

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica  
Grupo de Sistemas Elétricos

## **TCs E TPs ÓPTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso

**Aluno: João Robson Crispim Alves**

**Orientador: Tarso Vilela Ferreira**

**Campina Grande, Paraíba**

**Dezembro de 2009**

**JOÃO ROBSON CRISPIM ALVES**

## **TPs E TCs ÓPTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Campina Grande, Paraíba

Dezembro de 2009

**JOÃO ROBSON CRISPIM ALVES**

**TPs E TCs ÓPTICOS**

Data de Aprovação: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Professor Tarso Vilela Fernandes  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Orientador**

---

Professor Convidado  
Universidade Federal de Campina Grande  
**Avaliador**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao ser supremo criador e coordenador do universo, o qual chamamos de Deus, por ter me tirado da zona rural (Sítio Ingá) de Ipaumirim, Ceará, ter me lançado ao mundo aos dezessete anos e me ajudado a conseguir uma formação superior após dez anos de muito trabalho, dedicação e perseverança.

À minha Mãe Vilani, que me deu sempre tanto amor e apostou todas suas fichas em mim.

À minha Tia Neidinha, que praticamente me criou e me deu educação, sempre me ajudando a discernir o caminho certo do errado.

Ao meu Pai Nitinho, que certa vez após a ordenha, selou nosso cavalo, me colocou à “lua da sela”, me conduziu até a cidade de Bom Jesus-PB para seguir de ônibus até Cajazeiras-PB (como quase toda segunda-feira) pra estudar e, chegando lá, ao saber que o mesmo já havia partido disparou ao seu encontro, até que o acompanhou, fez sinal para que parasse, daí eu o beijei e segui pra escola (valeu o esforço meu PAI).

À minha Avó Vicência que me criou a curtas rédeas, não me deixando desviar do foco.

Ao meu Avô Dedin (*in memoriam*), que no leito de sua morte olhou em meus olhos e me disse que eu iria ser um marco na história de nossa família.

Aos Tios e Tias: Lourdinha, Gonçala, Joana, Vera, Aldecina, Liduína, Auxiliadora, Fátima, Higino, Milton e Joãozinho, que ajudaram em minha criação.

Aos amigos Talvanes, Tchaikovsky, Adail, Tarso, Genoilton, Danilton, Márcio, Roni, Dalton, Anderson, Vanildo, Manoel Ribeiro, Marzinho, Petuel, Danilo, Carlos José, Reginaldo, Heuller, Hermílio, João Bezerra, Keké, Marcão, Edmilson, Jandir, Zé Carlos, Davi, Pacheco, Anaildo, Beбето, Valéria, Alexsandro, Marcione, Rejanilson, Sonaldo, Thompson, Pedão, Normando, Richardson, Ivan, Juscélio, Rodolfo, Willian, Nieldon, Tony, Marlene, Cidinha, Petinha, Edvaldo, Crispim, Creusa, Honorato, Antônio Carlos, Patrício, Francisca, Eulina, Nilda, Tânia, Patrícia, Regiane, João, Luiz José, Paula, Erick, Érica, Luciana e Janielly, dentre outros, pela colaboração em vários momentos de minha vida até aqui.

À minha namorada Richarla Dantas, pelo apoio e incentivo.

*“Procure ser um homem de valor,  
antes de ser um homem de sucesso.”*

Albert Einstein

## **RESUMO**

No presente trabalho é feito um levantamento do estado da arte sobre a tecnologia dos transdutores ópticos de tensão e corrente, os quais utilizam os princípios básicos do Efeito Faraday e do Efeito Pockels, aplicada aos transformadores para instrumentos, ou seja, os transformadores de potencial e os transformadores de corrente, tão amplamente usados para medição, proteção e controle dos sistemas elétricos.

Após apresentada uma fundamentação teórica, serão vistos e discutidos alguns estudos feitos nessa linha de pesquisa, bem como apresentados alguns produtos desenvolvidos com a aplicação dos sensores ópticos.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Fig. 2-1. Polarização de ondas mecânicas em uma corda.	14
Fig. 2-2. Duas películas polarizadoras com eixo de transmissão girado de $q$ graus.	16
Fig. 2-3. Polarização circular ou por birrefringência .	18
Fig. 2-4. Representação do efeito Faraday.	20
Fig. 2-5. Princípio do efeito opto-elétrico e do modulador eletro-óptico longitudinal.	23
Fig. 2-6. Interferômetro de Mach-Zehnder.	24
Fig. 2-7. Interferômetro de Sagnac.	24
Fig. 3-1. Diagrama de bloco funcional do MOCT.	29
Fig. 3-2. Sinal de saída de tensão de um MOCT submetido a uma corrente primária de 2000 A.	30
Fig. 3-3. Sensor de corrente MOCT montado com a devida proteção mecânica.	31
Fig. 3-4. Comportamento do MOCT diante da variação de temperatura.	32
Fig. 3-5. MOCT instalado em campo.	33
Fig. 3-6. Corte lateral do NXCT da NxtPhase.	35
Fig. 3-7. Diagrama esquemático do NXCT.	37
Fig. 3-8. NXCT.	38
Fig. 3-9. Desempenho apresentado pelo NXCT submetido a temperaturas variadas.	38
Fig. 3-10. Erro de precisão na medição de potência versus corrente aplicada ao conjunto NXCT e Maxsys 2510 (100 % = 1 A no secundário).	39
Fig. 3-11. Erro de precisão na medição de potência versus corrente aplicada ao conjunto TC convencional e Maxsys 2510 (100 % = 1 A no secundário).	40
Fig. 3-12. Aplicação de um NXCT a 420 kV.	41
Fig. 3-13. Configuração do MFR-FOCT.	42
Fig. 3-14. Resposta do MFR-FOCT “A” (50 espiras) para uma corrente de falta fase-terra.	43
Fig. 3-15. Resposta do MFR-FOCT “B” (50 espiras) para uma corrente de falta fase-terra.	44
Fig. 3-16. Resposta de um TC convencional a uma falta fase-terra.	44
Fig. 3-17. Desempenho da proteção contra faltas internas e externas usando TC convencional e um TCO com o transdutor MFR-FOCT.	45
Fig. 3-18. Protótipo do HOCS.	47

Fig.4-1. Célula Pockels de LiNbO <sub>3</sub> empregada num sensor óptico de tensão. (a) Cristal de LiNbO <sub>3</sub> utilizado como elemento sensor. (b) Célula Pockels transversal montada com o cristal num suporte.	50
Fig.4-2. Sensor óptico de tensão montado num laboratório.	50
Fig. 4-3. Diagrama de sinais nas células de quadratura de Pockels.	51
Fig. 4-4. Diagrama de blocos do Sensor óptico de tensão.	52
Fig. 4-5. NXVT (primeiro protótipo).	53
Fig. 4-6. NXVT (modelo mais atual).	55
Fig. 4-7. Interface eletrônica de um NXVT .	55
Fig. 4-8. Resultado do teste de influência da temperatura.	57
Fig. 4-9. Saída de tensão AC do OVT em relação à tensão aplicada.	58
Fig. 5.1. Foto e esquema de montagem de três unidades do OMU.	60
Fig. 5.2. Aplicação do NXCVT numa linha de 550 kV.	61

### LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
Tabela 3.1 – Faixas de medição de corrente do MFR-FOCT.	43

## SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2. ÓPTICA</b>	13
2.1. UMA VISÃO HISTÓRICA	13
2.2. TÓPICOS SOBRE ÓPTICA RELACIONADOS AO TRABALHO	13
2.2.1. Polarização	13
2.2.1.1. Polarização por Absorção	15
2.2.1.2. Polarização por Birrefringência e Polarização Circular	16
2.2.2. Interferometria óptica	18
2.2.3. Efeito Faraday	19
2.2.4. Efeito Pockels	21
2.2.4.1. Efeito Pockels Longitudinal	21
2.2.4.2. Efeito Pockels Transversal	21
2.2.4.3. Uma comparação entre os dois efeitos	22
2.2.4.4. Princípios básicos da modulação opto-elétrica	22
2.2.5. Sensores de fibra óptica	23
2.2.5.1. Introdução	23
2.2.5.2. Vantagens de Sensores de Fibras Ópticas	24
<b>3. TCs ÓPTICOS</b>	27
3.1. INTRODUÇÃO	27
3.1.1. Comparação entre o TC convencional e o TC óptico	27
3.1.2. Princípio de operação	28
3.2. MOCT – TRANSDUTOR OPTO-MAGNÉTICO DE CORRENTE	29
3.2.1. Testando o equipamento	31
3.2.2. Instalação em campo	32
3.2.3. Sistema de coleta de dados	33
3.2.4. Dados coletados	33
3.2.5. Conclusões dos autores	33

3.3. NXCT - TRANSDUTOR OPTO-MAGNÉTICO DE CORRENTE DESENVOLVIDO PELA NxtPhase	34
3.3.1. Transdutor óptico de corrente otimizado para aplicações em medições de potência.	36
3.3.1.1. Medição de potência com o NXCT	39
3.3.1.2. Conclusões dos autores	40
3.4. APLICAÇÃO DE UM TCO NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS	41
3.5. UM TCO HÍBRIDO	46
<b>4. TPs ÓPTICOS</b>	<b>49</b>
4.1. INTRODUÇÃO	49
4.2. EOVT	50
4.2.1. Princípios de operação do EOVT	50
4.2.2. Aplicações do EOVT	52
4.3. NXVT - TRANSDUTOR OPTO-ELÉTRICO DE TENSÃO DESENVOLVIDO PELA NxtPhase	52
4.4. MEDIDA DE DESEMPENHO DE UM TRANSDUTOR ÓPTICO DE TENSÃO APLICADO À FAIXA DE 132 kV A 150 kV	56
4.4.1 – Teste de temperatura	56
4.4.2. Relação de transformação	57
4.4.3. Considerações sobre o peso	58
<b>5. TCOs E TPOs INTEGRADOS</b>	<b>59</b>
5.1. OMU	59
5.2. NXVCT	60
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>63</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b>	<b>64</b>
<b>8. ANEXOS</b>	<b>66</b>

8.1. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM NXCT	66
8.2. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM NXVT	67
8.3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM NXCVT	68

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o seu aparecimento, no início dos anos 70, e durante quase uma década, as fibras ópticas foram usadas e estudadas exclusivamente como elementos de sistemas de comunicações. A partir de 1977, começaram a aparecer as primeiras pesquisas sobre o uso de fibras para a construção de elementos capazes de medir diferentes parâmetros físicos, chamados de sensores de fibras ópticas. Os sensores vêm sendo desenvolvidos desde então, tendo recebido crescente atenção neste curto período de tempo e já se constituindo em ativo ramo de pesquisa básica e aplicada, bem como gerando um mercado de vários milhões de dólares.

O desenvolvimento de sensores ópticos de corrente e tensão para aplicações de alta tensão tem acelerado muito nos últimos anos. Nos EUA, Canadá, Alemanha e México, existem mais de sessenta sistemas onde estas tecnologias estão operando, em tensões que variam de 115 a 550 kV.

