, recentemente desenvolvidas, provê alternativas aos VTs convencionais que tem desempenho melhorado de insensibilidade a interferência eletromagnética, resposta em frequência mais ampla, etc.

Técnicas eletro-ópticas combinadas com enlaces de fibra óptica podem ser usadas em sensores ópticos de tensão (*Optical Voltage Transformer* - OVT) que possuem muitas vantagens na substituição dos VTs convencionais, como: possibilidade de construção totalmente dielétrica, imunidade a ruído eletromagnético, completa isolamento elétrica, ampla largura de faixa, pequeno tamanho, baixo peso, etc.

Na literatura pode-se encontrar uma grande variedade de sensores eletro-ópticos de alta tensão, propostos por diversos autores [1-14]. Dentre eles, destaca-se trabalho de J.C. Santos [14], onde ele propõe dois tipos de sensores ópticos para medida de altas tensões baseados no efeito eletro-óptico Pockels. No primeiro sensor o modulador eletro-óptico foi construído com vários cristais de Germanato de Bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) dispostos em série (multi-segmentado) e os resultados mostraram que, embora o sensor tenha apresentado uma sensibilidade adequada em medidas de altas tensões até 400 kV, foram observadas componentes oscilatórias em sinais obtidos de medidas de descargas atmosféricas. Este fenômeno foi atribuído a uma combinação dos efeitos piezo-elétricos e elasto-ópticos presentes no material eletro-óptico utilizado. Para eliminar estes efeitos indesejáveis, foi desenvolvida uma segunda topologia em que o sensor é construído a partir de um único cristal de Germanato de Bismuto. Esta nova topologia leva em consideração a forma do cristal eletro-óptico utilizado, pois a gama de frequências de oscilação está relacionada com as dimensões do cristal. Este novo sensor óptico de alta tensão apresentou ampla largura de banda em d.c., em alta frequência e 80 kV de tensão máxima mensurável.

No entanto, se a célula Pockels for semelhante a um interferômetro polarimétrico, a tensão medida será traduzida em intensidade óptica em sua saída e, sendo assim, a medida óptica ficará fortemente dependente das perdas nas conexões do enlace óptico.

1.2 Uso da Técnica de Interferometria de Luz Branca como Solução para Problemas Associados aos Sensores Eletro-ópticos Polarimétricos

1.2.1 Objetivo

Neste trabalho a aplicação de interferometria de luz branca (*White Light interferometry* - WLI) para a célula Pockels usada em um OVT é proposta como uma opção para minimizar o problema da forte dependência das perdas de sinal óptico. Desde então, em um sistema baseado no método de interferometria de luz branca (WLI) a informação é codificada no espectro da luz, isto pode produzir uma medida que seja independente da potência óptica presente na saída do link de fibra óptica.

1.3 Organização do Trabalho

No capítulo 2, é feita uma revisão da literatura relevante utilizada para desenvolver a pesquisa. É dada uma visão geral dos trabalhos publicados no desenvolvimento de sensores ópticos aplicados a várias grandezas de interesse e várias técnicas utilizadas são apresentadas.

No capítulo 3, são apresentados os procedimentos, as técnicas e os materiais utilizados no desenvolvimento do sensor óptico para medida de altas tensões.

No capítulo 4, apresentam-se os resultados experimentais obtidos.

Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho.

2. Revisão da Literatura

2.1 Sensores a Fibras Ópticas

Há aproximadamente três décadas iniciaram-se os estudos de sensores a fibras ópticas. Neste período inúmeras idéias foram propostas e várias técnicas foram desenvolvidas para medição de diversas grandezas em muitas aplicações. Atualmente, existem no mercado vários tipos de sensores a fibras ópticas, mas somente um número limitado de técnicas encontrou sucesso comercial em um leque restrito de aplicações.

A Fig. 2.1 mostra um sensor a fibras ópticas genérico. Seu princípio de funcionamento baseia-se na condução da luz através de uma fibra óptica até o ponto onde a luz é modulada por um fenômeno físico, químico ou biológico. A luz é transmitida de volta ao receptor por outra fibra óptica e posteriormente demodulada.

Figura 2.1. Sensor óptico genérico.

Diversas são as razões que podem motivar a construção de um sensor a fibras ópticas. Dentre elas podem ser citadas as necessidades de: grande linearidade de resposta, excelente performance dinâmica, elevada precisão na medida da grandeza e baixo custo.

Os sensores a fibras ópticas possuem muitas vantagens sobre os similares convencionais. Dentre elas, pode-se destacar que, em geral, são dispositivos passivos (não requerem fonte de alimentação elétrica no local da medida) e apresentam imunidade a interferências eletromagnéticas (*Electromagnetic Interference* - EMI) e a pulso eletromagnético (*Electromagnetic Pulse Interference* - EMP). Além disso, exibem características interessantes, tais como: pequenas dimensões, baixo peso, grande sensibilidade e ampla faixa de resposta em frequência. Contudo, em alguns campos de aplicação, os

sensores a fibras ópticas enfrentam a forte concorrência de outras tecnologias mais tradicionais de ampla aceitação, como, por exemplo, aquelas que utilizam componentes eletrônicos como sensores nas medidas.

Para atrair os usuários já acostumados com tecnologias tradicionais, a superioridade dos sensores a fibras ópticas sobre os outros tipos de sensores precisa ser claramente demonstrada. Os usuários típicos de tecnologias tradicionais não estão diretamente interessados nas técnicas específicas utilizadas nas medições das grandezas em foco, mas sim em obter sistemas sensores que possuam boa performance e a melhor relação possível entre custo e benefício. Conseqüentemente, sistemas sensores a fibras ópticas devem estar disponíveis de forma completa, ou seja, deve estar incluído no sistema sensor a transdução opto-eletrônica e o processamento eletrônico do sinal.

A literatura a respeito de sensores a fibras ópticas é ampla, e nela podemos encontrar abundantes informações a respeito deste assunto [1-9]. Dada a grande quantidade de material disponível, torna-se praticamente impossível revisar todas as tecnologias de sensores que utilizam fibras ópticas relatadas em artigos de revistas e outros periódicos.

Por outro lado, os congressos e conferências, nacionais e internacionais, proporcionam informações recentes a respeito das pesquisas e tendências na área de sensores a fibras ópticas. Por exemplo, Lee [10] sintetizou na forma de um gráfico, mostrado na Fig. 2.2, a distribuição dos artigos apresentados na 15ª *Optical Fiber Sensors Conference* (OFS-15), agrupados de acordo com as grandezas medidas. Nesse gráfico, os artigos que não se relacionavam diretamente a uma grandeza medida não foram incluídos na estatística e aqueles que, por sua vez, relacionavam-se a mais de uma grandeza, foram distribuídos igualmente entre as demais. Como pode ser visto nesse gráfico, as grandezas investigadas de maior interesse foram: deformação, temperatura, pressão, presença de agentes químicos, corrente e tensão elétricas. Nota-se que estas seis grandezas juntas somam quase 80% do total das grandezas consideradas e que os artigos relacionados com deformação e temperatura representam 50% desta soma.

Já o gráfico mostrado na Fig. 2.3 apresenta a distribuição das várias tecnologias empregadas nos sensores apresentados na OFS-15. Nele observa-se que os sensores baseados em interferometria de baixa coerência representam apenas 3,5% do total das tecnologias

apresentadas. A fatia do gráfico identificada como “outros” representa sensores a fibras ópticas baseados em conceitos mais simples, por exemplo, aqueles que usam como princípio de funcionamento a reflexão interna da luz na fibra óptica.

Figura 2.2. Distribuição dos artigos apresentados na OFS-15 de acordo com as grandezas medidas.

Figura 2.3. Distribuição de trabalhos apresentados na OFS-15 de acordo com as tecnologias empregadas na construção dos sensores.

Segundo Borges *et al.* [9], o advento das fibras ópticas tornou possível um avanço sem precedentes nos sistemas de telecomunicações como um todo. Esse avanço pode ser facilmente observado pelo leque de opções oferecido atualmente pelas operadoras de sistemas de telecomunicações, com destaque para a *internet* e os serviços multimídia de banda larga. Este avanço permitiu um gigantesco ganho de escala na produção e comercialização de produtos voltados para o mercado de comunicações ópticas, permitindo reduções nos custos de produção tanto de fibras ópticas quanto de dispositivos opto-eletrônicos (como foto-detectores e lasers) e fotônicos (como os circuitos em óptica integrada). Não demorou muito para que estes novos meios de transporte e processamento de informações, neste caso a fibra óptica e os circuitos em óptica integrada, encontrassem outras formas de aplicações, notadamente como sensores.

Podem-se definir sensores como dispositivos capazes de converter quantidades físicas ou químicas em sinais elétricos que podem ser transmitidos, processados, armazenados e interpretados. Os sensores ópticos são vistos como candidatos ideais para muitas aplicações, mas o sucesso comercial de um dispositivo sensor depende, basicamente, além de sua performance, do seu custo de produção e de sua confiabilidade. Estas duas últimas características ainda constituem, em muitos casos, os maiores empecilhos para a popularização dos sensores a fibras ópticas.

O fato de serem dispositivos dielétricos e, em geral, passivos, habilita os sensores a fibras ópticas a serem utilizados em ambientes onde haja o risco de explosões, como, por exemplo, instalações petrolíferas, onde existem gases inflamáveis, etc., mas o leque de aplicações dos mesmos não se limita apenas a estes casos.

De modo geral, os sensores ópticos podem ser divididos em sete classes distintas [9]: mecânicos, de radiação, térmicos, químicos, biomédicos, magnéticos e elétricos. Segue-se uma descrição resumida de cada uma dessas classes.

Mecânicos: Estes dispositivos constituem a maior classe de sensores ópticos comercialmente disponíveis. As grandezas medidas mais comuns são: deformação, força, pressão, velocidade, aceleração, rotação, deslocamento (posição) e vibração;

Radiação: Nesta classe os sensores medem basicamente: radiações ionizantes, intensidade de ondas eletromagnéticas, comprimento de onda, polarização e fase;

Térmicos: Este tipo de sensor constitui a segunda maior classe de sensores ópticos comercialmente disponíveis. Os tipos mais comuns de grandezas medidas são: temperatura, calor e fluxo de calor;

Químicos: Estes sensores são normalmente aplicados na medição da concentração de determinadas substâncias. São alguns exemplos: composição química, contaminação, pH e umidade;

Biomédicos: São dispositivos a fibras ópticas que atendem a várias aplicações nas áreas biomédicas. Além dos endoscópios ópticos usados na monitoração do interior do estômago e duodeno, são exemplos de sensores ópticos biomédicos as sondas utilizadas em várias áreas, tais como: em odontologia (na medida de fluxo de sangue em gengivas), em angiologia (monitoração de fluxo de sangue após reconstrução vascular e grau de arteriosclerose em artérias), em ortopedia (na monitoração de perfusão de sangue em tecidos após cirurgia) e em neurologia (no monitoramento da pressão intracraniana de pacientes com trauma craniano);

Magnéticos: São dispositivos utilizados na medição da intensidade de campos magnéticos, densidade de fluxo e magnetização;

Elétricos: São dispositivos destinados à medição de grandezas como tensão, corrente e campo elétrico. Os tipos mais comuns utilizados para a medição de tensão e campo elétrico utilizam-se dos efeitos Pockels e Kerr, enquanto que os sensores ópticos de corrente mais comuns baseiam-se no efeito Faraday.

Em se tratando do projeto de sensores, é de fundamental importância estudar como se dará a interação do dispositivo com a grandeza que deverá ser medida. Por este motivo, torna-se necessária uma discussão dos principais parâmetros que descrevem o desempenho do sensor. L. Ristic [7], diz que os parâmetros mais significativos nesse estudo são: sensibilidade absoluta, sensibilidade relativa, sensibilidade cruzada, resolução, precisão, desvio (ou *off-set*), faixa dinâmica e faixa de temperatura de operação. Desta forma, pode-se definir estes parâmetros como [9]:

Sensibilidade absoluta: Indica o quanto o sinal de saída do sensor se altera em função da mudança da grandeza a ser medida (seja esta mudança física ou química);

Sensibilidade relativa: É o mesmo que o anterior, mas neste caso as mudanças são normalizadas em relação ao sinal de saída quando a grandeza a ser medida é zero (ou quando o sensor não está submetido a qualquer tipo de influência);

Sensibilidade cruzada: É a mudança no sinal de saída devido à presença de mais de uma grandeza a ser medida;

Resolução: É a capacidade que indica a menor variação na grandeza a ser medida detectável pelo sensor;

Precisão: É o máximo erro percentual observado no sinal de saída do sensor em relação ao seu fundo de escala;

Desvio (ou *offset*): É o sinal observado na saída do sensor quando a grandeza a ser medida é zero (ou quando o sensor não está submetido a qualquer tipo de influência);

Faixa dinâmica: É a máxima diferença entre dois valores da grandeza a ser medida que podem ser corretamente detectados pelo sensor; e

Faixa de temperaturas de operação: É a faixa de temperaturas na qual a saída do sensor permanece dentro do erro especificado.

2.1.1 Configurações dos Sensores a Fibras Ópticas

Os sensores a fibras ópticas podem ser classificados em termos de como o elemento sensor é construído e se insere no enlace de comunicação a fibras ópticas. Com relação a isso, os sensores podem ser classificados como intrínsecos e extrínsecos.

2.1.2 Sensores Intrínsecos

Os sensores intrínsecos, também chamados de sensores totalmente a fibras ópticas, são aqueles em que o elemento sensor é formado por um trecho de fibra óptica, sendo assim é parte integrante do enlace de comunicação a fibras ópticas. Neste caso, a luz é modulada em resposta à atuação da grandeza a ser medida sem, contudo, deixar o guia de onda.

A Fig. 2.4 ilustra uma configuração clássica de sensor baseado em fibra óptica intrínseco. Pode-se observar neste tipo de sensor que a casca da fibra foi removida em um determinado trecho (a), sendo então substituída pela amostra a ser medida ou monitorada (b). Variações de índice de refração na amostra, provenientes de alterações na densidade do material, podem causar diminuição de confinamento modal (ou aumento, caso o índice de refração diminua), resultando em uma diminuição (ou aumento) da intensidade de luz detectada por um foto-detector acoplado ao final do enlace. Essas variações de intensidade são então relacionadas à grandeza a ser medida.

Figura 2.4. Sensor baseado em fibra óptica intrínseco: (a) casca da fibra removida em trecho sensibilizado, (b) casca da fibra substituída por amostra a ser monitorada.

A Fig. 2.5, abaixo, mostra um diagrama de blocos que ilustra os tipos mais importantes de sensores a fibras ópticas intrínsecos e a Tabela 2.1, a seguir, ilustra as grandezas passíveis de serem detectadas por sensores intrínsecos.

Figura 2.5. Diagrama de blocos como os tipos mais importantes de sensores ópticos intrínsecos.

Tabela 2.1 – Grandezas passíveis de serem medidas pelos sensores ópticos intrínsecos

[illegible]

2.1.3 Sensores Extrínsecos

São aqueles em que o elemento sensor não é constituído de fibra óptica, podendo ser ou não parte integrante do enlace óptico que constitui o sistema de transmissão de sinais. Sendo assim, a luz deixa o guia de onda para então ser modulada pela grandeza a ser medida. Uma vez modificada pela grandeza, a luz é então acoplada novamente na seção seguinte de fibra óptica. Nesta categoria de sensores estão os moduladores Pockels e os moduladores Faraday que utilizam montagem volumétrica e os sensores eletro-ópticos integrados.

A Fig. 2.6 ilustra uma configuração clássica de sensor baseado em fibra óptica extrínseco.

Figura 2.6. Sensor a fibras ópticas extrínseco.

O diagrama de blocos mostrado na Fig. 2.7, a seguir, ilustra as configurações mais comumente encontradas nos sensores ópticos extrínsecos.

A Tabela 2.2, também a seguir, mostra as grandezas passíveis de serem medidas pelos sensores ópticos extrínsecos.

Figura 2.7. Diagrama de blocos com os tipos mais importantes de sensores ópticos extrínsecos.

Tabela 2.2 - Grandezas passíveis de serem medidas pelos sensores ópticos extrínsecos.

Grandeza →	Aceleração	Análise Química	Acústico	Esforço	Fluxo	Nível de Líquido	Pressão	Posição	Temperatura	Vibração	Viscosidade
Encoder											
Transmissão e Reflexão											
Reflexão Total Interna											
Rede de Bragg											
Fluorescência											
Evanescente											
Doppler											
Absorção											
Fotoelástico											
Pirômetro											

Existe um grande número de efeitos físicos ou químicos exibidos por vários materiais ópticos que afetam a propagação de luz polarizada (fotoelasticidade, efeito Faraday, efeito Kerr e Pockels, etc.) e que compartilham uma característica comum: a de serem induzidos externamente de alguma maneira. Em todos estes casos alguma influência externa (força mecânica, campo magnético, campo elétrico, etc.) é exercida sobre o meio óptico modificando assim a maneira como a luz é transmitida. Neste contexto, pode-se definir uma classe de dispositivos chamados moduladores, que por meio de algum efeito ou interação de grandezas físicas ou químicas com o material de que são feitos, traduzem diretamente para a forma luminosa as informações contidas naquela grandeza.

Quanto à técnica de modulação, os sensores a fibra óptica podem ser divididos em cinco grupos distintos [5-6]: os sensores com modulação em intensidade (ou amplitude), sensores com modulação em fase (ou interferométricos), os sensores com modulação em comprimento de onda, os sensores de polarização (ou polarimétricos) e os sensores com modulação em espectro óptico.

2.2 Técnicas de Modulação de Sensores Ópticos

2.2.1 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Intensidade

Neste tipo de sensor o efeito físico empregado induz diretamente a variação da intensidade de um feixe de luz de referência. Esta configuração é encontrada tanto em sensores a fibra óptica intrínsecos como extrínsecos. Exemplos típicos destes sensores são os sensores de microcurvatura e de macrocurvatura.

a) Sensores de Microcurvatura

Este é o mais primitivo dos sensores a fibra óptica intrínsecos. Seu funcionamento consiste no fato de perturbações mecânicas em uma fibra multimodo causarem uma redistribuição de potência óptica da luz entre os muitos modos da fibra. Quanto maior for a perturbação mecânica, mais luz será acoplada aos modos de irradiação, que será perdida pela casca da fibra.

Comercialmente, podem se encontrados alguns sensores de microcurvatura com aplicação na medida de várias grandezas, como temperatura, velocidade, força, aceleração e pressão. O esquema típico de um sensor de microcurvatura é mostrado na Fig. 2.8. Este sensor possui placas dentadas que causam deformação da fibra óptica gerando microcurvatura induzida.

Figura 2.8. Esquema básico de um sensor de microcurvatura. (a) configuração típica, e (b) detalhe das placas dentadas.

b) Sensores de Macrocurvatura

Neste tipo de sensor, quando um determinado raio luminoso que se propaga em uma fibra óptica incide na região onde existe uma curvatura, com um ângulo abaixo do ângulo crítico, sofrerá refração na casca da fibra. Assim, parte da potência óptica será perdida através da casca, provocando uma variação na intensidade luminosa vista pelo fotodetector na saída da fibra. O esquema simplificado de operação deste tipo de sensor é mostrado na Fig. 2.9, abaixo.

Figura 2.9. Sensor de macrocurvatura.

2.2.2 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Fase

São também conhecidos como interferômetros a fibra óptica, pois sua configuração permite que uma perturbação externa provoque uma diferença de fase entre os feixes de luz que se propagam nos dois braços de um interferômetro sensor. São, em geral, do tipo intrínseco e utilizam fibras monomodo.

De uma forma geral, estes sensores são os que apresentam o melhor desempenho entre todos os tipos de sensores ópticos e podem ser baseados em óptica volumétrica ou em óptica integrada. O princípio de operação em ambos os casos é o mesmo, e pode ser mais facilmente explicado por meio da Fig. 2.10, que apresenta, como exemplo, um interferômetro tipo Mach-Zehnder a fibras ópticas. A luz lançada na entrada 1 é dividida igualmente por um acoplador direcional de 3dB (50%) entre os dois braços do interferômetro. Em um dos braços o feixe irá se propagar sem perturbação e, portanto, é chamado de braço de referência. O outro braço é utilizado como elemento sensor e a grandeza que se quer medir será aplicada nele. A perturbação produzida neste braço produz uma variação na fase da luz que por ele se propaga. Quando esta luz é recombinada pelo segundo acoplador direcional de 3 dB com a luz proveniente do braço de referência, produzir-se-á interferência e assim, aparecerão nas saídas do dispositivo variações de intensidade óptica proporcionais ao seno e ao cosseno da diferença de fase existente entre os feixes de luz.

Figura 2.10. Esquema de um sensor a fibras ópticas utilizando a configuração Mach-Zehnder.

2.2.3 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Comprimento de Onda

É um tipo de sensor intrínseco fabricado em uma seção de fibra óptica cujo índice de refração é alterado periodicamente. Esta alteração periódica atua como um espelho parcialmente refletor. Quando a luz incidente ocorre no comprimento de onda correto, todas as ondas parcialmente refletidas coerentemente serão adicionadas e a amplitude da onda refletida será máxima. Para todos os outros comprimentos de onda a reflexão na estrutura será menor.

Esta estrutura periódica é conhecida como rede de Bragg e uma deformação ou variação de temperatura na região onde se encontra esta rede provoca alteração no comprimento de onda refletido. Os sensores de Bragg podem ser utilizados para medir força, temperatura e pressão. Um exemplo típico de estrutura periódica é mostrado na Fig. 2.11, a seguir.

Figura 2.11. Sensor em redes de Bragg a fibra óptica.

2.2.4 Sensores a Fibra Óptica com Modulação em Polarização

Nos sensores ópticos com modulação em polarização (ou polarimétricos), o elemento sensor modifica o padrão ou o ângulo de polarização da luz que se propaga por ele. Posteriormente esta modulação é convertida em intensidade pelo uso de um analisador de estado de polarização, ou seja, um polarizador disposto adequadamente no caminho óptico. Os exemplos mais importantes de sensores deste tipo são os moduladores eletro-ópticos baseados no efeito Pockels [11,13-14] e no efeito Kerr [12] e os magneto-ópticos baseados no efeito Faraday [12].

2.2.5 Sensores a Fibra Óptica com Modulação por Espectro

Os moduladores de espectro óptico são também conhecidos como Interferômetros de Luz Branca (*White Light Interferometry* - WLI) ou (*Fiber Optic Low Coherence Interferometry* - FOLCI). Utiliza-se na construção deste modulador, um interferômetro que separa duas componentes da luz proveniente de uma fonte óptica de espectro largo (luz Branca) e introduz entre elas um grande atraso de fase, maior que o comprimento de coerência da luz empregada. Este atraso de fase é chamado de diferença de caminho óptico (*Optical Path Difference* - OPD). Na saída deste modulador obtém-se um feixe óptico que se encontra modulado em conteúdo espectral. Para se recuperar a informação introduzida na luz por um modulador deste tipo pode-se aplicar sua saída a um analisador de espectro óptico ou a um segundo interferômetro que introduza entre as componentes da onda óptica um OPD idêntico ao introduzido pelo primeiro interferômetro.