Dimensões compactas, pesos reduzidos, precisão em larga faixa de valores, não necessidade de uso de óleo ou gases isolantes, dentre outras vantagens, fazem destes equipamentos opções atraentes para aplicações em subestações modernas. Os sensores ópticos são muito aplicáveis em situações onde há inviabilidade de uso de transformadores de corrente tradicionais.

O sistema completo é composto pelos sensores ópticos localizados no lado de alta tensão, isoladores poliméricos que suportam o sensor óptico e proporcionam passagem para os cabos de fibra óptica, que transmitem a luz para a sala de controle da subestação, onde está o módulo eletrônico.

O uso de fibras na transmissão dos dados do sensor à sala de comando permite que a distância entre eles seja muito maior que se usando fios metálicos.

## 2. ÓPTICA

### 2.1. UMA VISÃO HISTÓRICA

A óptica é o ramo da Física que estuda a propagação da luz e sua interação com a matéria. Para se chegar ao entendimento dessa área um longo caminho foi percorrido e este percurso gerou um histórico bastante rico. Alguns aspectos que merecem destaque estão ligados às idéias sobre a natureza da luz e aos caminhos paralelos que a óptica e o eletromagnetismo trilharam durante séculos.

A primeira grande evolução da óptica ocorreu durante o século XVII, quando houve um desenvolvimento significativo da sua formulação matemática, o que possibilitou a explicação dos fenômenos observados até então.

*Robert Hooke* (1635-1703) refez os experimentos de Grimaldi sobre difração e observou padrões coloridos de interferência em filmes finos. Ele concluiu, corretamente, que o fenômeno observado devia-se à interação entre a luz refletida nas duas superfícies do filme, e propôs que a luz originava-se de um movimento ondulatório rápido no meio, propagando-se a uma velocidade muito grande. Surgiam assim, as primeiras idéias da teoria ondulatória. *Isaac Newton* (1642-1727) realizou experimentos de dispersão num prisma em 1665, o que o levou à conclusão sobre a composição espectral da luz branca. Também introduziu a teoria corpuscular que afirmava que "a luz é composta de corpos muito pequenos, emitidos por substâncias brilhantes".

O início do século XIX presenciou o ressurgimento da teoria ondulatória. Entre 1801 e 1803, Thomas Young (1773-1829) propôs o princípio da superposição e com ele explicou o fenômeno de interferência em filmes finos. <sup>[1]</sup>

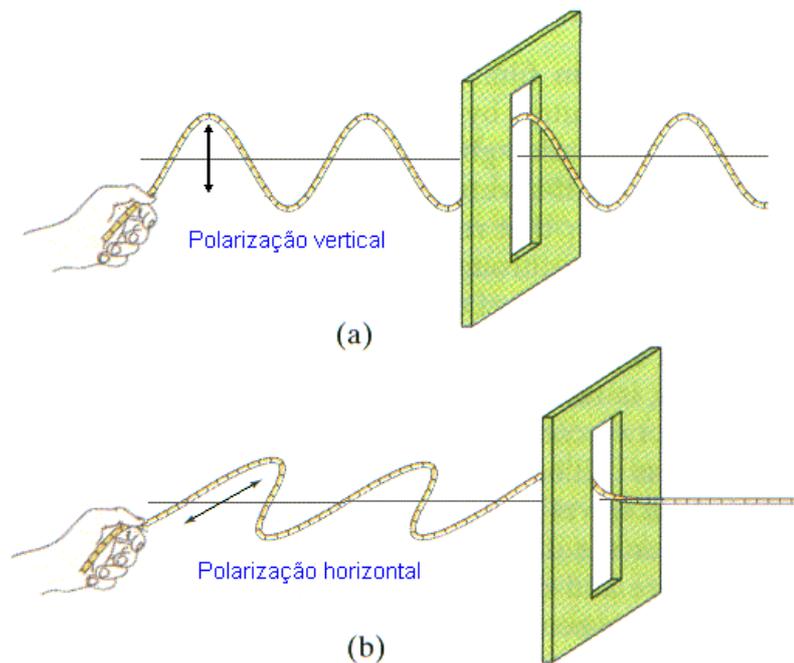
### 2.2. TÓPICOS SOBRE ÓPTICA RELACIONADOS A INSTRUMENTOS DE ALTA TENSÃO

#### 2.2.1. Polarização

Uma propriedade da luz, importante e útil, é que ela pode ser polarizada. Para ver o que isto significa, examinem-se ondas mecânicas produzidas em cordas, isto facilitará a compreensão do conceito de polarização. Pode-se fazer uma corda vibrar numa dada direção, como por exemplo, paralela ou perpendicular ao plano formado pela fenda da Fig. 2-1. Em

ambos os casos a onda é dita ser plano-polarizada, isto é, as oscilações ocorrem um plano específico. Agora, se for colocado um obstáculo contendo uma fenda vertical no caminho da onda, observa-se que uma onda verticalmente polarizada (Fig. 2-1a) passará, enquanto a horizontalmente polarizada não passará (Fig. 2-1b).

Contrariamente, se for usado uma fenda horizontal, a onda polarizada não passará. Nota-se que a polarização somente pode existir para ondas transversais e não para ondas longitudinais como as sonoras. <sup>[1]</sup>



**Fig. 2-1. Polarização de ondas mecânicas em uma corda.** <sup>[1]</sup>

A analogia com as ondas sonoras sugere que as ondas eletromagnéticas se propagam na direção normal às frentes de onda, isto é, na direção  $x$  para a onda considerada neste exemplo. Portanto, a conclusão pode ser expressa da seguinte forma: os campos elétricos e magnéticos da onda só podem ter componentes em direções transversais à direção de propagação. A onda eletromagnética deve ser uma onda transversal. Em qualquer onda transversal, a vibração é perpendicular à direção de propagação da onda. Se a vibração da onda transversal ficar paralela a uma reta fixa no espaço, a onda é linearmente polarizada. Podemos visualizar, com maior facilidade, a polarização, considerando as ondas mecânicas em uma corda. Se uma das extremidades da corda oscilar para cima e para baixo, as ondas resultantes que percorrem a corda estão linearmente polarizadas, com cada elemento da corda vibrando em uma única direção. Analogamente, se uma extremidade da corda percorrer uma

circunferência de círculo, com velocidade constante, a onda resultante estará circularmente polarizada. Neste caso, cada elemento da corda descreve um arco de círculo completo.

São quatro os fenômenos que produzem luz polarizada a partir de luz não polarizada:

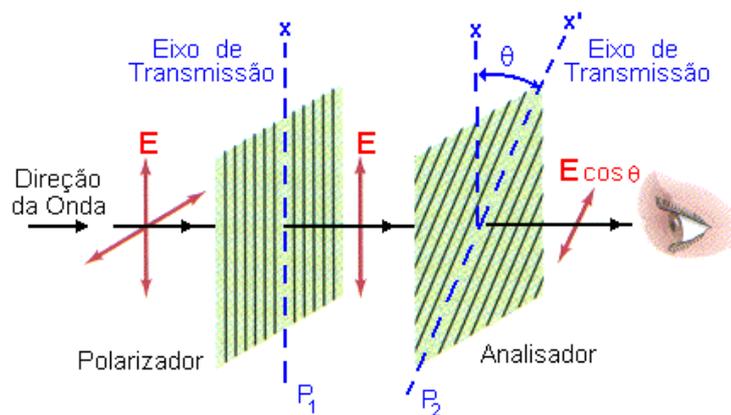
- a) Absorção;
- b) Reflexão;
- c) Espalhamento;
- d) Birrefringência ou dupla refração.

Para o presente trabalho, os itens (a) e (d) são de entendimento indispensável, assim sendo serão sucintamente descritos a seguir.

#### 2.2.1.1. Polarização por Absorção

Muitos cristais naturais, quando cortados apropriadamente, absorvem e transmitem luz de maneira que depende da polarização da luz. Estes cristais podem ser usados para se ter luz linearmente polarizada. Um destes materiais polarizadores é o polaróide, o qual é formado por moléculas de hidrocarbonetos de cadeia longa, alinhadas no processo de fabricação. Estas cadeias tornam-se condutoras nas frequências ópticas quando a película é mergulhada numa solução de iodo. Quando a luz incide com o seu vetor campo elétrico paralelo às cadeias do polímero, as correntes elétricas que se estabelecem nas moléculas absorvem a energia da luz. Se o campo elétrico for perpendicular às cadeias, a luz será transmitida. A direção perpendicular às cadeias é o eixo de transmissão.

Imagine-se um feixe de luz não polarizada deslocando-se na direção  $z$ , e que incide sobre um polarizador com o seu eixo de transmissão na direção  $x$ . Em média, a metade da luz incidente tem o seu eixo de transmissão na direção  $x$  e a outra metade direção  $y$ . Então, a metade da intensidade da luz será transmitida e a outra metade absorvida. A luz transmitida será linearmente polarizada.



**Fig. 2-2. Duas películas polarizadoras com eixo de transmissão girado de  $q$  graus.** <sup>[1]</sup>

Suponhamos agora que tenhamos outra película polarizada cujo eixo de transmissão faça um ângulo  $q$  com o eixo da primeira película, como está na Fig.2-2. O campo elétrico transmitido na segunda película é igual a  $E \cdot \cos(q)$ . Uma vez que a intensidade da luz é proporcional a  $E^2$ , a intensidade da luz transmitida pelos dois polarizadores será dada pela lei de *Malus*, isto é,

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (2.1)$$

onde  $I_0$  é a intensidade da luz que incide sobre o segundo polarizador e que é a metade da intensidade da luz incidente sobre o primeiro polarizador. Quando as duas películas estão montadas em sucessão, na direção de um feixe de luz, como se descreveu anteriormente, a primeira película ou filtro é denominada por polarizador e a segunda por analisador.

Em particular, se os eixos de transmissão do polarizador e o do analisador formam um ângulo de  $90^\circ$ , a luz não será transmitida.

### 2.2.1.2. Polarização por Birrefringência e Polarização Circular

A birrefringência, ou dupla refração, é um fenômeno complicado que ocorre na calcita e em outros cristais que não pertencem ao sistema cúbico, e também em plástico sob tensão, como o celofane. Na maioria dos materiais, a velocidade da luz é a mesma qualquer que seja a direção de propagação. Estes materiais são isotrópicos\*. Em virtude da estrutura atômica, os materiais birrefringentes são anisotrópicos\*\*. Além desta anisotropia natural, certos cristais uniaxiais podem ter uma anisotropia extra-induzida pela aplicação do campo elétrico externo,

\* Propriedade que caracteriza as substâncias que possuem as mesmas propriedades físicas independentemente da direção considerada.

\*\* Característica que uma substância possui em que uma certa propriedade física varia com a direção.

sendo que este pode ser aplicado na direção de propagação da luz (efeito Pockels longitudinal) ou perpendicular a ela (efeito Pockels transversal). A velocidade da luz depende da direção de propagação através do material. Quando o raio de luz incidir sobre um material deste tipo, é possível separá-lo em dois raios, o raio ordinário e o raio extraordinário. Estes raios estão polarizados em direções mutuamente perpendiculares, e têm velocidade de propagação diferente. Dependendo da orientação relativa entre o material birrefringente e a luz incidente, os raios podem também ter diferentes direções de propagação. Há uma direção, em um material birrefringente, na qual os dois raios se propagam com a mesma velocidade. Esta direção é o eixo óptico do material. Nada incomum acontece quando a luz se propaga no ao longo do eixo óptico. Porém, quando a luz incidente atinge a superfície sob um ângulo diferente de zero em relação ao eixo óptico, os raios se propagam em direções diferentes e emergem separados no espaço. Se o material girar, o raio extraordinário gira também no espaço.

Se a luz for incidente sobre uma lâmina birrefringente, perpendicular à face cristalina da lâmina e perpendicular ao eixo óptico, os dois raios se propagam, na mesma direção mas com velocidades diferentes, pois os comprimentos de onda dos raios são diferentes. Os raios emergem com diferença de fase que depende da espessura da lâmina e do comprimento de onda incidente. Numa lâmina de quarto de onda a espessura é tal que há uma diferença de  $90^\circ$  entre as fases das ondas de certo comprimento de onda, na emergência da placa. Numa lâmina de meia onda, os raios emergem com uma diferença de fase de  $180^\circ$ .

Suponha-se que a direção de polarização da lâmina faça um ângulo arbitrário  $q$  com o eixo  $y$ , como mostra a Fig.2-3. A amplitude instantânea da onda linearmente polarizada transmitida pela lâmina é:

$$E = E_x \sin \theta + E_y \cos \theta = E_0 \cos \omega t \sin \theta + E_0 \sin \omega t \cos \theta = E_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (2.2)$$

A intensidade da onda transmitida pela lâmina é proporcional a  $E^2$ , ou

$$I \propto E_0^2 \sin^2(\omega t + \theta) \quad (2.3)$$

O olho e outros instrumentos de medida respondem somente à intensidade média  $I$ , que é encontrada substituindo-se  $\sin(\omega t + \theta)$  pelo seu valor médio em um ou mais ciclos, assim:

$$I \propto \frac{1}{2} E_0^2 \quad (2.4)$$

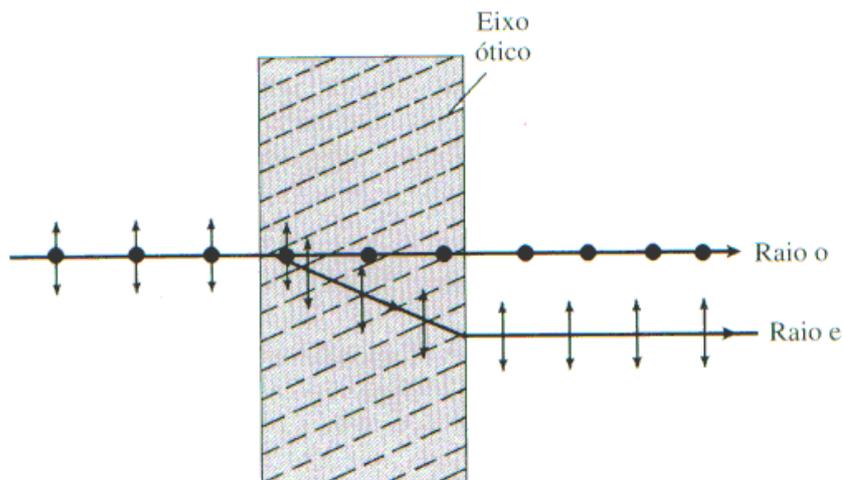


Fig. 2-3. Polarização circular ou por birrefringência. <sup>[1]</sup>

### 2.2.2. Interferometria óptica

Relativamente à medição de deslocamento, a interferometria óptica pode, em princípio, detectar amplitudes mínimas, da ordem de 100 fm. Para se ter uma noção do que isto significa cita-se que o tamanho de células de animais ou plantas em desenvolvimento, tipicamente, se encontra entre 5000 e 10000 nm. Um vírus tem um diâmetro da ordem de 100 nm, enquanto o da hélice do DNA é de 2 nm. O diâmetro do átomo de hidrogênio é de aproximadamente 0,1 nm. Esta é a chamada nanoescala, a escala dos átomos e moléculas.

De forma geral, interferômetros ópticos são transdutores eficientes que convertem uma variação de fase induzida ao longo de seus ramos, numa variação de intensidade óptica que possa ser mensurada.

Embora exista uma grande variedade de tipos de interferômetros atualmente, os arranjos clássicos ainda são os mais amplamente utilizados. Estes, por sua vez, podem ser implementados nas versões: volumétrica, em fibra óptica, óptica integrada e sistemas microeletromecânicos (MEMS).

As versões em fibra óptica dos interferômetros como *Mach-Zehnder*, *Michelson*, *Sagnac*, etc., bem como, os sensores associados, surgiram concomitantemente ao desenvolvimento da tecnologia das comunicações ópticas a partir do final da década de 1970. À medida que o preço dos componentes ópticos caiu e sua qualidade melhorou, também melhorou a capacidade desses sensores superarem os sensores tradicionais para medir grandezas como velocidade de rotação, aceleração, campo elétrico e magnético, temperatura,

pressão, ultra-som, vibração, posição linear ou angular, deformação, umidade, viscosidade, etc.

Esses sensores são leves, imunes à interferência eletromagnética, permitem grande flexibilidade geométrica, podem penetrar em locais de difícil acesso e são intrinsecamente seguros em ambientes perigosos, insalubres ou explosivos. Possuem sensibilidade extremamente elevada e grande largura de banda e faixa dinâmica. Além disso, são compatíveis com sistemas de telemetria óptica, transmissão de dados e tecnologia de multiplexação/demultiplexação óptica. Provavelmente esta seja a classe de interferômetros com o maior número de arranjos estruturais diferentes.

### **2.2.3. Efeito Faraday**

No estudo da Física, o Efeito Faraday ou Rotação Faraday é um fenômeno optomagnético ou uma interação entre luz e campo magnético num meio. A rotação do plano de polarização é proporcional à intensidade da componente de campo magnético na direção do feixe de luz.

O Efeito Faraday descoberto por Michael Faraday em 1845, foi a primeira evidência experimental de que a luz e o eletromagnetismo estão relacionados entre si. A teoria básica que descreve essa relação, hoje em dia chamada de radiação eletromagnética, foi desenvolvida por James Clerk Maxwell nos anos sessenta e setenta. Este efeito ocorre nos materiais dielétricos mais opticamente transparentes (inclusive líquidos) quando são submetidos a fortes campos magnéticos.

Este efeito é resultado da ressonância ferromagnética, onde a permissividade do material é representada por um tensor. Essa ressonância gera ondas que são decompostas em dois raios circularmente polarizados que se propagam em diferentes velocidades, propriedade conhecida como birefringência. Os raios se recombinam após emergir do meio, porém, devido à diferença de velocidade de propagação, eles sofrem um deslocamento de fase, resultando em uma rotação do ângulo de polarização linear.

O efeito de Faraday tem sido utilizado para medir modulação de amplitude de luz, sensoriamento remoto de campos magnéticos e também é utilizado na pesquisa spintrônica que estuda a polarização de spins dos elétrons em semicondutores.

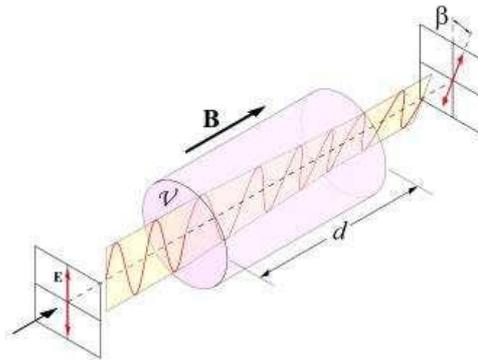


Fig. 2-4. Representação do efeito Faraday. [4]

A relação entre o ângulo de rotação da polarização e o campo magnético num material diamagnético é:

$$\beta = \mathcal{V}Bd \quad (2.5)$$

em que:

$\beta$  é o ângulo de rotação em radianos.

$B$  é a densidade de fluxo magnético na direção de propagação em Teslas.

$d$  é o comprimento do caminho (em metros) onde a luz e o campo magnético interagem.

$\mathcal{v}$  é a constante de *Verdet* para o material em questão. Esta proporcionalidade constante (em unidades de radianos por Tesla por metro) varia como comprimento e temperatura e é tabelada para diversos materiais.

Uma constante de *Verdet* positiva corresponde a uma rotação esquerda (anti-horária) quando a direção de propagação é paralela ao campo magnético e uma rotação direita (horária) quando a direção de propagação é anti-paralela a este campo. Desta forma, se um raio de luz atravessa um determinado material e é refletido de volta, sua rotação é dobrada.

Alguns materiais como o cristal *terbium gallium garnet* (TGG), têm uma constante de *Verdet* extremamente alta ( $\approx -40 \text{ rad T}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ). Expondo um bastão deste material a um forte campo magnético, pode ser atingido um ângulo de rotação Faraday acima de  $45^\circ$ . Isto possibilitou construção dos rotadores Faraday, os quais são os principais componentes dos isoladores Faraday, dispositivos que transmitem a luz em apenas uma direção.

Isoladores similares são construídos por sistemas microondas usando bastões de ferrite num guia de onda com campo magnético circundante. [4]

#### 2.2.4. Efeito Pockels

Chama-se de efeito opto-elétrico o fato do índice de refração de alguns materiais mudar quando algum campo elétrico é aplicado a estes. Um índice de refração é expresso na forma de séries de potência com respeito ao campo elétrico aplicado, como mostrado na fórmula:

$$n = n_0 + aE + bE^2 + \dots \quad (2.6)$$

onde,  $n_0$  é um índice refrativo ordinário para o caso de campo não aplicado  $a$  e  $b$  são os coeficientes para o efeito eletro-óptico. O segundo termo do lado direito da equação mostra uma dependência linear do campo elétrico e o terceiro termo mostra a dependência quadrática correspondente ao efeito *Kerr*. Os termos com ordem acima de três contribuem muito pouco para o índice de refração.

Em moduladores ópticos, o campo elétrico aplicado e as direções do feixe de luz podem ser paralelos ou perpendiculares um ao outro. Esses dois casos são chamados respectivamente de efeito longitudinal e efeito transversal.

##### 2.2.4.1. Efeito Pockels Longitudinal

Nessa configuração, a tensão é aplicada paralelamente ao feixe luminoso, e o valor do retardo introduzido pode ser expresso por:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r E d = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r U \quad (2.7)$$

onde  $\delta$  é a fase de retardo,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da luz,  $n_0$  é o índice de refração ordinário do cristal e  $r$  é a permissividade opto-elétrica. Como sabemos da física básica que  $V = E \cdot d$ , em que  $d$  é a espessura do cristal.

Analisando a equação acima, podemos ver que  $\delta$  não depende de  $d$ , mas de  $U$ .

##### 2.2.4.2. Efeito Pockels Transversal

Nessa configuração, a tensão é aplicada perpendicularmente ao feixe luminoso, e o valor do retardo introduzido pode ser expresso por:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_0^3 r \frac{l}{d} U \quad (2.8)$$

O Efeito Pockels Transversal é diferente do Longitudinal de acordo com a geometria do cristal em questão.