Uma das principais vantagens dos sensores baseados em WLI, em relação aos sensores a fibras ópticas baseados em intensidade ou polarimétricos [15], é que o valor da medida em sua saída pode ser tornado praticamente insensível a flutuações de potência óptica que ocorram ao longo do enlace óptico utilizado para conectar o sensor à unidade de processamento. Além disso, ele pode oferecer características de resolução e faixa dinâmica muito maiores que os sensores convencionais, o que faz esta técnica, conseqüentemente, ser muito promissora para uma grande variedade de aplicações.

A interferometria de baixa coerência é um fenômeno muito bem descrito pela óptica clássica [1,2] e o uso da técnica foi primeiramente relatado por Al-Chalabi et al [16] em 1983, embora seu princípio de operação tenha sido proposto originalmente em 1975 e demonstrado em 1976 como um possível método de transmissão para uso em comunicações ópticas [17]. O primeiro sistema sensor desenvolvido baseado na técnica de WLI foi reportado em 1984, por Bosselmann and Ulrich [18], em um sensor para medida de deslocamento que utilizava como fonte de luz uma lâmpada convencional. Segundo Rao e Jackson [15], os vários trabalhos publicados neste período serviram para mostrar que a técnica WLI também poderia ser aplicada adequadamente na medida de outras grandezas físicas com elevada precisão. Durante o período de 1985–1989, uma grande quantidade de sensores ópticos baseados em WLI foram apresentados à comunidade científica, sendo a sua grande maioria composta de sensores de temperatura [19-20], deformação [21-22] e pressão [23].

2.3 Princípio de Funcionamento do Interferômetro WLI

Conforme descrito por J.C. Santos [14], em um interferômetro, a interferência ocorre quando a radiação segue por caminhos diferentes da fonte de luz até o ponto de detecção. Faixas luminosas e escuras são observadas e chamadas de franjas de interferência e podem ser descritas como a intensidade resultante da adição vetorial das amplitudes da radiação que podem atingir um certo ponto após percorrerem caminhos diferentes. Considerando esta radiação como sendo duas ondas luminosas monocromáticas linearmente polarizadas, quando elas estão sobrepostas na mesma direção de propagação a intensidade resultante I em um determinado ponto é dado pela Eq. (2.1), abaixo [1]:

$$I = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \Delta\phi \quad (2.1)$$

onde $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ é a diferença de fase entre as duas ondas luminosas e U_1 e U_2 são as suas respectivas amplitudes.

Embora este resultado tenha sido deduzido para a luz linearmente polarizada e perfeitamente monocromática, ele também pode ser aplicado a qualquer par de ondas em que todo o espectro individual e as componentes de polarização tenham a mesma relação de fase e amplitude. Tais tipos de ondas são chamadas totalmente coerentes.

Interferometria é a técnica derivada da interferência, que é a observação experimental do fenômeno de coerência. A teoria de coerência é uma descrição estatística da radiação expressa em termos de funções de correlação. Já que a fonte de luz não é completamente coerente, a coerência temporal de uma fonte de luz real pode ser representada pela função de auto-correlação $\gamma_{11}(\tau)$, que é uma quantidade complexa definida por [1]:

$$\gamma_{11}(\tau) = |\gamma_{11}(\tau)| e^{i\phi_{12}(\tau)} \quad (2.2)$$

A quantidade $\phi_{12}(\tau)$ é o ângulo de fase entre os campos luminosos e $|\gamma_{11}(\tau)|$ representa o grau de coerência e pode estar situado entre $0 \leq |\gamma_{11}(\tau)| \leq 1$ de forma tal que:

$$|\gamma_{11}(\tau)| = 1 \rightarrow \text{limite de coerência total,}$$

$$|\gamma_{11}(\tau)| = 0 \rightarrow \text{limite de incoerência total e}$$

$$|\gamma_{11}(\tau)| < 1 \rightarrow \text{coerência parcial}$$

Os instrumentos ou sistemas utilizados para fazer interferometria, chamados interferômetros, são tradicionalmente classificados pelo número de feixes que interferem e pelo método usado para separar estes feixes. Um interferômetro pode ser classificado como sendo de dois feixes ou de múltiplos feixes de acordo com o número de feixes que interferem. Quanto à separação dos feixes elas podem ser por divisão da frente de onda ou por divisão de amplitude.

Para os sensores interferométricos à fibra óptica, são usados, geralmente, dois interferômetros de divisão de amplitude. Neste tipo de interferômetro, dois divisores de feixe são utilizados: um para dividir o feixe luminoso inicial em dois feixes e que após viajarem por diferentes braços do interferômetro, serão recombinados no segundo divisor, no final destes braços. Se os braços possuírem comprimentos diferentes (L_1 e L_2), por exemplo, a diferença de fase entre os dois feixes luminosos que será introduzida é proporcional à diferença de caminho óptico, $\Delta L = L_1 - L_2$. Se I_1 e I_2 forem as intensidades luminosas destes dois feixes, após a recombinação deles (se as propriedades de polarização da luz forem mantidas) a intensidade resultante dependerá da coerência temporal da fonte e será dada por [14]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{11}(\tau)| \cos \Delta\phi(t) \quad (2.3)$$

onde: $\tau = \frac{L_1 - L_2}{c} = \frac{\Delta L}{c}$ é a diferença de tempo,

c é a velocidade da luz no vácuo,

$\Delta\phi$ é a diferença de fase óptica e pode ser escrita como:

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L \quad \text{e} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.4)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz no vácuo.

Um padrão de interferência aparece se o valor absoluto de $\gamma_{11}(\tau)$ diverge de zero. Em um padrão de franjas de interferência, a intensidade varia entre dois limites: a intensidade máxima e a intensidade mínima, $I_{\max}$ e $I_{\min}$, respectivamente. A visibilidade das franjas pode então ser definida como sendo a razão [1]:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad \text{ou} \quad K = K_o |\gamma_{11}(\tau)| \quad (2.5)$$

onde: K_o é a visibilidade da franja central, que corresponde a uma diferença de caminho óptico igual a zero ($OPD=0$), que equivale a $\tau=0$. Fazendo $K_o = 2 \frac{(I_1 \cdot I_2)^{1/2}}{I_1 + I_2}$ e substituindo este resultado na Eq. (2.3), obtemos:

$$I = (I_1 + I_2) [1 \pm K \cos \Delta\phi(t)] \quad (2.6)$$

O padrão de intensidade de saída de um interferômetro de luz branca possui um perfil de visibilidade dado pela Eq. (2.5) determinado pela propriedade de baixa coerência da fonte de banda larga utilizada. A distribuição do espectro de intensidade de uma fonte óptica de banda larga típica pode ser representada, aproximadamente, por uma função gaussiana, tal como:

$$I(\sigma) = \frac{I_o}{\sqrt{\pi} \delta\sigma} e^{-\left[\frac{\sigma - \sigma_o}{\delta\sigma}\right]^2} \quad (2.7)$$

onde: $\sigma = 1/\lambda$ é o número de onda de uma componente espectral,

σ_o é o número de onda central da fonte luminosa,

$\delta\sigma$ é a largura da banda espectral e

I_o é a intensidade em σ_o .

Neste caso, o comprimento de coerência da fonte L_c é dado, aproximadamente, por [14]:

$$L_c \cong \frac{1}{\delta\sigma} \cong \frac{\lambda_o^2}{d\lambda} \quad (2.8)$$

Visto que a saída de um interferômetro é, em teoria, a transformada de Fourier do espectro da fonte e, a transformada de Fourier de uma função gaussiana é também uma função gaussiana, deduz-se que o padrão de intensidade de saída normalizado de um interferômetro de luz branca é uma função cosseno modificado por um perfil de visibilidade gaussiano.

Uma das maneiras de se construir um sistema de sensoriamento utilizando a técnica WLI é baseada na conexão em série de dois interferômetros. De uma forma genérica, o princípio de funcionamento de um sistema de sensoriamento WLI deste tipo pode ser explicado da seguinte maneira: A luz emitida de uma fonte espectral de luz de banda larga (um SLD por exemplo) é acoplada a uma fibra óptica que é conectada ao divisor de feixe localizado na entrada de um sensor interferométrico. A diferença de caminho óptico introduzido pelo interferômetro sensor, ΔL_s é linearmente sensível à grandeza externa a ser medida. No caso da fonte de luz ser de banda larga, com um comprimento de coerência pequeno, se o OPD introduzido pelo interferômetro sensor for maior que o comprimento de coerência L_c da fonte, não será observada nenhuma interferência na saída do interferômetro sensor. Se a luz que sai do interferômetro sensor for acoplada a uma outra fibra óptica e introduzida em um segundo interferômetro, chamado interferômetro recuperador, pode-se observar interferência em sua saída se, e somente se, a diferença de caminho óptico introduzida pelo interferômetro recuperador, ΔL_r , se aproximar da que foi introduzida no interferômetro sensor, ΔL_s .

Uma demonstração analítica deste princípio pode ser feita usando a Eq. (2.6) e omitindo a dependência espectral do OPD. O comportamento do interferômetro sensor pode ser descrito pela seguinte relação:

$$I_s(\sigma) = T_1 T_s I_o(\sigma) [1 + K_s \cos(2\pi\sigma\Delta L_s)] \quad (2.9)$$

onde: T_1 é o fator de transmissão do enlace óptico de ida,

T_s é o fator de transmissão do interferômetro sensor,

K_s é a visibilidade dada pela equação (2.5) e

$I_o(\sigma)$ é a distribuição de intensidade espectral da fonte luminosa.

Analogamente, o comportamento do interferômetro recuperador pode ser descrito como:

$$I_r(\sigma) = T_2 T_r I_s(\sigma) [1 + K_r \cos(2\pi\sigma\Delta L_r)] \quad (2.10)$$

onde: T_2 é o fator de transmissão no *link* óptico de volta,

T_r é o fator de transmissão do interferômetro recuperador e

K_r é a visibilidade do interferômetro recuperador.

A intensidade total disponível na saída do sistema interferométrico, é calculada pela integração da equação (2.11), sobre todos os números de onda:

$$I = \int_{\sigma} I_r(\sigma) d\sigma \quad (2.11)$$

Se a fonte tem uma distribuição espectral gaussiana, esta integral torna-se [14]:

$$I = T_1 T_2 T_s T_r I_o \left[1 + \frac{1}{2} K_{os} K_{or} e^{-\left[\frac{\pi(\Delta L_s - \Delta L_r)}{L_c} \right]^2} \cos 2\pi \left(\frac{\Delta L_s - \Delta L_r}{\lambda_o} \right) \right] \quad (2.12)$$

A intensidade I resultante aparece como uma função cosseno do OPD modificado por uma visibilidade dependente da fase, exatamente como mostrado na Fig. 2.12. Verifica-se

que o sistema apresenta a vantagem de um espectrômetro de transformada de Fourier onde o sinal é proporcional à potência total de saída, e que a máxima visibilidade ocorre no ponto de casamento $\Delta L_s = \Delta L_r$.

Figura 2.12. Padrão teórico de intensidade de saída de um interferômetro de luz branca.

O OPD introduzido pelo interferômetro recuperador, ΔL_r , pode ser ajustado para se igualar ao OPD do interferômetro sensor quando a grandeza medida é igual a zero. Nesse caso, verifica-se através da Eq. (2.12) que, no ponto de casamento, a saída do interferômetro recuperador está no pico central da figura de interferência.

Se ΔL_r for fixo, verifica-se na Eq. (2.12) que a intensidade óptica na saída do sistema depende do ΔL_s , proporcional à grandeza a ser medida, e das transmissões dos componentes ópticos do sistema. Caso essas transmissões variem no tempo o resultado dessa variação será confundido com o sinal a ser medido, o que é indesejável. Para garantir a estabilidade da medida em relação à variação da potência óptica total transmitida pelo enlace faz-se necessário o uso de um método para eliminar esta dependência.

Neste trabalho, uma nova abordagem é proposta para eliminar a dependência do sinal de saída com a potência óptica transmitida em um sistema sensor WLI formado por um modulador eletro-óptico Pockels como interferômetro sensor e um interferômetro de birrefringência fixa como recuperador. Tal proposta será apresentada a partir do próximo capítulo.