### 2.2.4.3. Uma comparação entre os dois efeitos

Em moduladores ópticos, o campo elétrico aplicado e a direção dos feixes de luz podem ser paralelos um ao outro – isso é chamado de Efeito Pockels Longitudinal, o qual é bastante vantajoso com relação ao efeito transversal, devido não depender da geometria dos cristais, porém deve-se garantir que uma intensidade de luz suficiente possa atravessar dois eletrodos, enquanto o campo elétrico e os feixes de luz sejam paralelos, fator este que dificulta as medições de níveis de tensão.

O Efeito Transversal causa atraso de fase devido os cristais serem birefringentes - propriedade óptica de minerais anisotropos transparentes - fazendo com que a radiação luminosa refratada seja dividida em dois feixes ortogonais de radiação polarizada que se propagam com velocidades diferentes dentro do corpo mineral. Essa diferença de fase é facilmente influenciada pela temperatura exterior. No Efeito Longitudinal, isso não acontece, a tensão depende da permissividade opto-elétrica dos cristais.

### 2.2.4.4. Princípios básicos da modulação opto-elétrica

Assumindo um modulador de amplitude na configuração longitudinal mostrado na Fig. 4-1, com as direções de polarização do polarizador e analisador estão defasadas em 90° uma à outra, o retardo de fase induzido  $\delta$ , entre duas componentes de luz ortogonais é dado por:

$$\delta = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta n \times L = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} E L = \frac{2\pi}{\lambda} n_0^3 r_{41} V = \pi \frac{V}{V_\pi} \quad (2.9)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $\Delta n$  é o birefringente induzido e  $L$  o comprimento do cristal e  $n_0$  é o índice de refração do cristal. Como  $V = E \cdot L$ , a tensão de meia-onda é definida como o valor de tensão no qual  $\delta$  atinge  $\pi$ , e seu valor é dado por:

$$V_\pi = \frac{\lambda}{2n_0^3 r_{41}} \quad (2.10)$$

e mostra-nos que para modulações longitudinais,  $V\pi$  é um valor característico do cristal e independe de suas dimensões físicas. [5]

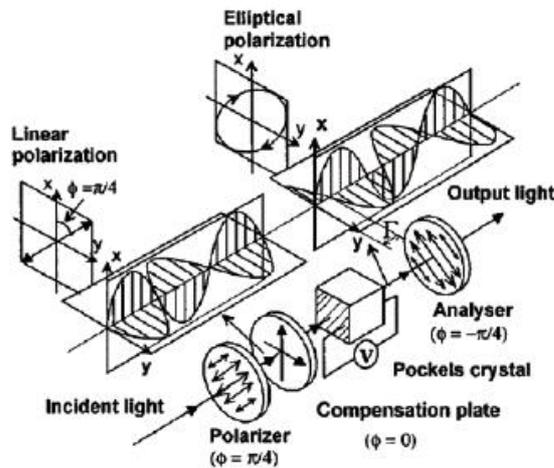


Fig. 2-5. Princípio do efeito opto-elétrico e do modulador eletro-óptico longitudinal. [5]

Considerando que um quarto de disco introduz um deslocamento adicional de  $\pi/4$  ao atraso total, a intensidade de luz transmitida  $T$ , que é a razão entre a saída e a entrada de intensidades luminosas, como função da tensão aplicada é:

$$T = \frac{I_0}{I_i} = \frac{I_i \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\delta}{2}\right)}{I_i} = \frac{I_i \sin^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \pi \frac{V}{V_\pi}\right)}{I_i} \quad (2.11)$$

## 2.2.5. Sensores de fibra óptica

### 2.2.5.1. Introdução

Desde o seu aparecimento, no início dos anos 70, e durante quase uma década, as fibras ópticas foram usadas e estudadas exclusivamente como elementos de sistemas de comunicações. A partir de 1977, começaram a aparecer as primeiras pesquisas sobre o uso de fibras para a construção de elementos capazes de medir diferentes parâmetros físicos, chamados de sensores de fibras ópticas. Os sensores vêm sendo desenvolvidos desde então, tendo recebido crescente atenção neste curto período de tempo e já se constituindo em ativo ramo de pesquisa básica e aplicada, bem como gerando um mercado de vários milhões de dólares.

Naturalmente, existem vários laboratórios e indústrias no mundo inteiro que contribuem para o desenvolvimento de sensores e seria uma tarefa impossível catalogar todos os autores individuais.

### 2.2.5.2. Vantagens de Sensores de Fibras Ópticas

O sensor de fibra óptica é simplesmente um pedaço de fibra que modula de maneira conhecida a luz que o atravessa e é detectada na outra extremidade. A maioria dos sensores atuais ainda é baseada na modulação de amplitude da luz que pode ser feita diretamente (ou internamente), quando a própria fibra é o elemento transdutor que vai transformar o parâmetro a ser medido em informação luminosa para o detector. Estes sensores são usados na medida de campos magnéticos, correntes elétricas, campos elétricos etc. Existe ainda a modulação indireta (ou externa), onde o elemento transdutor é externo à fibra. Entre outros, há sensores de temperatura, pressão e vibração que empregam esse método. A classificação aqui apresentada é mais ou menos arbitrária e nada impede que a temperatura, por exemplo, seja medida por um arranjo do tipo interno levando em conta a dilatação da fibra. Existe ainda um tipo de sensor que pode ser colocado em uma classe isolada: o sensor interferométrico.

Há vários tipos de interferômetros a fibra óptica que podem ser usados em sensores capazes de medir praticamente qualquer grandeza com grande sensibilidade, em geral maior do que a obtida por outras técnicas, os mais conhecidos são os de *Mach-Zehnder* e o de *Sagnac*, esquematizados nas Figs. 2-6 e 2-7, respectivamente. [6]

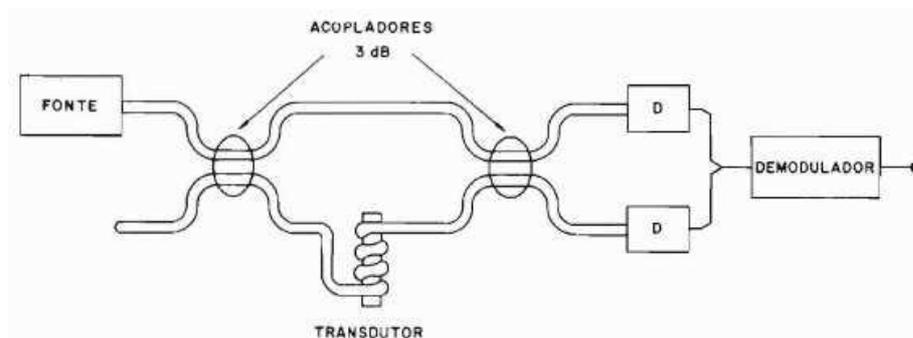


Fig. 2-6. Interferômetro de *Mach-Zehnder*. [6]

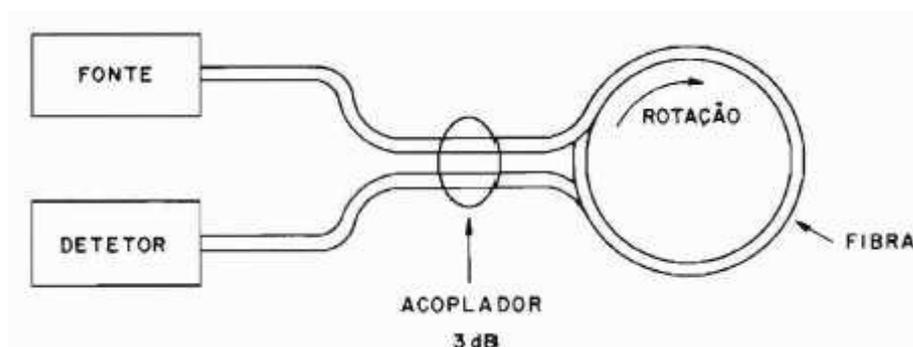


Fig. 2-7. Interferômetro de *Sagnac*. [6]

O Interferômetro de *Mach-Zehnder* é relativamente simples de construir e consiste de dois braços, sendo um de referência e outro o sensor propriamente dito. O braço de referência fica isolado do efeito a ser medido enquanto o braço do sensor é exposto ao mesmo, geralmente com a adição de um transdutor particularmente sensível ao efeito. Este produz uma defasagem entre a luz que se propaga no braço sensor e aquela no braço de referência, defasagem essa que pode ser relacionada à magnitude do efeito.

Um exemplo típico de transdutor é a colocação de uma jaqueta envolvendo parte da fibra. A jaqueta sofre a influência do parâmetro a ser medido, contraindo-se ou expandindo-se, induzindo tensões na fibra que mudam o índice de refração, o que por sua vez muda a relação entre as fases nos dois braços.

O sinal luminoso é convertido em elétrico por um ou mais fotodetectores e depois processado eletronicamente. A sensibilidade de um sensor desse tipo é muito grande e pode ser estimada pelo seguinte cálculo: 1 microradiano de defasagem corresponde a uma variação de comprimento na fibra  $D = (\lambda/2\pi) \cdot 10^{-6}$  onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz (1 micron, para a luz usualmente utilizada em fibras) resultando deste modo que  $D$  é da ordem de  $10^{-13}$  m. É possível, então, medir defasagens correspondentes a variações daquela ordem, que equivalem a distâncias nucleares. Teoricamente, pode-se medir qualquer efeito (pressão, temperatura, campo magnético etc.) que se manifeste provocando a variação de comprimento óptico efetivo do braço sensor, mesmo que essa variação seja tão pequena quanto  $10^{-13}$  m.

O interferômetro de Sagnac utiliza uma única fibra sendo muito usado na construção de giroscópios. Neste aparelho, dois feixes de luz propagam-se em sentidos opostos ao longo de um anel bastante extenso de fibra óptica. A rotação do anel produz uma diferença de fase entre os dois feixes que é convertida em modulação de intensidade por um acoplador de 3 dB e depois detectada eletricamente por um fotodetector.

Os sensores de fibras ópticas também têm sido muito usados em medicina que, na verdade, constitui o campo onde foram aplicados pela primeira vez de maneira sistemática e intensa (o aparelho de endoscopia digestiva é um exemplo clássico).

As maiores vantagens dos sensores de fibras ópticas residem em sua sensibilidade (já comentada), imunidade à interferência eletromagnética, versatilidade geométrica e possibilidade de obtenção de altas taxas de transmissão associadas a uma larga banda de passagem.

A imunidade à interferência permite o uso de cabos de fibras ópticas para transmissão de dados de parâmetros sensoreados a longa distância com baixíssima interferência entre canais e é particularmente importante ao se medirem parâmetros onde é necessário um isolamento elétrico (corrente em linha de alta tensão, por exemplo). A necessidade de uma grande banda de passagem que permite o emprego de altas taxas de transmissão é evidenciada em sensores de radiação ou mesmo em computação. A versatilidade geométrica permite o uso de várias configurações diferentes, cada qual mais conveniente para um dado caso e um dado parâmetro. <sup>[6]</sup>

### 3. TCs ÓPTICOS

#### 3.1. INTRODUÇÃO

Uma nova técnica usada para medição de corrente, usando o Efeito Faraday citado anteriormente, vem sendo desenvolvida, testada e demonstrada desde os anos setenta. O primeiro sistema de medição de corrente baseado em um transdutor opto-magnético de corrente (*magnetic-optic current transducer*, MOCT) foi instalado em 1986 nos EUA pela *Tennessee Valley Authority*, e o estudo deste sistema durante 10 anos nos ramos da medição e proteção permitiu evoluções de design e barateamento da tecnologia.

O MOCT baseia sua operação no efeito de Faraday. Conforme a luz linearmente polarizada passa pelo sensor, a orientação da polarização é rotacionada em proporção direta à intensidade do campo magnético oriundo da passagem de corrente pelo condutor em questão. A variação de polarização é convertida em variação de intensidade por um polarizador óptico. Como circunda o condutor que drena a corrente a ser medida, o MOCT mantém calibração precisa, mesmo quando imerso em ambiente de alto nível de ruído.

Dependendo-se do material empregado, pode ser necessária correção de sinal por efeitos de temperatura. Em aplicação de medida, o MOCT excede as exigências da classe de precisão 0.2 da norma IEC 185 para uma ampla faixa de valores, com medições precisas entre 5 e 4000A, com um mesmo sensor. Para aplicações de proteção, podem-se obter correntes de falta típicas de até 100 kA linearmente. Para aplicações mútuas de medição e proteção, a corrente de falta é especificada como múltipla da corrente nominal, por um fator de 60 vezes.

Será apresentada, a comparação entre os estudos teóricos desenvolvidos ao longo dos anos por vários pesquisadores e os resultados de um produto final instalado em campo. <sup>[7]</sup>

##### 3.1.1. Comparação entre o TC convencional e o TC óptico

Transformadores convencionais de corrente com isolamento a óleo (TCs) usados em circuitos de extra alta tensão (EHV) e ultra alta tensão (UHV) para utilização nos sistemas elétricos de potência possuem alguns inconvenientes, os quais foram aparecendo ao longo dos anos, tais como:

- Potencial para falhas catastróficas;
- Saturação quando submetidos a correntes de falta;
- Efeitos da ferroressonância;

- Efeitos de histerese;
- Perigo de queima se o secundário for aberto em carga;
- Volumosos e pesados, necessitando de suportes especiais;
- Precisão limitada a 0,3 %;
- Sujeitos à interferência eletromagnética.

Os benefícios apresentados por essa nova tecnologia são o inverso dos problemas apresentados acima pelos TCs convencionais, ou seja:

- Não apresenta efeitos da histerese;
- Não contém ferro e, por consequência está livre do fenômeno da ferroressonância;
- Não necessita de óleo isolante, devido isso não há risco de explosões;
- Não apresentam saturação quanto submetidos às correntes de falta;
- Possui em sua saída fibra óptica, portanto não há perigo quando na abertura do circuito;
- É leve (a maioria dos sensores pesa menos de 1 kg) e com dimensões reduzidas;
- Se mostra bem preciso numa larga faixa de trabalho;
- É imune a interferências eletromagnéticas.

### **3.1.2. Princípio de operação**

O sensor em questão, como já dito anteriormente, usa o Efeito Faraday. No ano de 1845, Michael Faraday descobriu que quando certos blocos de cristais são submetidos a fortes campos magnéticos, aqueles se tornam opticamente ativos, ou seja, quando a luz plano-polarizada é aplicada através do cristal numa direção paralela ao campo magnético aplicado, tal plano sofre uma rotação em volta do eixo, que é proporcional ao campo.

Desde a descoberta por Michael Faraday, tal fenômeno foi encontrado também em outros materiais sólidos, líquidos e gases, onde a quantificação da rotação observada numa dada substância foi experimentalmente observada que é diretamente proporcional ao campo aplicado e à distância percorrida pela luz, no meio. E tal rotação pode ser expressa da forma:

$$\theta = V.B.L \quad (3.1)$$

onde  $B$  é a indução magnética em Teslas,  $L$  é o comprimento do meio a ser atravessado pela luz em metros,  $\theta$  é o ângulo de rotação em minutos e  $V$  é a constante particularizada de cada substância. Esta constante, chamada de constante de Verdet, é definida como a rotação por unidade de comprimento por unidade de campo.

### 3.2. MOCT – TRANSDUTOR OPTO-MAGNÉTICO DE CORRENTE

Foi dito anteriormente que o primeiro sistema de medição de corrente baseado em um Transdutor opto-magnético de Corrente (MOCT) foi instalado em 1986 nos EUA pela *Tennessee Valley Authority*.

Abordar-se-ão agora alguns tópicos de um artigo publicado pelo IEEE em abril de 1990, escrito pelos Engenheiros T. W. Cease e P. Jonston e que é considerado a base para todo o estudo dos sensores ópticos de corrente.

A figura 3-1 apresenta o esquema do transdutor chamado de MOCT que faz uso do Efeito Faraday:

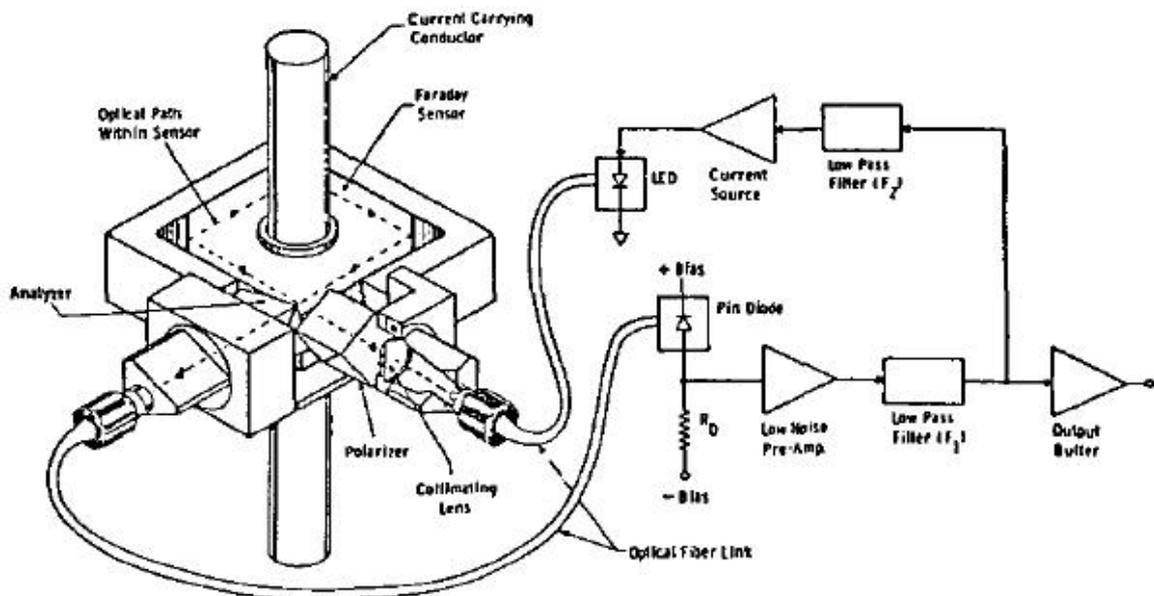
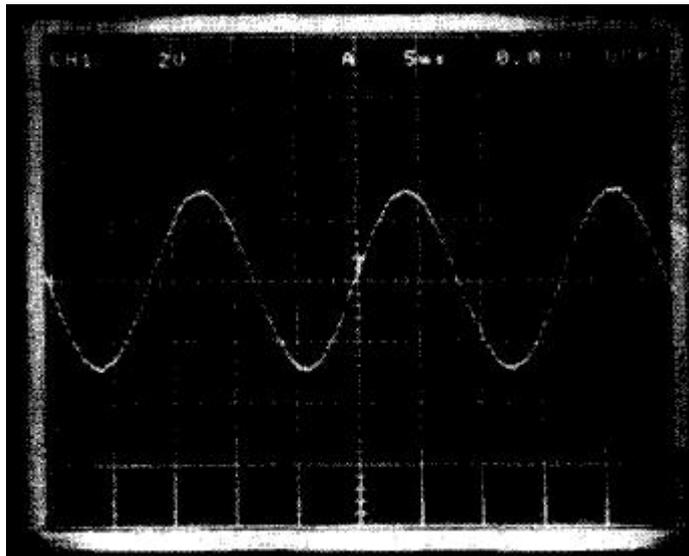


Fig. 3-1. Diagrama de bloco funcional do MOCT. [11]

No esquema, a luz emitida através de um LED é transportada por uma fibra óptica até um polarizador, depois de ser polarizada, a luz é injetada no meio rotador e logo após encontra o analisador. O analisador é outro polarizador rotacionado de 45° em relação o primeiro. O resultado deste artifício é que uma intensidade modulada do feixe de luz sai do

analisador e é transportada através de outra fibra óptica para um diodo PIN (usado para altas frequências) para demodulação e logo após segue para um amplificador do sinal de tensão que é proporcional à corrente no condutor. A saída do amplificador é uma representação fiel da corrente que flui pelo circuito primário do MOCT, limitada apenas pela habilidade que a eletrônica possui em representar informações de amplitude e frequência contidas no sinal óptico vindo do rotador. Um exemplo do sinal de saída para uma corrente primária de 2000 ampères é mostrada na figura 3-2.



**Fig. 3-2. Sinal de saída de tensão de um MOCT submetido a uma corrente primária de 2000 A. <sup>[11]</sup>**

O material usado na aplicação como rotador Faraday foi o quartzo. A montagem consiste no rotador em si, com os componentes ópticos associados; polarizador e analisador. Dimensionalmente, este rotador foi desenvolvido para que uma barra de cobre capaz de suportar 2000 A nominais, passasse através da abertura do sensor.

A figura 3-3 mostra o sensor com uma proteção de policarbonato e os terminais para conexão da linha de transmissão a ser medida. O aparato possui resistência mecânica capaz de suportar um curto circuito de curta duração de até 80 kA.

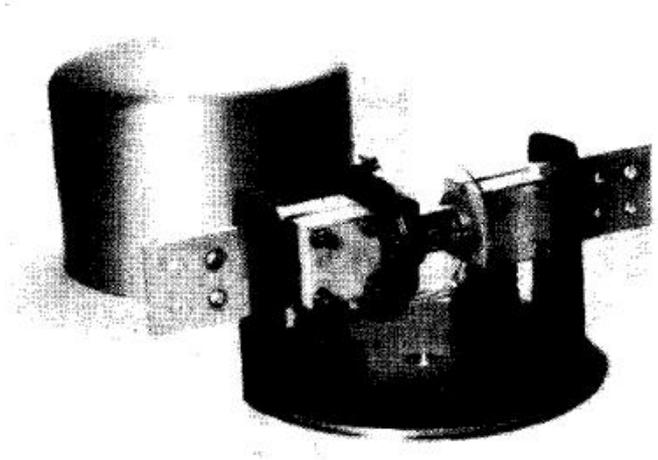


Fig. 3-3. Sensor de corrente MOCT montado com a devida proteção mecânica. <sup>[11]</sup>

### 3.2.1. Testando o equipamento

O equipamento foi integrado com a eletrônica necessária para produzir a saída desejada e foram realizados testes para determinar suas características. Os seguintes testes foram realizados:

1. Verificar o sistema de isolamento através do teste de alta tensão;
2. Avaliação de desempenho quando submetido a uma larga faixa de temperaturas.