2.4 Sensores Ópticos de Tensão

Sensores ópticos passivos de tensão são desenvolvidos em torno de moduladores eletro-ópticos, os quais, por sua vez, são construídos baseados no efeito eletro-óptico. Nesta sub-seção, são abordados aspectos relevantes como a descrição da natureza do efeito eletro-óptico, os moduladores por efeito Pockels e as configurações usuais de moduladores eletro-ópticos Pockels.

2.4.1 Efeito Eletro-óptico [2]

A propagação da luz num cristal pode ser descrita em termos do tensor de impermeabilidade $[\eta] = [\epsilon]^{-1}$, cujos elementos designamos por η_{ij} . Num sistema de coordenadas principais, onde o tensor tem representação diagonal obtemos o elipsóide de índices³ da Eq. 2.13:

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1 \quad (2.13)$$

onde x , y , z são as direções dos eixos principais (isto é, as direções no cristal segundo as quais $\vec{D}$ e $\vec{E}$ são paralelos), e onde $1/n_x^2$, $1/n_y^2$ e $1/n_z^2$ são os valores principais do tensor de impermeabilidade.

Os elementos do tensor caracterizam-se por valores que dependem da distribuição de cargas no interior do cristal. A aplicação de um campo elétrico externo provoca uma redistribuição dessas cargas causando, concomitantemente, uma variação dos valores dos elementos do tensor de impermeabilidade – efeito eletro-óptico.

A dependência desses valores relativamente ao campo elétrico aplicado é traduzida por um conjunto de coeficientes (coeficientes eletro-ópticos) e exprime-se tradicionalmente sob a forma:

$$\eta_{ij}(\vec{E}) = \eta_{ij}(0) + \underbrace{\left\{ \sum_k (r_{ij})_k E_k + \sum_{k,l} (s_{ij})_{kl} E_k E_l \right\}}_{\Delta\eta_{ij}} + \dots \quad (2.14)$$

onde ignoram-se as correções de ordem superior à segunda.

As constantes r_{ijk} constituem os coeficientes eletro-ópticos lineares, ou de Pockels e as constantes s_{ijkl} constituem os coeficientes eletro-ópticos quadráticos, ou de Kerr.

Dada a simetria do tensor $[\eta]$, pode-se, na Eq. (2.3) permutar os índices i e j . Por outro lado, se esta expressão for o resultado de um desenvolvimento em série, os coeficientes s_{ijkl} satisfarão a [2]:

$$s_{ijkl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \eta_{ij}}{\partial E_k \partial E_l} \right)_{E=0} \quad (2.15)$$

Sendo irrelevante a seqüência de derivação segue-se que os índices k e l podem também ser permutados.

Por conseqüência pode-se afirmar que

$$\begin{aligned} r_{ijk} &= r_{jik} \\ s_{ijkl} &= s_{jikl} = s_{jilk} = s_{ijlk} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Face a estas regras de permutação é conveniente, e habitual, para abreviar a notação, introduzir os chamados índices contraídos

$$\begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 11 & 12 & 13 \\ 21 & 22 & 23 \\ 31 & 32 & 33 \end{bmatrix}}^{ij} \leftrightarrow \begin{array}{c} \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 6 & 5 \\ 6 & 2 & 4 \\ 5 & 4 & 3 \end{bmatrix}}^I \\ \underbrace{\phantom{\begin{bmatrix} 1 & 6 & 5 \\ 6 & 2 & 4 \\ 5 & 4 & 3 \end{bmatrix}}}_k \end{array} \quad (2.17)$$

Com esta abreviação os coeficientes lineares r_{ijk} em número de 27 reduzem-se a 18, e os coeficientes quadráticos s_{ijkl} em número de 81 reduzem-se a 36 independentes.

Na presença de um campo elétrico aplicado o elipsóide de índices é dado pela forma quadrática

$$\sum_{ij} \eta_{ij}(\vec{E}) x_i x_j = 1 \quad (2.18)$$

com η_{ij} dado pela Eq. (2.14). Na ausência de campo elétrico aplicado o elipsóide reduz-se à forma simples dado pela Eq. (2.13).

2.4.2 Efeito Pockels [3]

O efeito Pockels, ou efeito eletro-óptico linear é, como o nome sugere, o termo linear em $\vec{E}$ da perturbação do tensor de impermeabilidade, envolvendo apenas os coeficientes r_{ijk} , com desprezo do termo quadrático.

Este desprezo é legítimo na grande maioria das aplicações dada a pequenez relativa do campo elétrico aplicado face ao campo elétrico inter-atômico (da ordem típica de 100 MV/cm). Ressalva-se no entanto uma classe especial de materiais (centro-simétricos) para os quais os coeficientes r_{ijk} são nulos, onde, por consequência, o efeito quadrático é o que se faz sentir dominantemente.

Dos materiais eletro-ópticos lineares de uso mais freqüente, há que destacar os seguintes: niobato de lítio (LiNbO_3), germanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$), o tantalato de lítio (LiTaO_3), dentre outros. As propriedades ópticas destes materiais são, em geral, dependentes da temperatura e do comprimento de onda da luz.

Substituindo a Eq. (2.13) e Eq. (2.14) na equação do elipsóide de índices em (2.18) e desprezando-se o termo quadrático, obtemos:

$$\sum_{ij} \eta_{ij}(0) x_i x_j + \sum_{ij} \left\{ \sum_k r_{ijk} E_k \right\} x_i x_j = 1 \quad (2.19)$$

procedendo à identificação $x_1 = x$, $x_2 = y$ e $x_3 = z$, e usando os índices contraídos virá:

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} + \sum_k \left\{ r_{1k} x^2 + r_{2k} y^2 + r_{3k} z^2 + 2r_{6k} xy + 2r_{5k} xz + 2r_{4k} yz \right\} E_k = 1 \quad (2.20)$$

Os eixos principais deste novo elipsóide não coincidirão com os eixos iniciais x , y e z (para $\vec{E} = 0$), e dependerão claramente do campo elétrico aplicado $\vec{E} = E_x \vec{u}_x + E_y \vec{u}_y + E_z \vec{u}_z$ bem como da natureza do material (através dos valores dos coeficientes r_{lk}).

O novo sistema de eixos principais (x', y', z') , pode ser sempre obtido por rotação apropriada do sistema primitivo não-perturbado, conduzindo a redução da forma quadrática à sua expressão elementar:

$$\left(\frac{x'}{n_{x'}}\right)^2 + \left(\frac{y'}{n_{y'}}\right)^2 + \left(\frac{z'}{n_{z'}}\right)^2 = 1 \quad (2.21)$$

2.4.3 Moduladores Eletro-ópticos

Moduladores eletro-ópticos são dispositivos passivos que traduzem diretamente para a forma luminosa as informações de uma determinada tensão. Eles não são transdutores, no sentido estrito do termo, pois não convertem energia da grandeza medida para o sinal e, por serem passivos, não geram a potência óptica que o porta.

Sendo assim, eles necessitam receber uma potência óptica de referência sobre a qual atuam, modulando (daí sua denominação) algumas de suas características como, intensidade, fase, padrão de Polarização ou mesmo direção de polarização.

Como os foto-deteciores, que são os responsáveis pela transformação dos sinais ópticos em elétricos, são sensíveis apenas à intensidade luminosa, ou potência óptica, todas as formas de modulação têm que ser convertidas, ao final, para modulação em intensidade. Isto é feito nos moduladores de fase por interferometria e nos moduladores de polarização por polarimetria.

É possível construir moduladores ópticos que sejam sensíveis a praticamente qualquer grandeza física, como por exemplo à temperatura, pressão, deslocamento, vibração, campos eletromagnéticos, etc.

Dentre esta infinidade de moduladores possíveis, o interesse deste trabalho está voltado para os eletro-ópticos. Em tais moduladores aproveita-se alguma propriedade de interação da luz propagante com um campo elétrico externo proporcionada pelo meio material, geralmente anisotrópico, pelo qual ela se propaga.

A radiação luminosa tem suas características de propagação associadas às grandezas permissividade elétrica ϵ e permeabilidade magnética μ , do meio. Num meio material homogêneo, linear e isotrópico essas grandezas são quantidades escalares enquanto que nos meios não-homogêneos elas são funções escalares de ponto. Nos meios anisotrópicos elas passam a ser tensores. Por fim, nos meios eletro-ópticos uma ou mais componentes do tensor dielétrico, ou de permissividade do meio, são funções da intensidade do campo elétrico no ponto.

Assim sendo, pode-se construir um modulador óptico sensível à tensão submetendo ao campo elétrico por ela gerado um meio material que apresente uma dependência de ϵ ou μ com campos externos. As manifestações resultantes desta dependência sobre a onda óptica propagante são chamadas de efeito eletro-óptico. Os principais efeitos empregados nos sensores ópticos de tensão são os efeitos Pockels e Kerr.

Quanto à direção de aplicação do campo elétrico, há duas configurações possíveis para os moduladores eletro-ópticos: a configuração longitudinal e a configuração transversal.

Na configuração longitudinal o campo elétrico é aplicado paralelamente à direção de propagação da luz. Para permitir a passagem do feixe luminoso os eletrodos devem ser feitos de material transparente ou vazados. Normalmente são utilizados óxidos metálicos depositados, filmes metálicos, grades ou anéis aplicados às faces opostas do elemento sensor, como ilustra a Fig. 2.13, abaixo:

Figura 2.13. Modulador eletro-óptico em configuração longitudinal.

Na configuração transversal o campo elétrico é colocado numa direção perpendicular à de propagação da luz. Nesta configuração a aplicação do campo elétrico é simplificada, podendo ser feita também através de placas metálicas ou tintas condutoras aplicadas nas superfícies laterais do elemento sensor, como na forma esquematizada na Fig. 2.14, abaixo:

Figura 2.14. Modulador eletro-óptico em configuração transversal.

2.4.4 Moduladores Eletro-ópticos em Configuração Longitudinal

No modulador polarimétrico em configuração longitudinal, como mostrado na Fig. 2.15, com a direção do eixo do polarizador cruzada com a direção do eixo do analisador, o atraso de fase induzido, Γ , entre as duas componentes ortogonais da luz será dado pela Eq. (2.22), abaixo [3]:

$$\Gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n \cdot L \quad (2.22)$$

Onde: λ é o comprimento de onda da luz,

Δn é a birrefringência induzida e

L é o comprimento do cristal.

Figura 2.15. Princípio do efeito eletro-óptico e do modulador eletro-óptico longitudinal.

Por exemplo, usando um cristal cúbico (do grupo de simetria $\bar{4}3m$) em um modulador longitudinal, e considerando que $V = E \cdot L$, a birrefringência induzida torna-se:

$$\Delta n = n_o^3 r_{41} \frac{V}{L} \quad (2.23)$$

onde: n_o é o índice de refração ordinário e r_{41} é o único coeficiente eletro-óptico relevante do cristal.

Neste caso, a tensão de meia onda, que é definida como sendo o valor de V que produz um deslocamento de π em Γ , é dado pela Eq. (2.22) [3]:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_o^3 r_{41}} \quad (2.24)$$

O atraso de fase total Γ , é a soma do atraso de fase eletricamente induzido, com uma parte adicional ϕ_r , introduzida pela lâmina retardadora, e pode ser escrita como:

$$\Gamma_t = \phi_r + \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (2.25)$$

Considerando que $\phi_r = \pi/2$, a intensidade da luz transmitida, T , que é a relação entre a intensidade da luz de saída e a de entrada, como uma função da tensão aplicada $V(t)$ é dada pela Eq. (2.26), abaixo:

$$I_o = I \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right) \text{ ou}$$

$$\frac{I_o}{I} = \sin^2\left(\frac{\Gamma}{2}\right), \text{ logo:}$$

$$T = \frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}\pi \frac{V(t)}{V_\pi}\right) \quad (2.26)$$

A curva de resposta (tensão aplicada versus intensidade de luz na saída) para este tipo de modulador é mostrada na Figura 2.16, a seguir.