Os testes de isolamento foram feitos de acordo com a sequência de testes contidas na norma ANSI C57 para transformadores de corrente submetidos a 750 kV. Os resultados dos testes foram satisfatórios, ou seja, ficaram dentro do padrão estabelecido.

O foco do trabalho foi os resultados da caracterização do sensor de corrente e a correlação entre os testes em laboratório e os resultados obtidos em campo.

Os testes para observar o comportamento do sistema sob uma considerável faixa de temperatura são apresentados na figura 3-4:

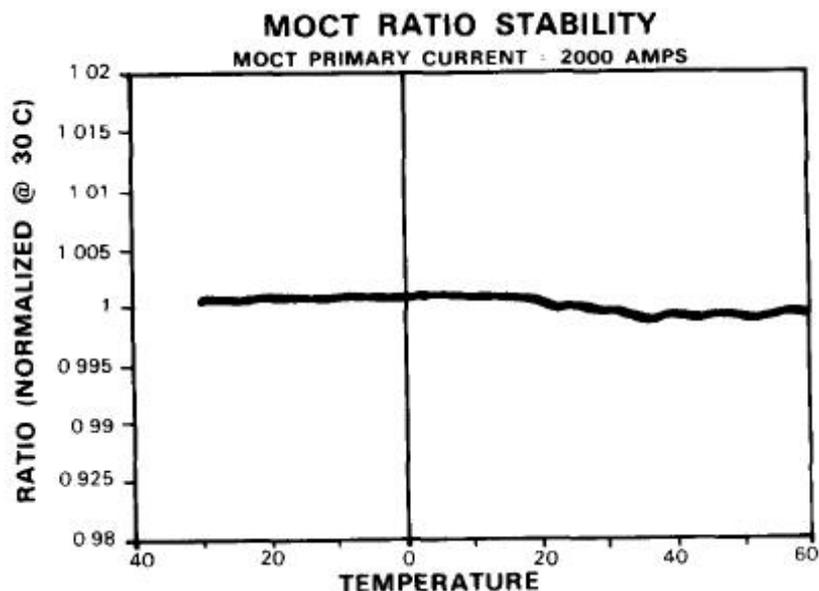


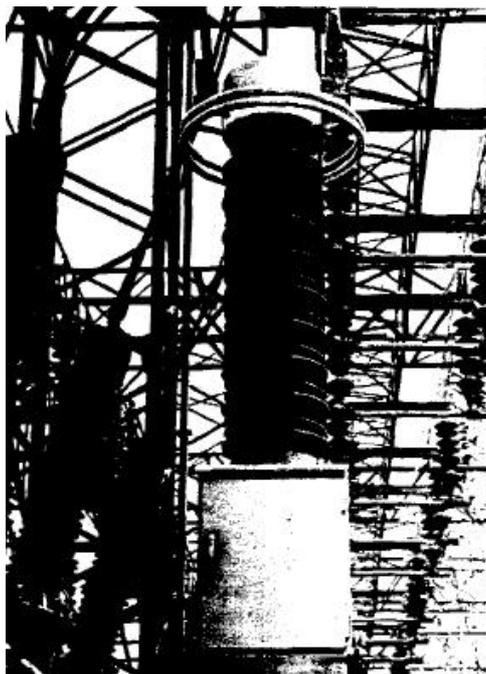
Fig. 3-4. Comportamento do MOCT diante da variação de temperatura. <sup>[11]</sup>

O exame dos perfis de temperaturas tomadas durante o teste de campo mostra que este é uma boa alternativa para a área do Tennessee, onde mudanças de temperatura eram tipicamente de 20 a 30 graus F em um período de 24 horas. A figura acima mostra a variação na taxa de desempenho do Sistema MOCT sob as condições de teste presentes em norma. Sob este teste extremo, o dispositivo exibe de erro máximo de 0,1% no intervalo de -30°C (-22°F) à 60°C (140°F).

### 3.2.2. Instalação em campo

Para ser capaz de instalar o MOCT ao lado de um disjuntor, um isolador de porcelana (originalmente concebidos para um TPC) foi usado para apoiar o rotador e fornecer um meio de isolamento. A parte eletrônica foi localizada na base da instalação, como mostrado na figura abaixo. As fibras ópticas foram passadas através do centro do isolador oco. O MOCT montado foi testado em um laboratório de alta tensão de acordo com as especificações de testes para transformadores de corrente da ANSI / IEEE C57.13, incluindo um teste a 750 kV.

O sistema MOCT foi então conectado em uma fase de uma linha de transmissão aérea isolada de 161 kV. Era ligado para monitorar o fluxo de corrente na fase “A” da linha de transmissão.



**Fig. 3-5. MOCT instalado em campo.** <sup>[11]</sup>

### **3.2.3. Sistema de coleta de dados**

Um sistema de aquisição de dados foi instalado na casa de controle e, usado para coletar dados e avaliar o desempenho do MOCT. Os dados são coletados a partir do MOCT e o sistema de referência juntamente com os dados de temperatura. Os dados coletados foram kilowatt.hora total, demanda instantânea em kilowatt, demanda acumulada em kilowatt, pico de demanda e horário do pico. Estes dados permitiram uma comparação direta entre a medição com o MOCT e um sistema de medição convencional com TC a óleo.

### **3.2.4. Dados coletados**

Após um ano de operação em campo, o MOCT acumulou um total de 113. 456 megawatt.hora (MWh) e o sistema de referência acumulou 113.366,6 MWh. A diferença de 89,4 MWh significa uma diferença percentual entre os dois sistemas de 0,08%.

### **3.2.5. Conclusões dos autores**

Após a avaliação dos testes o sensor MOCT quando comparado à medição convencional, apresenta um melhor desempenho. Em termos de comparação de desempenho em relação aos objetivos para o projeto, o teste de campo demonstrou o seguinte:

- Os sensores ópticos podem ser projetados para apresentar um desempenho confiável em ambientes de sistemas operacionais;
- Precisão e estabilidade no ambiente de subestações são obtidas com um design apropriado;
- Efeitos da temperatura, umidade, vibrações e interferências eletromagnéticas são insignificantes ou inexistentes quando o sistema é em comparado com o sistema convencional

Este teste representou um significativo ponto de partida para o desenvolvimento da tecnologia dos sensores ópticos para a aplicação em sistemas de potência. Na opinião dos autores, este deve ter sido o teste mais bem instrumentado e cuidadosamente monitorizado relatado na literatura até então. Acredita-se ser também ser a primeira aplicação de medição de alta precisão usando sensores de fibra óptica que demonstrou sucesso sob as condições da época num ambiente de alta tensão.

Dado este primeiro passo, as capacidades e os recursos do sensoriamento óptico de corrente, abrirá possibilidade para a conquista de uma maior confiabilidade, e larga faixa dinâmica que será conseguida com uma interface ótima entre sistemas de alta tensão e equipamentos eletrônicos desenvolvidos especialmente para monitorar e controlar esses sistemas. <sup>[11]</sup>

### 3.3. NXCT - TRANSDUTOR OPTO-MAGNÉTICO DE CORRENTE DESENVOLVIDO PELA NxtPhase

A empresa privada NxtPhase, de origem Norte-Americana mas que possui também raízes no Canadá, é líder mundial em sensores ópticos e soluções digitais aplicadas à alta e extra alta tensão. A NxtPhase desenvolve, manufatura e comercializa produtos do gênero.

As raízes de sua tecnologia em sensores de corrente foram na também norte-americana Honeywell, líder mundial nos sistemas de navegação Gyro (tecnologia desenvolvida para medição de corrente), que tem boa reputação em confiança e precisão nas indústrias aeronáutica e espacial para fins militares e comerciais.

O NXCT, sensor óptico de corrente desenvolvido pela empresa citada é um aprimoramento do MOCT falado anteriormente e pode ser montado na coluna de um avançado isolador polimérico (Fig. 3-6) ou mesmo em isoladores de suspensão.



**Fig. 3-6. Corte lateral do NXCT da NxtPhase.<sup>[9]</sup>**

O princípio de funcionamento é o seguinte:

1. O produto desenvolvido converte os sinais de luz emitidos por um LED em dois sinais linearmente polarizados. Logo após, ambos são enviados através de uma fibra óptica que mantém a polarização, até o sensor localizado no topo do equipamento;
2. No topo da coluna, há um polarizador circular que converte os dois sinais luminosos linearmente polarizados, ou seja, um fica com polarização circular esquerda, e o outro com polarização circular direita;

3. Esses sinais polarizados viajam em torno do condutor várias vezes e o campo magnético criado pela corrente no cabo atrasa um sinal e acelera o outro (Efeito Faraday);
4. Quando os sinais circularmente polarizados completam seu caminho em volta do condutor, estes são refletidos por um espelho e voltam através da fibra com direção de polarização reversa e, ao longo da fibra, o efeito é dobrado;
5. Ao chegar de volta no polarizador circular, este converte os sinais novamente em feixes de luz linearmente polarizados;
6. Os feixes de luz descem a coluna e a diferença de velocidade de propagação causa um deslocamento de fase entre os sinais lineares. Devido estes terem percorrido um caminho idêntico, fatores como vibração e variação de temperatura não influenciam a alta precisão na medição da corrente.

As especificações do NXCT encontram-se no Anexo 8.5 deste trabalho.

A seguir, descrevemos resultados apresentados num interessante artigo lançado em 2003 pelo IEEE, que estuda o desempenho do NXCT para medições de potência. <sup>[9]</sup>

### **3.3.1. Transdutor óptico de corrente otimizado para aplicações em medições de potência**

Os pesquisadores J. N. Blake e A. H. Rose fizeram um estudo visando demonstrar a boa linearidade obtida em medições de potência, numa larga faixa dinâmica de corrente com o NXCT e um wattímetro ligado ao seu “secundário”. Também apresentaram resultados quanto sua robustez mecânica e estabilidade sob severas condições ambientais.

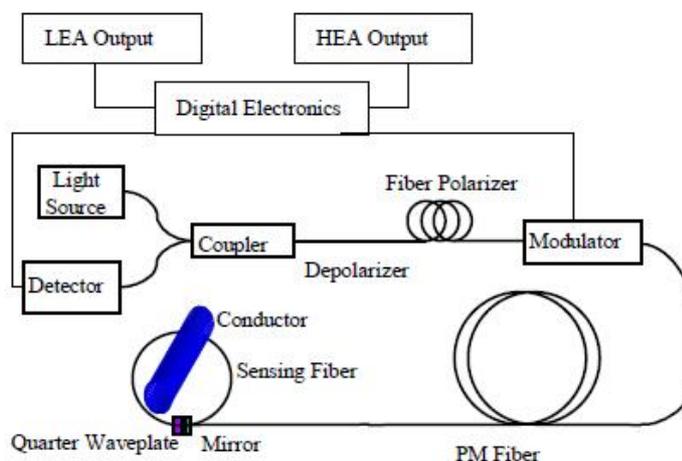
A precisão na medição de potência depende tanto do próprio instrumento de medição quanto dos transdutores de corrente e tensão que o alimentam. No passado as medições de corrente, tensão e potência eram todas analógicas e, aperfeiçoando desta forma cada componente do aparato de medição, melhorava-se a precisão do conjunto. Embora com o advento do processamento digital de sinais na medição de potência, a interação entre o wattímetro em si e os respectivos transdutores deve ser considerada, pois os transdutores enviam sinais analógicos ao wattímetro, e este por sua vez terá que realizar uma conversão

Analógica/Digital (A/D) desses sinais, que podem ser apresentados na forma digital ou convertidos de volta pra analógico e exibidos numa interface.

Enquanto os sinais analógicos podem ter alta precisão ao serem enviados direto para a medição da potência, se esses sinais forem de baixo nível principalmente, sua precisão deve ser afetada quando há uma conversão A/D no instrumento. Desta forma a medição de corrente, por exemplo, fica comprometida no que diz respeito à precisão, devido à não linearidade apresentada fora de uma certa gama de valores. Assim, é sabido que há esse problema gerado especificamente na conversão A/D dos sinais oriundos dos sensores ópticos.

Transdutores de corrente ópticos com processamento de sinais eletrônicos podem condicionar suas saídas analógicas para a entrada dos medidores de potência, melhorando assim seus resultados quando comparados aos sensores convencionais. O artigo estudado mostra os excelentes resultados obtidos com o sensor chamado de NXCT, no que diz respeito às precisões obtidas numa larga faixa de corrente.

A figura 3-7 mostra o esquema do design óptico e dispositivos de saída.



**Fig. 3-7. Diagrama esquemático do NXCT.**

A saída básica do sensor é uma “palavra digital” que é convertida numa saída analógica de baixa energia (LEA – 4 V) e numa saída analógica de alta energia (HEA – 1 A). Foi observado que o NXCT possui uma alta estabilidade.

O seu design mecânico garante baixos custos de instalação, pouco peso, robustez mecânica, bom desempenho quanto exposição ao sol e estabilidade de temperatura quando submetido a correntes elevadas. O exemplar visto na figura 3-8 é aplicado a 345 kV, pesa aproximadamente 60 kg, suas especificações obedecem a IEC 60044-8 (classe Y, para uma

corrente térmica de 3000 A). O TCO foi testado a  $63 \text{ kA}_{\text{RMS}}$  e uma corrente dinâmica de  $171 \text{ kA}_{\text{pico}}$ .<sup>[10]</sup>



Fig. 3-8. NXCT.<sup>[10]</sup>

A figura 3-9 mostra a estabilidade do NXCT sob vários ciclos de temperatura. O TCO mantém-se dentro da classe de precisão de acordo com a norma IEC 0.2S.

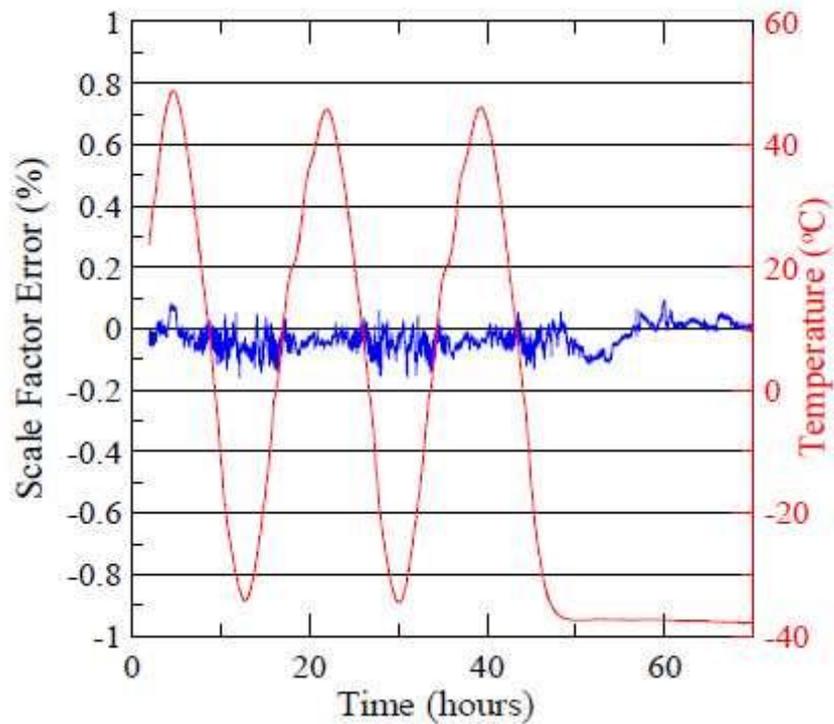
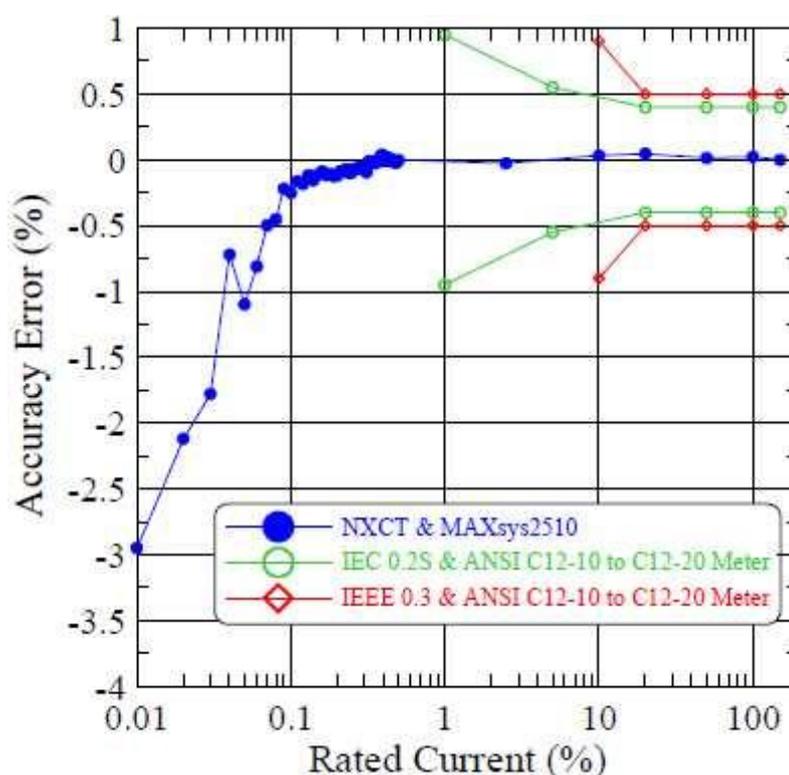


Fig. 3-9. Desempenho apresentado pelo NXCT submetido a temperaturas variadas.<sup>[10]</sup>

### 3.3.1.1. Medição de potência com o NXCT

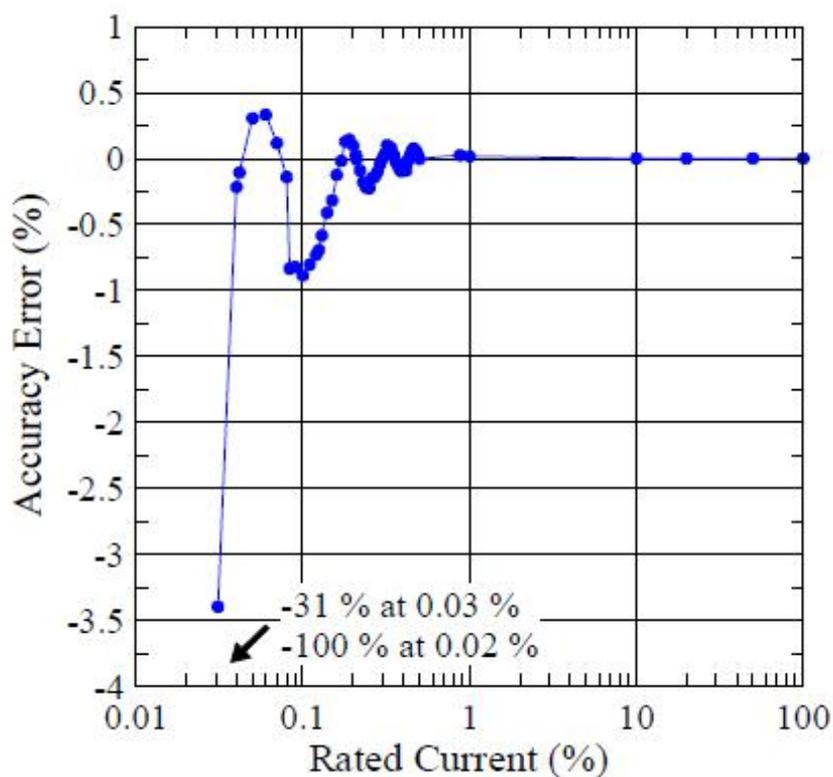
Sabemos que a precisão das medidas de potência depende tanto dos sensores de corrente e tensão, como do instrumento que medirá a potência. Para testar a linearidade do sensor NXCT, foram feitos ensaios usando o MAXsys 2510 para medir potência.

Para o teste, o NXCT foi configurado para ter 1 A (rms) na saída, com uma carga nominal de fator de potência próximo à unidade. Foram aplicadas correntes de 0.01% a 150% do valor nominal. A figura 3-10 mostra o erro de precisão já na medição de potência:



**Fig. 3-10. Erro de precisão na medição de potência versus corrente aplicada ao conjunto NXCT e Maxsys 2510 (100 % = 1 A no secundário.)<sup>[10]</sup>**

Analisando o gráfico acima, concluímos que o sistema mantém a precisão de 0,2 % na faixa de 0,1 % – 150 %. Para correntes abaixo de 0,1 %, a precisão cai vertiginosamente para -3 %, o que é curioso e está sob investigação pelos autores. A figura 3-11 também ilustra resultados da combinação entre TCs convencionais seguem as classes IEEE 0.3 e IEC 0.2S com wattímetros que seguem a classe ANSI C12.10-20.



**Fig. 3-11. Erro de precisão na medição de potência versus corrente aplicada ao conjunto TC convencional e Maxsys 2510 (100 % = 1 A no secundário.) <sup>[10]</sup>**

### 3.3.1.2. Conclusões dos autores

Para aplicação em medições localizadas onde larga faixa dinâmica e alta precisão são requeridas, a combinação do NXCT e um wattímetro digital são uma solução atrativa. Foi demonstrado que o TCO da NxtPhase combinado com o wattímetro Landis+Gyr MAXsys 2510 podem apresentar menos de 0,2 % de precisão para uma faixa de corrente entre 0,01 % e 150 %.