Figura 2.16. Curva de resposta do modulador Pockels para uma tensão senoidal aplicada no cristal.

No próximo capítulo, será apresentada uma nova abordagem para medida de potenciais em altos níveis de tensão que utiliza um sensor eletro-óptico polarimétrico por efeito Pockels na configuração longitudinal associado a um interferômetro polarimétrico de birrefringência fixa numa aplicação da técnica de interferometria de luz branca. Também será descrita uma nova técnica de processamento eletrônico dos sinais provenientes do sistema de sensoriamento óptico capaz de reduzir drasticamente a sensibilidade da medida a atenuações da potência óptica introduzidas no enlace de fibras.

3. Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos específicos em que se baseia a aplicação da técnica WLI a transformadores ópticos de medições em altas tensões. São também apresentadas as descrições dos componentes e dispositivos selecionados, desenvolvidos e utilizados na montagem de um protótipo de transformador óptico para medição em altas tensões, o qual foi empregado para demonstrar a viabilidade do uso da técnica WLI nesse tipo de aplicação.

Como citado no capítulo anterior, o transformador óptico para medições em altas tensões proposto utiliza um sensor eletro-óptico polarimétrico por efeito Pockels na configuração longitudinal, especialmente construído para ser submetido a elevados níveis de tensão, associado a um interferômetro polarimétrico de birrefringência fixa numa aplicação da técnica de interferometria de luz branca. Para esclarecer o princípio de funcionamento desse arranjo, são apresentados a seguir: o modulador Pockels como interferômetro de birrefringência, o equacionamento da resposta de um sistema WLI constituído pelo modulador Pockels ligado em série com um interferômetro birrefringente de atraso de fase fixo, a topologia do transformador óptico de alta tensão usando a configuração WLI, os detalhes da construção do protótipo e do circuito de demodulação eletrônica dos sinais empregado nos testes.

3.1 Método de Interferometria de Luz Branca (WLI) Aplicado à Medição de Tensão Elétrica

3.1.1 Modulador Pockels como Interferômetro de Birrefringência

Como descrito anteriormente, são utilizados, no protótipo de transformador óptico de alta tensão em configuração WLI construído, dois interferômetros de birrefringência nos quais são introduzidos atrasos de fase fixos elevados. Desta forma, o OPD resultante na saída do primeiro interferômetro, que é um modulador eletro-óptico Pockels próprio para ser submetido a elevadas tensões, também chamado de sensor primário, é sempre muito maior que o comprimento de coerência da fonte óptica, o que garante que a informação esteja codificada somente no espectro da luz e não em sua intensidade.

A Fig. 2.15, apresentada no capítulo anterior, ilustra o esquema do modulador eletro-óptico utilizado na célula sensora de alta tensão do transformador óptico construído e é em sua essência, um interferômetro de birrefringência. Assumindo-se que as duas componentes da luz incidente, que estão polarizadas paralelamente ao eixo x e y , são dois feixes separados da mesma onda luminosa e com intensidades I_x e I_y , respectivamente. Cada uma dessas componentes viaja ao longo de um caminho de mesmo comprimento L , mas com diferentes índices de refração, n_x e n_y , respectivamente. A diferença entre esses dois índices de refração (Δn) é a birrefringência. Considerando que o cristal de BGO não apresenta birrefringência natural, com a introdução de uma lâmina retardadora que apresenta uma birefringência própria, Δn_c , a birrefringência total será dada pela soma das birrefringências, natural e induzida, por:

$$\Delta n = \underbrace{\Delta n_c}_{\text{fixa}} + \underbrace{n_o^3 r_{41} \frac{V}{L}}_{\text{induzida}} \quad (3.1)$$

onde: Δn_c é a birrefringência da lâmina retardadora,

n_o é o índice de refração ordinário do cristal e

r_{41} é o coeficiente eletro-óptico do cristal.

Portanto, uma diferença de fase óptica $\Gamma (= \Delta \phi)$ é introduzida entre as duas componentes da luz na saída do cristal e é dada por:

$$\Gamma = \Delta \phi(t) = \Delta \phi_c + \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{41} V \quad (3.2)$$

onde $\Delta \phi_c$ é o atraso de fase óptico fixo introduzido pela lâmina retardadora.

A diferença de caminho óptico ΔL correspondente a este atraso de fase óptico é dado pela Eq. (3.3):

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi(t) \quad \rightarrow \text{diferença de caminho óptico} \quad (3.3)$$

onde:

$$\Delta\phi(t) = \Delta\phi_c + \frac{2\pi}{\lambda} n_o^3 r_{41} V \quad \rightarrow \text{diferença de fase óptica} \quad (3.4)$$

Substituindo-se a Eq. (3.2) na Eq. (3.3), obtém-se:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi_c + n_o^3 r_{41} V ,$$

logo:

$$\Delta L = \Delta L_c + n_o^3 r_{41} V \quad (3.5)$$

Onde: $\Delta L_c = \frac{\lambda}{2\pi} \Delta\phi_c$ é o OPD introduzido pela lâmina retardadora. A partir desta equação encontramos que o OPD total deste interferômetro é independente do comprimento de onda, desde que r_{41} possa ser considerado fixo na banda espectral da fonte, e é linearmente dependente da tensão aplicada.

Já que os dois feixes possuem direção de polarização cruzadas eles não interferem entre si. A recombinação dos feixes será feita pelo analisador, que é na verdade um polarizador com a direção de polarização orientada em -45° com respeito ao eixo x .

Como estes dois feixes possuem a mesma intensidade ($I_x = I_y$) e apenas a metade da intensidade de cada feixe é transmitida pelo analisador, a visibilidade da franja é $K_{os} = 1$ e o fator de transmissão deste interferômetro de sensoriamento será:

$$T_s = \frac{1}{2} \alpha_s \quad (3.6)$$

onde: α_s é a atenuação introduzida na luz transmitida pelo interferômetro sensor devido a fatores tais como reflexões, espalhamento, absorção, falta de alinhamento, etc.

Como já foi dito anteriormente, o comportamento deste interferômetro é dado pela Eq. (2.8) e substituindo a Eq. (3.5), a Eq. (3.6) e $K_s = K_{os} = 1$ nesta equação, obtemos:

$$I_s(\sigma) = T_1 \frac{1}{2} \alpha_s I_o(\sigma) \left[1 + \cos 2\pi \sigma (\Delta L_c + n_o^3 r_{41} V) \right] \quad (3.7)$$

3.1.2 Sistema WLI Constituído pelo Modulador Pockels Ligado em Série com um Interferômetro Birrefringente de Atraso de Fase Fixo

Se um segundo interferômetro birrefringente com atraso de fase fixo ΔL_r for acoplado em série com o interferômetro sensor descrito anteriormente, o comportamento global do sistema sensor interferométrico de luz branca obtido será dado, analogamente à Eq. (2.12), pela Eq. (3.8) abaixo:

$$I = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_r T_1 T_2 I_o \left\{ 1 + \frac{1}{2} e^{-\left\{ \left[(\Delta L_s - \Delta L_r) + n_o^3 r_{41} V_s \right] \frac{\pi}{L_c^2} \right\}} \cos 2\pi \frac{(\Delta L_s - \Delta L_r) + n_o^3 r_{41} V_s}{\lambda_o} \right\} \quad (3.8)$$

onde os índices s e r referem-se aos valores para o interferômetro sensor e recuperador, respectivamente. Para que este sistema sensor funcione próximo à franja central, as diferenças de caminho óptico introduzidas pelas lâminas retardadoras dos interferômetros sensor e recuperador devem ser iguais entre si, de forma que $\Delta L_s = \Delta L_r$, e a Eq. (3.8) torna-se:

$$I = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_r T_1 T_2 I_o \left\{ 1 + \frac{1}{2} e^{-\left\{ \left[n_o^3 r_{41} V_s \right] \frac{\pi}{L_c^2} \right\}} \cos 2\pi \frac{n_o^3 r_{41} V_s}{\lambda_o} \right\} \quad (3.9)$$

3.1.3 Técnica de WLI Aplicada ao Sensor Pockels de Alta Tensão para Construção de Transformador Óptico de Alta Tensão

O sensor Pockels polarimétrico descrito anteriormente tem a inconveniência de mostrar uma dependência no sinal de luz de saída com a atenuação no enlace de comunicação de fibra óptica. Já foram reportados alguns métodos que tentam evitar tal dependência e que faz uso de processamento eletrônico do sinal [24]. No presente trabalho é proposto um novo método no qual a técnica de WLI desempenha o papel principal.

No interferômetro de luz branca a luz emitida de uma fonte de espectro amplo é dividida em duas partes que são levadas a propagar-se por caminhos ópticos de comprimentos diferentes. Após percorrerem estes dois caminhos, as duas componentes de luz são recombinadas para interferir mas, se a diferença de caminho óptico (OPD) for maior do que o comprimento de coerência (L_c) da fonte luminosa, diz-se que as duas componentes não estão correlacionadas (não existe correlação entre eles) e a interferência é muito fraca para ser detectada. Neste ponto a informação da interferometria é codificada no espectro da luz [14]. Se um interferômetro construído deste modo (tendo $OPD \gg L_c$) é usado como um sensor, para recuperar a informação introduzida no espectro da luz é necessário fazer a luz que emerge de sua saída se propagar através de um segundo interferômetro. No interferômetro recuperador o OPD deve ser igual ao OPD presente no interferômetro sensor.

No caso do presente trabalho, para recuperar o sinal interferométrico, um simples interferômetro recuperador composto de uma lâmina retardadora inserida entre dois polarizadores alinhados é colocado em série com a fibra óptica no caminho de volta do sistema sensor. A potência óptica na saída do interferômetro recuperador, I_o , é dada pela Eq. (3.10):

$$I_o = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_r I_i \left\{ 1 + \frac{1}{2} e^{-\left(\frac{\pi \Delta L}{L_c}\right)^2} \cos 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda_o} \right\} \quad (3.10)$$

Onde: I_i é a potência óptica na entrada do sistema (saída do SLD),

α_s é a atenuação da luz do SLD na saída do interferômetro sensor,

λ_o é o comprimento de onda central da fonte luminosa e

ΔL é o OPD total no sistema sensor, dado por: $\Delta L = \Delta L_s - \Delta L_r$.

A lâmina retardadora usada no interferômetro recuperador é idêntica a uma usada no interferômetro sensor. De qualquer modo, ele está preso por um suporte posicionador especial que pode girar em torno de dois eixos para permitir um ajuste fino no OPD introduzido. Com a capacidade de girar os dois eixos, é possível ajustar o OPD no interferômetro recuperador de modo que: $\Delta L_r = \Delta L_s - \frac{\lambda_o}{4}$. Em tal condição, da Eq. (3.10), I_o torna-se:

$$I_o = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_r I_i \left\{ 1 + \frac{1}{2} e^{-\left[\frac{\frac{\lambda_o}{2} \left(\pi \frac{V}{V_\pi} - \frac{\pi}{2} \right)}{L_c} \right]^2} \cos \left(\pi \frac{V}{V_\pi} - \frac{\pi}{2} \right) \right\} \quad (3.11)$$

Em aplicações práticas L_c é muito maior do que λ_o , o termo exponencial na equação (3.11) permanece próximo da unidade quando $|V| < V_\pi$. Então, I_o pode ser aproximado por:

$$I_o = I_o^- \left(1 + \frac{1}{2} \sin \pi \frac{V}{V_\pi} \right) \quad (3.12)$$

onde: $I_o^- = \frac{1}{4} \alpha_s \alpha_r I_i$ é a intensidade média da onda luminosa de saída.

A curva de resposta para este tipo de sistema sensor, mostrada na Fig. 3.1 abaixo, é similar a curva de resposta do modulador polarimétrico Pockels, mostrado na Fig. 2.16 do

capítulo anterior. No entanto apresenta um nível médio $I_{\bar{o}}$ diferente de metade do valor máximo, como era no caso anterior.

Figura 3.1 – Curva de resposta do sistema sensor WLI para uma tensão senoidal aplicada no interferômetro sensor.

3.1.4 Transformador Óptico de Alta Tensão Usando a configuração WLI

Como no sensor polarimétrico Pockels descrito antes, também no sistema sensor WLI descrito há pouco, há uma dependência da intensidade da luz, I_o , que transporta a medida da tensão aplicada, na atenuação total do sistema, α_t .

Para tirar proveito da técnica WLI e eliminar tal dependência, foi desenvolvido um transformador óptico de alta tensão como mostrado na Fig. 3.2, abaixo:

Figura 3.2. Transformador óptico de alta tensão que usa configuração WLI.

A intensidade da luz na saída do interferômetro sensor, I_{os} , é dada por:

$$I_{os} = \frac{1}{2} \alpha_s I_i \left\{ 1 + e^{-(\pi \Delta L_s / L_c)^2} \cos 2\pi \frac{\Delta L_s}{\lambda_o} \right\} \quad (3.13)$$

Desde que, $\Delta L_s \ll L_c$, o termo exponencial da Eq. (3.13) tende a zero. Portanto, I_{os} reduz-se a:

$$I_{os} = \frac{1}{2} \alpha_s I_i = \frac{2}{\alpha_r} I_{\bar{o}} \quad (3.14)$$

Colocando-se um acoplador óptico entre a saída do interferômetro sensor e a entrada do interferômetro recuperador, é possível “desviar” uma amostra de I_{os} , que é detectada pelo fotodetector (Det.2) e usada para compensar a intensidade de luz na saída do interferômetro recuperador para qualquer variação na atenuação total, α_t . Usando um acoplador óptico de 3 dB a intensidade de luz que chega é dividida em duas partes iguais entre as duas saídas. Portanto, a intensidade de luz que alcança os detectores (Det.1) e (Det.2) na Fig. 3.2, são, respectivamente:

$$I'_o = \alpha_{ex} \frac{I_o}{2} \quad \text{e} \quad I'_{os} = \alpha_{ex} \frac{I_{os}}{2} = I_o \frac{\alpha_{ex}}{\alpha_r} \quad (3.15)$$

Onde α_{ex} é a perda por excesso do acoplador óptico.

3.2 Protótipo Construído

Uma das partes práticas desta pesquisa é o desenvolvimento de um modulador eletro-óptico, baseado em interferometria de luz branca (WLI), utilizando efeito Pockels, acondicionada em uma montagem adequada em termos elétricos, ópticos e mecânicos, para ser submetida a níveis elevados de tensão, denominada célula sensora. Esta célula é a parte principal de um transformador de potencial óptico voltado para aplicações em instalações de potência.

O transformador óptico para medida de altas tensões aqui proposto, compõem-se de quatro elementos básicos, que são: o modulador eletro-óptico especial, ou sensor primário, que consiste no conjunto do modulador eletro-óptico mais as montagens mecânicas, elétricas e ópticas necessárias e apropriadas para medição direta de altas tensões; o enlace óptico a ser utilizado em conjunto com os sensores desenvolvidos (composto por fibras ópticas, conectores, emendas, fontes e detectores luminosos, etc.); os circuitos eletrônicos associados ao tratamento dos sinais e o interferômetro recuperador.

As atividades de estudo desenvolvidas nessa etapa do trabalho serviram de base para a definição do sistema de sensoriamento que consistiu no projeto e na construção de um

protótipo representativo de sensor eletro-óptico de potencial para alta tensão, ou seja, um TP óptico. Esta etapa foi organizada de modo a incluir as seguintes atividades:

- a) Construção do modulador de alta tensão (incluindo seleção e especificação dos materiais eletro-ópticos empregados);
- b) Projeto e construção da célula eletro-óptica de alta tensão,
- c) Especificação e montagem do enlace óptico,
- d) Projeto e construção do interferômetro recuperador, e
- e) Projeto e construção dos circuitos eletrônicos associados aos equipamentos de processamento dos sinais ópticos e elétricos.

A definição do sistema de sensoriamento empregado no protótipo de TP óptico construído passa pelo estudo e escolha das técnicas de:

- modulação, empregada no sensor primário;
- transmissão, empregada no enlace óptico;
- demodulação óptica, empregada no processamento óptico do sinal e
- conversão/ tratamento/condicionamento, empregadas no processamento eletrônico do sinal.

Baseado nos estudos realizados, a técnica de modulação escolhida para ser utilizada no desenvolvimento do protótipo construído neste projeto foi a de modulação espectral (ou de interferometria de luz branca) com recuperação eletro-óptica.

O modulador primário, ou interferômetro sensor, deve ser especialmente projetado para resistir aos elevados níveis de tensão que se deseja medir e ter sensibilidade adequada para produzir uma medida precisa na faixa dinâmica pretendida.

O modulador secundário, é o chamado interferômetro recuperador, e deve ser projetado para que possa igualar o OPD introduzido pelo sensor primário.

Nos itens seguintes são expostos os detalhes sobre o projeto e a construção do modulador eletro-óptico para medidas de alta tensão (primário), sua célula sensora bem como as especificações do enlace de fibras ópticas.

3.2.1 Projeto e Construção de Moduladores Eletro-ópticos para Medição de Altas Tensões

Os estudos realizados por J.C. Santos [14] demonstraram que a realização da medição direta de elevados potenciais por meio de sensores eletro-ópticos requer, entre outras coisas, a construção de uma célula sensora especial, capaz de suportar elevados valores de campo elétrico sem sofrer ruptura dielétrica e possuir sensibilidade adequada para reproduzir a tensão medida na forma de um sinal óptico que exiba linearidade, precisão e estabilidade aceitáveis.

A célula sensora óptica pode ser entendida como sendo o conjunto das montagens mecânicas, ópticas e elétricas que formam o dispositivo no qual é aplicada a tensão a ser medida e que entrega em sua saída, por meio de uma fibra óptica, um sinal luminoso proporcional àquela tensão. Uma célula sensora, no caso, deve conter um modulador eletro-óptico construído com materiais e geometria adequados para atender as exigências supracitadas.

Uma configuração das mais promissoras para moduladores eletro-ópticos adequados à medição de altas tensões é a longitudinal em que se utiliza um cristal eletro-óptico de dimensões transversais reduzidas [14]. Neste tipo de configuração a tensão total a ser medida é aplicada ao cristal eletro-óptico gerando internamente a ele um campo elétrico paralelo à direção de propagação da luz no mesmo. Nestas condições, a modulação da luz é proporcional à integral de linha do campo elétrico entre as extremidades do cristal, que é a própria tensão aplicada. Isto permite a medição da tensão aplicada pela definição de tensão aplicada.

O comprimento da célula sensora relaciona-se diretamente com a distância entre os eletrodos que aplicam a alta tensão ao cristal do modulador eletro-óptico [21]. Esta distância determina a rigidez dielétrica e a tensão de ruptura da célula. Portanto, como se deseja obter células ópticas que possam ser submetidas a centenas de kilovolts e o meio isolante a ser empregado inicialmente é o ar, que possui rigidez dielétrica entre 10 e 30 kV/cm, necessita-se construir moduladores eletro-ópticos cujo comprimento dos cristais seja da ordem de dezenas de centímetros.

A partir dessa necessidade, deu-se início à investigação da geometria mais adequada à fabricação de células e moduladores eletro-ópticos longitudinais longos (comprimento não inferior a 10 cm) e que apresentassem soluções práticas para problemas de manuseio e montagem, conduzindo a arranjos robustos e estáveis.

Na determinação da geometria da célula foram utilizadas técnicas de simulação de campos elétricos estáticos, tais como o Método de Simulação de Cargas (CSM) e o Método de Elementos Finitos (FEM), para investigar o formato e as dimensões dos eletrodos e dos outros elementos estruturais da célula sensora a fim de estimar sua suportabilidade dielétrica.

Como a forma e a composição do material eletro-óptico também influem no projeto do modulador, procedeu-se uma seleção dentre os possíveis candidatos considerando critérios como: o tipo de estrutura do retículo cristalino, os valores dos coeficientes eletro-ópticos significativos, e a facilidade/dificuldade de obtenção dos cristais. Diante das várias possibilidades existentes de cristais adequados para a construção de moduladores, baseado nos critérios anteriores decidiu-se utilizar cristais de retículo cúbico (como os da classe $\bar{4}3m$, que não apresentam birrefringência natural). Como representante deste tipo de cristal optou-se por uma das variedades do Germanato de Bismuto, conhecido como BGO e cuja fórmula química é $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$.

As atividades iniciaram-se com a caracterização de eixos ópticos transversais dos cristais de BGO e com a procura de soluções para o acondicionamento destes cristais, que são muito delicados e quebradiços, numa estrutura mais rígida e resistente para a posterior montagem dos moduladores e das células eletro-ópticas de alta tensão.

A solução escolhida para o acondicionamento dos cristais consiste na utilização de um cilindro de material acrílico formados por duas “meias-canais” de 32 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento ranhuradas e justapostas, em cujas ranhuras fica alojado o cristal eletro-óptico, conforme ilustrado na Fig. 3.3, a seguir.

Figura 3.3. “Meia-cana” de acrílico utilizada para acondicionar cristais eletro-ópticos longos e delgados de BGO.

As extremidades dos cilindros formados pela sobreposição de duas destas “meias-canas” recebem uma metalização que deixa descoberta a parte central do cristal eletro-óptico e nelas são coladas duas peças cilíndricas de alumínio de mesmo diâmetro externo que o cilindro de acrílico. Estas peças que foram denominadas “medalhas”, possuem pequenos orifícios centrais por onde passa a luz que atravessa o cristal e nas quais podem ser acomodados polarizadores e lâminas de introdução de atraso de fase (lâminas retardadoras para compensação de fase).

O modulador eletro-óptico utilizado na célula sensora de alta tensão consiste no conjunto formado pelo cilindro de acrílico (contendo o cristal) e as duas “medalhas” (contendo os polarizadores corretamente orientados e a lâmina retardadora). Este tipo de modulador não contém, em si, dispositivos de colimação e alinhamento do feixe óptico, o qual deve provir de uma fibra óptica de entrada, atravessá-lo e ser acoplado a uma fibra óptica de saída. Tais dispositivos estão incorporados na célula sensora de alta tensão. Para ensaiar o modulador é necessário, então, montá-lo na célula sensora.

A Fig. 3.4.a ilustra a composição destas “medalhas” com o cilindro e a Fig. 3.4.b mostra a vista lateral em corte do aspecto final do modulador eletro-óptico longitudinal para medição de altas tensões obtido como descrito acima.

Figura 3.4. a) Esquema representativo da composição das “medalhas” com o cilindro de acrílico contendo o cristal eletro-óptico e b) Vista lateral em corte do aspecto final do modulador eletro-óptico longitudinal para medição de altas tensões obtido pela técnica descrita acima.

3.2.2 Projeto e Construção da Célula Eletro-óptica Sensora de Alta Tensão

A configuração da célula sensora eletro-óptica (ou célula Pockels) primária, que constitui o sensor primário (como é chamado o conjunto do modulador com os acopladores ópticos e elétricos necessários para a medição de altas tensões), foi definida a partir da experiência anterior do orientador e após estudos de viabilidade técnica que levaram em conta os parâmetros, a disponibilidade e a facilidade de processamento mecânico dos materiais condutores e isolantes necessários ao projeto. Este processo de escolha conduziu à configuração mostrada na Fig. 3.5. Nesta montagem os eletrodos superior e inferior são feitos de alumínio maciço usinado e são separados por um tubo de acrílico de 220 mm de diâmetro interno. No centro do eletrodo inferior há um furo de 32 mm de diâmetro que permite a passagem do modulador de alta tensão e no eletrodo superior há uma reentrância para acomodar a “medalha” superior do modulador.

Nas partes internas dos eletrodos superior e inferior de alumínio são acomodados os componentes ópticos necessários para montagem do modulador Pockels: “medalhas”, posicionadores, pigtails colimadores e suportes de fibras ópticas.

Figura 3.5. Vista em corte da célula eletro-óptica de alta tensão.

O valor de V_π da célula de alta tensão construída com BGO pode então ser calculada a partir da Eq. (2.23) , considerando os seguintes valores:

$\lambda = 1321 \text{ nm}$ é o comprimento de onda central da luz, $d = 80 \text{ mm}$ é a distância entre os eletrodos, $L = 80 \text{ mm}$ é o comprimento de interação da luz, $n = 2,098$ é o índice de refração $r_{41} = 1,03 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ é o coeficiente eletro-óptico relevante do cristal de BGO.

O valor de V_π da célula de alta tensão, calculado pela Eq. (2.23), onde se considera $d = L$, pois neste caso trata-se de um modulador longitudinal onde o comprimento de interação da luz é igual á distância entre os eletrodos. Desta forma, o valor calculado para a célula de alta tensão é: $V_\pi = 69,4 \text{ kV}$. O valor medido experimentalmente para esta célula foi de aproximadamente 80 kV . Simulações do campo elétrico gerado entre os eletrodos realizados por Métodos de Elementos Finitos mostraram que para uma distância entre os eletrodos de 10 cm , a rigidez dielétrica deste conjunto no ar deve superar os 100 kV em 60 Hz .

A diferença nos dois valores de V_π da célula de alta tensão (teórico e experimental), pode ser causada por imprecisões nas orientações dos eixos ópticos do cristal e nos dados de índice de

refração e coeficientes eletro-ópticos utilizados (já que os mesmos são para um comprimento de onda de 1150 nm e não para 1321 nm, pois estes não eram disponíveis).

A Fig. 3.6.a, a seguir, mostra o aspecto final da célula sensora de alta tensão com o modulador eletro-óptico montado em seu interior. Pode-se notar, à esquerda da célula, a ponta de prova de 20 kV utilizada para o monitoramento da tensão aplicada à célula. A Fig. 3.6.b mostra a mesma célula de alta tensão e o transformador de potencial utilizado para aplicar as altas tensões em a.c. a serem medidas.

Figura 3.6. a) Fotografia da célula eletro-óptica de alta tensão e b) célula de alta tensão e o Transformador de Potencial (TP).

3.2.3 Montagem do Enlace Óptico

O enlace óptico utilizado em conjunto com os sensores desenvolvidos é composto basicamente por: fibras ópticas, conectores, emendas, fontes de luz e fotodetectores.

Com a finalidade de melhorar o desempenho do sistema sensor, escolheu-se empregar no enlace, ao invés de lentes discretas, trechos de fibras ópticas (*pigtails*) terminados por lentes colimadoras tipo índice gradual (*Gradual index* - GRIN). Estes “*pigtails*” colimadores oferecem uma série de vantagens, tais como: baixa perda de inserção (por possuírem camadas anti-reflectoras nas faces da lente GRIN e estas estarem perfeitamente acopladas às fibras); produzem um feixe de diâmetro inicial reduzido ($\cong 0,45$ mm), apresentam baixa divergência ($\pm 0,15^\circ$); permitem montagens mecânicas mais compactas e, portanto, mais robustas e estáveis (pois são encapsuladas em invólucro de aço cujas dimensões externas são de aproximadamente 3,8 mm de diâmetro por 27 mm de comprimento). A desvantagem relativa mais significativa de enlases feitos com duas lentes GRIN é que neles o alinhamento angular é mais crítico que nos enlases feitos com lentes convencionais, o que requer um esforço adicional e um cuidado especial no trabalho de alinhar as lentes.

Estes *pigtails* colimadores somente foram encontrados disponíveis no mercado acoplados a dois tipos de fibras: as fibras monomodo (com núcleo de 9 μm e casca de 125 μm) e as fibras multimodo (com núcleo de no máximo 62 μm e casca de 125 μm), ambas com núcleo e casca de sílica.

Como os moduladores empregados no sistema polarizam a luz em suas entradas e saídas, para reduzir o ruído causado na intensidade da luz do enlace óptico, gerado pela distribuição variável de energia entre os inúmeros modos de propagação e polarização presentes nas fibras multimodo, optou-se por empregar fibras monomodo no protótipo.

No intuito de minimizar as perdas por acoplamento e facilitar o alinhamento e manuseio dos componentes ópticos procurou-se trabalhar com fibras conectorizadas, inclusive os *pigtails* colimadores. Utilizou-se, sempre que possível, conectores tipo SC, os quais, além da praticidade de encaixe rápido por pressão, vem demonstrando crescente melhora nos quesitos de perda por inserção e repetibilidade. Nos casos em que não se pôde utilizar os conectores SC foram utilizados os do tipo FC.

Para a escolha da fonte de luz do sistema sensor o requisito básico é que ela deve produzir luz de baixa coerência temporal, ou banda espectral larga [25]. Escolheu-se então empregar como fonte de luz um diodo superluminescente (*Superluminescent Diode* - SLD),

pois este tipo de componente produz luz de coerência espectral moderadamente baixa mas de alta coerência espacial, conseguindo assim acoplar uma quantidade significativa de luz em fibras ópticas monomodo.

O SLD empregado no sistema sensor emite luz no comprimento de 1300 nm com largura espectral de cerca de 20 nm e potência óptica de saída da ordem de 600 μ W.

Como foto-detector escolheu-se utilizar os foto-diodos (Epitaxx, $\lambda = 1300$ nm). Para minimizar os alinhamentos e tornar mais prática a montagem do enlace, optou-se por trabalhar com fotodetectores que tivessem conectores para fibras ópticas do tipo fêmea fixados diretamente em seu corpo.

Para implementar o acoplador direcional, mostrado no centro da Fig. 3.2, selecionou-se um dispositivo construído exclusivamente com fibras ópticas, também terminado com conectores tipo SC. Tal acoplador possui uma razão de divisão de energia entre os braços de aproximadamente 50% e uma baixa atenuação por perda excedente (*excess loss*), em torno de 0,2 dB.

3.2.4 Projeto e Construção do Interferômetro Recuperador

Como foi dito anteriormente, para recuperar o sinal interferométrico, um simples interferômetro recuperador composto de uma lâmina retardadora inserida entre dois polarizadores alinhados é colocado em série com a fibra óptica no caminho de volta do sistema sensor. Esta lâmina tem seus eixos inclinados à 45° da direção dos polarizadores e foi fixada sobre uma base giratória que permite o ajuste preciso da inclinação dessa lâmina retardadora em relação à direção de propagação da luz. Esse ajuste fino permite compensar qualquer ligeira diferença entre essa lâmina retardadora e aquela inserida no interferômetro sensor. Além disso permite inserir um OPD adicional de $\lambda_o/4$ no sistema para que o mesmo funcione de acordo com o descrito na seção 3.1.3.

Para colimar o feixe foram utilizados dois *pigtails* colimadores idênticos aos utilizados no interferômetro sensor. Esses colimadores foram fixados à posicionadores de 5 eixos (x, y, z, θ, ϕ) capazes de permitir o perfeito alinhamento dos colimadores entre si.

3.2.5 Circuitos Eletrônicos Associados aos Equipamentos de Processamento dos Sinais Ópticos

A demodulação de sinais de sensores interferométricos é precedida por uma etapa de detecção e condicionamento da fotocorrente de saída do sensor. A mesma é da maior relevância dada as relações sinal-ruído e faixas dinâmicas envolvidas. Um amplificador de transimpedância (*Transimpedance Amplifier* – TIA) é um circuito que apresenta em sua saída um sinal de tensão proporcional a uma fotocorrente aplicada em sua entrada, ou seja, destina-se à detecção e conversão em tensão da corrente de um foto-diodo acoplado a uma fibra óptica proveniente do sensor interferométrico.

A configuração de transimpedância destaca-se por alta flexibilidade de implementação, baixa sensibilidade à capacitância parasita do circuito e controle efetivo da estabilidade do circuito de realimentação.

No presente trabalho utilizamos uma topologia sugerida por Nascimento et al. [26] que complementa o desenvolvimento de novas arquiteturas de processamento de sinais interferométricos.

Os componentes mais importantes do conjunto que engloba o sistema de processamento eletrônico de sinais são o amplificador operacional e o multiplicador analógico. Neste sistema foram empregados quatro circuitos operacionais de boa qualidade fabricados pela empresa Burr-Brown, sendo eles: dois OPA655, dois OPA037 e o multiplicador analógico MPY634, do mesmo fabricante dos amplificadores operacionais.

Em circuitos que utilizam-se de amplificadores operacionais, ruídos são distúrbios ou interferências causados pelo próprio amplificador ou pelo circuito externo a ele interligado. O erro de *offset*, devido às entradas polarizadas do amplificador operacional e à tensão de *offset*

são os ruídos mais comuns, porém, há muitas outras fontes de erros. Dependendo de sua origem, estes são classificados como ruídos externos ou interferência, ou ruído interno ou inerente.

O ruído externo é causado pela interação do circuito com o exterior, ou seja, é um ruído provocado por fatores externos ao circuito ou entre os próprios componentes externos do circuito. Esta interação pode ser de ordem elétrica, magnética ou eletromagnética.

Interações magnéticas e elétricas podem ser causadas por capacitâncias parasitas do circuito amplificador. Interferências eletromagnéticas são causadas pelo fato de que cada trilha da placa de circuito impresso se constitui de uma antena em potencial. Uma fonte de alimentação também pode ser uma fonte de ruído externo. Este tipo de ruído pode ser periódico, intermitente ou completamente aleatório. Sua redução seria o controle dos agentes externos que causam o ruído.

Diferentemente do ruído externo, o ruído interno ou inerente não consegue ser eliminado por ser um processo aleatório e este é um fenômeno presente em todos os semicondutores. O fenômeno da agitação térmica dos elétrons dentro de um resistor, por exemplo, contribui para uma corrente minúscula, que é adicionada à corrente e à tensão do circuito, variando aleatoriamente o sinal de saída.

Neste caso, a redução deste tipo de ruído é possível, embora a sua eliminação total não aconteça. A redução é necessária, mas também o controle do sinal de saída levando em consideração este tipo de ruído é muito importante. Pois, dependendo do sinal de entrada no circuito, este pode ser completamente mascarado pelo alto índice de ruído inerente que o circuito poderá oferecer e o sinal de entrada, completamente alterado.

A Fig. 3.7 mostra o diagrama de blocos da unidade de processamento de sinais utilizada no sensor.

Figura 3.7. Diagrama em blocos da unidade de pós-processamento do sinal eletrônico.

Nesta primeira implementação, os sinais dos fotodetectores (Det.1 e Det.2) ($I_{Det.1}$ e $I_{Det.2}$, respectivamente) são transformados em tensão (V_{D1} e V_{D2} , respectivamente) através de amplificadores de transimpedância TIA1 e TIA2 e os ganhos de transimpedância são $Z1$ e $Z2$, respectivamente. V_{D2} é subtraído de V_{D1} e dividido por V_{D2} . O sinal resultante é então multiplicado por G_{out} , originando o sinal de tensão de saída $V_{out}(t)$.

Após este processamento, se $Z_1 = Z_2$ e $G_1 = \alpha_R / 2$, o sinal de saída $V_{out}(t)$, será determinado por:

$$V_{out}(t) = \frac{G_{out}}{2} \sin \pi \frac{V(t)}{V_\pi} \quad (3.16)$$

Onde G_{out} é o ganho do último amplificador do circuito.

Tal sinal de saída, $V_{out}(t)$ que é uma função senoidal da tensão aplicada ao sensor interferômetro de alta tensão, $V(t)$, pode ser linearizado (por métodos analógicos ou digitais) ou pode ser aproximado por uma função linear como segue:

$$V_{out}(t) \cong \frac{G_{out}}{2} \pi \frac{V(t)}{V_{\pi}} \quad (3.17)$$

Que é valido somente quando $V(t) \ll V_{\pi}$.

A Fig. 3.8, abaixo, mostra uma foto do sistema completo de processamentos óptico e eletrônico dos sinais do protótipo de TP óptico construído.

Figura 3.8. Foto mostrando o sistema completo de processamento dos sinais óptico e eletrônico do protótipo de TP óptico. (a) unidade de processamento eletrônico de sinais, (b) acoplador direcional, (c) unidade contendo a fonte óptica e o interferômetro recuperador, (d) atenuador óptico variável, (e) osciloscópio digital e (f) fibras ópticas do enlace de comunicação entre os interferômetros sensor e recuperador.

4. Resultados Experimentais

O transformador óptico de alta tensão descrito anteriormente foi construído e testado com tensões a.c. até $4,5\text{ kV}_{pp}$. Tal nível de tensão foi obtido no secundário de um transformador convencional de tensão de classe 138 kV . Este transformador foi alimentado, em seu primário, por um variac que permite ajustar a tensão de saída em seu secundário a um valor desejado, continuamente, de zero até aproximadamente 80 kV_{ef} .

A tensão aplicada ao TP óptico, $V(t)$, foi medida com o auxílio de uma ponta de prova Tektronix de alta tensão que foi conectada diretamente ao osciloscópio. Com esta ponta de prova, a tensão aplicada foi limitada a 20 kV_{pp} pois esta é a tensão máxima suportada pela ponta de prova.

Para procurar caracterizar a dependência da amplitude do sinal de saída medido pelo TP óptico com a potência óptica transmitida pelo enlace de fibras ópticas, foi inserido em série com a fonte óptica (SLD) um atenuador variável (EXFO, modelo FVA-60B), através do qual uma atenuação pôde ser introduzida no sistema e variada desde de 0 dB até $-11,46\text{ dB}$. Durante a variação da atenuação do enlace a tensão aplicada ao TP óptico foi mantida constante num valor de referência de $4,5\text{ kV}_{pp}$. A Tabela 4.1, a seguir, mostra os valores de atenuação introduzidos pelo atenuador, os valores das amplitudes dos sinais medidos na saída da unidade de processamento eletrônico e a variação percentual do valor rms (*root mean square* – rms) relacionados.

Sinais típicos observados na saída do sistema $V_{out}(t)$, comparados com a tensão aplicada $V(t)$, são mostrados na Fig. 4.1, a seguir. As imagens exibidas na Fig. 4.1 são telas registradas diretamente pelo osciloscópio nas quais são mostradas as formas de onda dos sinais aplicados e medidos, o valor eficaz e pico a pico do sinal óptico de saída e o valor rms da tensão aplicada na célula de alta tensão. Nestas telas, a tensão aplicada ao TP óptico, $V(t)$, aparece na parte superior enquanto que na parte inferior aparece o sinal correspondente à saída da unidade de processamento de sinais $V_{out}(t)$. A Fig. 4.1 (a) corresponde a uma atenuação de $-2,5\text{ dB}$, a Fig. 4.1(b) a uma atenuação de $-7,49\text{ dB}$ e a Fig. 4.1 (c) a uma

atenuação de $-11,46$ dB, cujos valores de amplitudes de sinais associados são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores de atenuação introduzidos no enlace, valores de tensão pico a pico e rms presentes na saída do processador de sinais do TP óptico e variação percentual do valor rms relacionados. Durante a variação da atenuação do enlace a tensão aplicada ao TP óptico foi mantida constante num valor de referência de $4,5 \text{ kV}_{pp}$.

Atenuação (dB)	$V_{out \text{ pp}}$ (mV)	$V_{out \text{ rms}}$ (mV)	Variação de $V_{out \text{ rms}}$ (%)
0	356,6	131,9	0
-2,5	357,0	131,0	-0,7
-3,46	358,0	131,0	-0,7
-4,75	360,8	131,1	-0,6
-5,54	362,0	132,0	0,1
-6,51	364,0	132,0	0,1
-7,49	368,9	133,2	1,0
-8,66	371,0	133,0	0,8
-9,64	374,0	134,0	1,6
-10,64	370,0	136,0	3,1
-11,46	407,5	137,6	4,3

(a)

(b)

(c)

Figura 4.1. Sinais típicos observados experimentalmente. Traço superior: tensão aplicada ao TP óptico. Traço inferior: tensão observada na saída do processador eletrônico de sinais. Atenuações inseridas no enlace: (a) $-2,5$ dB, (b) $-7,49$ dB e (c) $-11,46$ dB.

Como mostrado tanto na Fig. 4.1 quanto na quarta coluna da Tabela 4.1, a influência da atenuação introduzida na potencia óptica do enlace sobre $V_{out(rms)}$ permaneceu pequena, abaixo de 1%, até valores elevados de atenuação, em torno de -8,66 dB. Nessa situação a amplitude do sinal óptico presente no enlace é de apenas cerca de 13% da original. Para valores superiores de atenuação a variação da amplitude do sinal de saída começa a crescer, chegando a 4,3% quando a atenuação atinge -11,46 dB. Contudo, como se pode ver na Fig. 4.1 (c), nessa condição o nível de ruído presente no sinal medido já é considerável, o que pode ter mascarado a medida da amplitude e do valor rms do sinal de saída do TP óptico.

5. Discussão dos Resultados e Conclusões

Este trabalho apresentou uma aplicação do método de interferometria de luz branca em um sistema de sensoriamento utilizado em um transformador óptico de alta tensão, construído com um sensor eletro-óptico Pockels polarimétrico.

Dos resultados obtidos nos testes realizados com o protótipo construído, apresentados no capítulo 4, pode-se verificar que foi possível com a abordagem proposta reduzir drasticamente a dependência da tensão medida na saída do TP óptico com a intensidade de luz no enlace óptico. Ficou dessa forma demonstrado que a transmissão de informação no espectro da luz torna possível reduzir consideravelmente tal dependência, no que consistia o objetivo principal deste trabalho.

Pôde-se observar que quando a atenuação da luz no enlace óptico torna-se muito grande o erro percentual do valor rms da medida aumenta consideravelmente. Isto pode ser atribuído à piora da relação sinal/ruído do sinal.

Considera-se que os ruídos ópticos introduzidos no enlace de fibras ópticas, tais como ruído de intensidade e ruído de polarização, poderão ser minimizados em montagens futuras com a introdução de componentes que exibam atenuações menores e um polarizador circular na saída da célula Pockels de alta tensão.

Também os ruídos eletrônicos, que se tornam importantes quando o sinal óptico fica pequeno, poderão ser reduzidos por meio de filtros e pela aplicação de técnicas adicionais de processamento de sinais.

Tais melhorias poderão ser implantadas em versões futuras do experimento. Ainda assim, acredita-se que a solução apresentada teve sua eficácia comprovada e que possa ser imediatamente utilizada em aplicações nas quais se busque a insensibilização das medidas de sensores eletro-ópticos polarimétricos por efeito Pockels a atenuações variáveis introduzidas na potência óptica transportada pelo enlace de fibras.

Não foram ainda realizadas medidas visando caracterizar a estabilidade temporal das medidas obtidas com o sistema proposto. Tais medidas também poderão ser feitas em um estudo futuro.

Referências Bibliográficas

- [1] Hecht, E. and Zajac A. **Optica**. E.U.A.: Addison-Wesley Iberoamericana, 2003.
- [2] Guenther, R. **Modern Optics**. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- [3] Yariv, A. and Yeh, P. **Optical Waves in Crystals: Propagation and Control of Laser Radiation**. E.U.A.: John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Yu F.T.S. and Yin S. **Fiber Optic Sensor**. New York: Dekker, 2002.
- [5] Grattan K.T.V. and Meggit B.T. **Optical Fiber Sensor Technology: Devices and Technology**. London: Chapman & Hall, 1988, v. 2.
- [6] Grattan K.T.V. and Meggit B.T. **Optical Fiber Sensor Technology: Applications and Systems**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999, v. 3.
- [7] Ristic, L. **Sensor Technology and Devices**. Boston: Artech House, 1994.
- [8] Pollock, C.R. **Fundamentals of Optoelectronics**. R.D. Irwin Inc., 1995.
- [9] Borges B.H.V. et al. **Sensores, Tecnologias e Aplicações: Sensores Ópticos Integrados e em Fibra**. São Paulo, v. 1, cap. 7, p. 1-90, 2005.
- [10] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors. **Optical Fiber Technology**, v. 9, p. 57-79, 2003.
- [11] Yim Y.S. and Shin S.Y. Lithium niobate integrated-optic voltage sensor with variable sensing ranges. **Optics Communications**, n. 152, p. 225-228, 1998.
- [12] Wang Z. et al. A novel method for simultaneous measurement of current and voltage using one low-birefringence fiber. **Optics & Laser Technology**, n. 30, p. 257-262, 1998.
- [13] Lecona F.G.P. et al. Fiber optic voltage sensor with optically controlled sensitivity. **Optics Communications**, n. 187, p. 135-140, 2001.
- [14] Santos, J.C. New optical Pockels techniques for direct measurement of high voltage. 1996. p. 129-146. Tese de Doutorado – Universidade de Tóquio, Japão.
- [15] Rao, Y.J. and Jackson D.A. Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry. **Meas. Sci. Technology**, v. 7, p. 981-999, 1996.
- [16] Al-Chalabi S.A. et al. Partially coherent sources in interferometric sensors. In: 1st INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBRE SENSORS, 1983, London, p. 132-135.

- [17] Hickman. D. An optical sensor based on temporal coherence properties. **J. Phys. E. Sci. Instrum.**, n. 21, 1988, p. 187-192.
- [18] Bosselmann T. and Ulrich. R. High-accuracy position-sensing with fibre-coupled white-light interferometers. In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON OPTICAL FIBRE SENSORS, 1984, Berlin, p. 361-364.
- [19] Choi, H.S. et al. High-performance fiber-optic temperature sensor using low-coherence interferometry. **Optics Letters**, v. 22, n. 23, Dec.,1997.
- [20] Yuan, L.B. et al. Fiber optic temperature sensor with duplex Michleson interferometric technique. **Sensors and Actuators**, n. 86, p. 2-7, 2000.
- [21] Zhou, Y. and Qiang, X. Dual Fizeau heterodyne interferometry for high-precision fibre-optic displacement sensor. **Sensors and Actuators**, v. A, n. 65, p 1-4, 1998.
- [22] Wang, T. et al. A high precision displacement sensor using a low-finesse fiber-optic Fabry-Perot interferometer. **Sensors and Actuators**, v. A, n. 69, p. 144-138, 1998.
- [23] Fischer, K. et al. Elastooptical properties of SiON layers in a integrated optical interferometer used as a pressure sensor. **J. Lightwave Technology**, v. 12, n. 1, p. 163-169, Jan., 1994.
- [24] Tomic, M.C. et al. Voltage measurement based on the electrostrictive effect with simultaneous temperature measurement using a 3x3 fiber-optic coupler and low coherence interferometric interrogation. **Sensors and Actuators**, v. A, n. 115, p. 462-469, 2004.
- [25] Qi, W. et al. A multimode optical-fibre sensing system using white-light interferometry and two-wavelenght synthetic source. **Sensors and Actuators**, v. A, n. 58, p. 191-195, 1997.
- [26] Nascimento, A.R.Z. et al. Circuitos Amplificadores de Transimpedância Integrados a Fotodiodos. **Telecomunicações**, v. 2, n. 2, Setembro/1999.