Este melhoramento de faixa permite a medição de pequenos fluxos de potência ou picos muito altos. É indicado também em outras aplicações onde grandes mudanças de fluxo de potência ocorrem. No futuro, o processamento direto das saídas digitais dos sensores ópticos aliviará o problema da não-linearidade da conversão A/D. TCOs têm capacidade de saída digital e são ideais para todas as medições digitais de potência. O custo total de instalação e manutenção do NXCT (em relação aos TCs convencionais) é baixo, devido ao seu tamanho, leveza e robustez sobre o meio ambiente. <sup>[10]</sup>



Fig. 3-12. Aplicação de um NXCT em subestação com tensão de operação de 420 kV. <sup>[10]</sup>

### 3.4. APLICAÇÃO DE UM TCO NA PROTEÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Há algumas técnicas utilizadas na implementação dos sensores ópticos de corrente, uma delas é a *bulk optics*, baseada no uso do material opto-magnético denominado de *bulk*. Nessa implementação, a fibra transporta a luz até o material opto-magnético *bulk*. A luz é então modificada e retorna para um detector de intensidade luminosa, onde é analisada.

Outra classe de sensores são os conhecidos por *all-fibre*, neste, a fibra é envolvida no mecanismo sensor. A fase óptica da luz que atravessa a fibra é modulada pelo campo magnético criado pela corrente e medida interferometricamente. A literatura nos mostra que esta classe de sensores oferecem mais vantagens devido menores perdas ópticas.

O maior problema nesse último tipo de sensor é que o nível de birefringência da fibra é afetado por vibrações apresentadas em ambientes hostis de medição, porém o problema pode ser resolvido mediante certos cuidados durante a montagem dos equipamentos.

Uma alternativa que se apresentou bastante efetiva na solução do problema foi a inclusão de um espelho (*Mirror Faraday Rotator*, MFR) dentro da própria fibra, para reduzir

os efeitos das perturbações originadas por ocasionais vibrações. Os sensores *all-fibre* com esse tipo de modificação são conhecidos por MRF-FOCTs.

Em 1997, H. Y. Li, P. A. Crossley e R. K. Aggarwal apresentaram uma aplicação dos MRF-FOCTs à proteção de sistemas elétricos.

O texto descreve o projeto de um transdutor óptico de corrente baseado num rotador Faraday. São usadas técnicas de simulação computacional para modelação do transdutor para avaliar sua operação. O sensor é usado para reproduzir as formas de onda da corrente de falta num alimentador de distribuição de 33 kV. As formas de onda medidas são processadas por artifício de correntes diferenciais aplicadas para a proteção deste alimentador. O desempenho da operação da proteção é analisado e comparado com o desempenho obtido quando são usados TCs convencionais. <sup>[11]</sup>

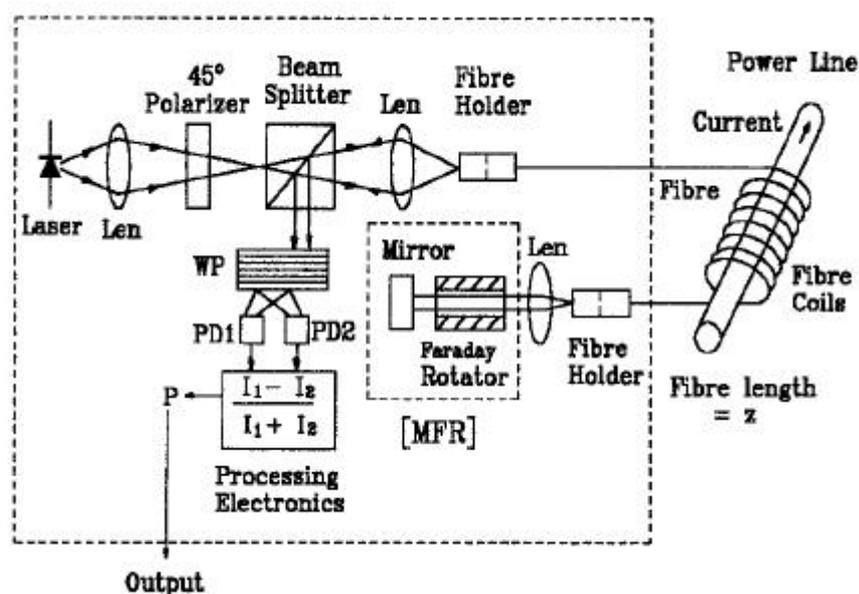


Fig. 3-13. Configuração do MRF-FOCT. <sup>[11]</sup>

Nesse tipo de sensor, a máxima variação no ângulo de polarização é de  $\pm 90^\circ$ , onde a região linear de alta precisão é de poucos graus. Esse fator limita a aplicação do MRF-FOCT, dependendo da faixa dinâmica de valores a serem medidos. A tabela 3-1 lista os efeitos na variação de faixa de medição de acordo com a variação no número de espiras de fibra óptica do MRF-FOCT.

fibre Coil turns N	90% linear current range	Maximum current range
1	±130.4kA	±198.8kA
2	±54.8kA	±99.4kA
10	±10.0kA	±19.8kA
30	±3.2kA	±6.63kA
50	±2.1kA	±3.94kA
100	±1.08kA	±1.98kA

Tab. 3-1. Faixas de medição de corrente do MFR-FOCT. <sup>[11]</sup>

A tabela 3-1 mostra que as faixas de medição variam em função do número de espiras de fibra óptica usadas no sensor, ou seja, a faixa aumenta à medida que diminui o número de espiras, porém, a sensibilidade também é reduzida e, conseqüentemente o uso em medições de pequenas correntes se torna inadequado.

Um esquema para proteção diferencial foi montado usando o MFR-FOCT, na proteção de um alimentador de distribuição de 33 kV de 10 km submetido a um curto-circuito fase-terra da faixa de 3,2 kA. Foram feitos dois testes, A e B, o primeiro com 30 espiras e o segundo com 50 espiras, ambos com 10 m de fibra óptica.

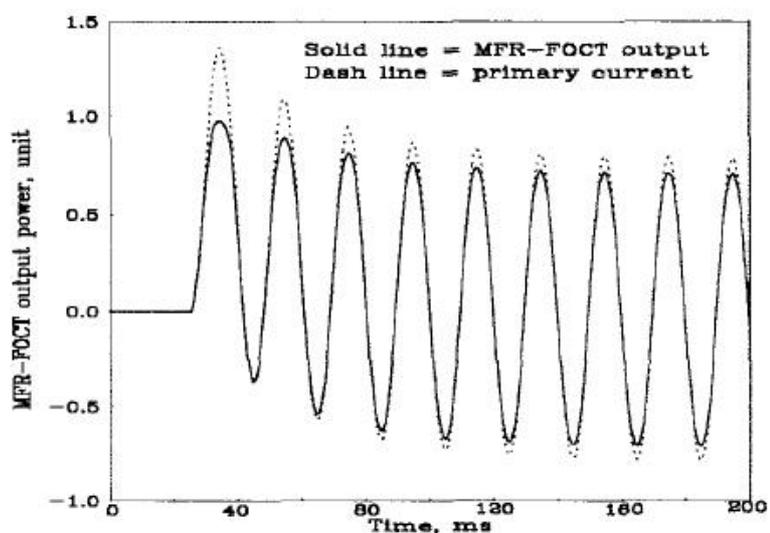


Fig. 3-14. Resposta do MFR-FOCT "A" (50 espiras) para uma corrente de falta fase-terra. <sup>[11]</sup>

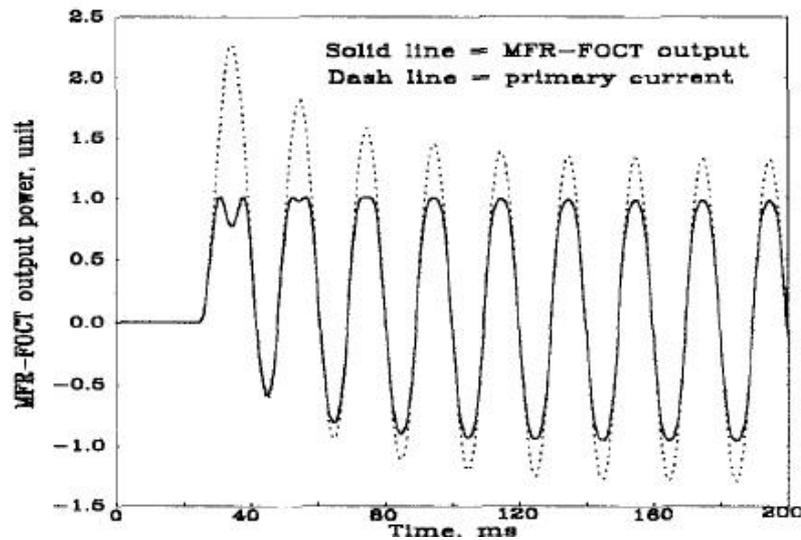


Fig. 3-15. Resposta do MFR-FOCT “B” (50 espiras) para uma corrente de falta fase-terra. <sup>[11]</sup>

Comparando as duas figuras 3-14 e 3-15, veremos que enquanto “A” apresenta um nível DC, “B” mostra uma distorção significativa, devido ao maior número de espiras (50), pois olhando a Tab.3-1, quanto mais espiras, menor a faixa de corrente capaz de ser medida com precisão. Porém, “B” é mais preciso que “A” quando as correntes são menores.

Desta forma, é necessário selecionar um MFR-FOCT apropriado para a máxima amplitude de corrente de falta possível de ocorrer.

Os autores fizeram também um teste usando o TC convencional, que é mostrado na figura 3.16.

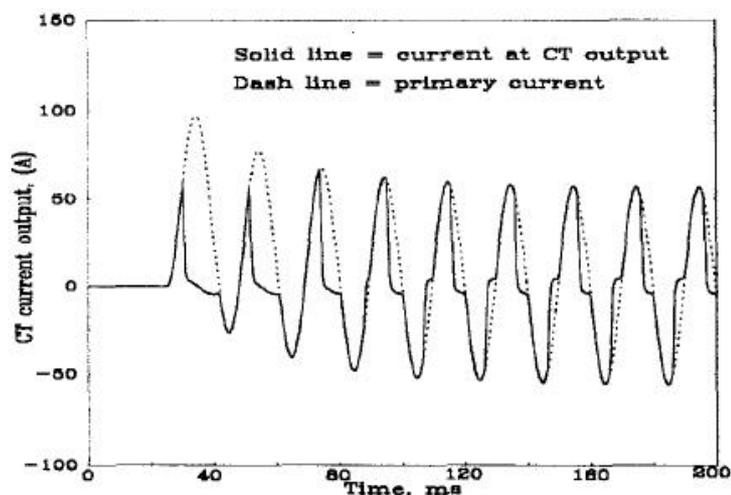


Fig. 3-16. Resposta de um TC convencional a uma falta fase-terra. <sup>[11]</sup>

Como podemos observar, a corrente de falta é severamente distorcida, devido à saturação do núcleo de ferro do TC.

A figura abaixo mostra o gráfico da corrente diferencial versus a corrente de restrição para: (i) a corrente de falta externa medida por TC convencional (círculos vazios), (ii) falta externa medida pelo MFR-FOCT (círculos preenchidos), (iii) faltas internas medidas pelo TC convencional (quadrados vazios) e (iv) falta interna medida pelo MFR-FOCT (quadrados preenchidos). A escala dos sinais de saída dos sensores ópticos foi calibrada para combinar com as do TC.

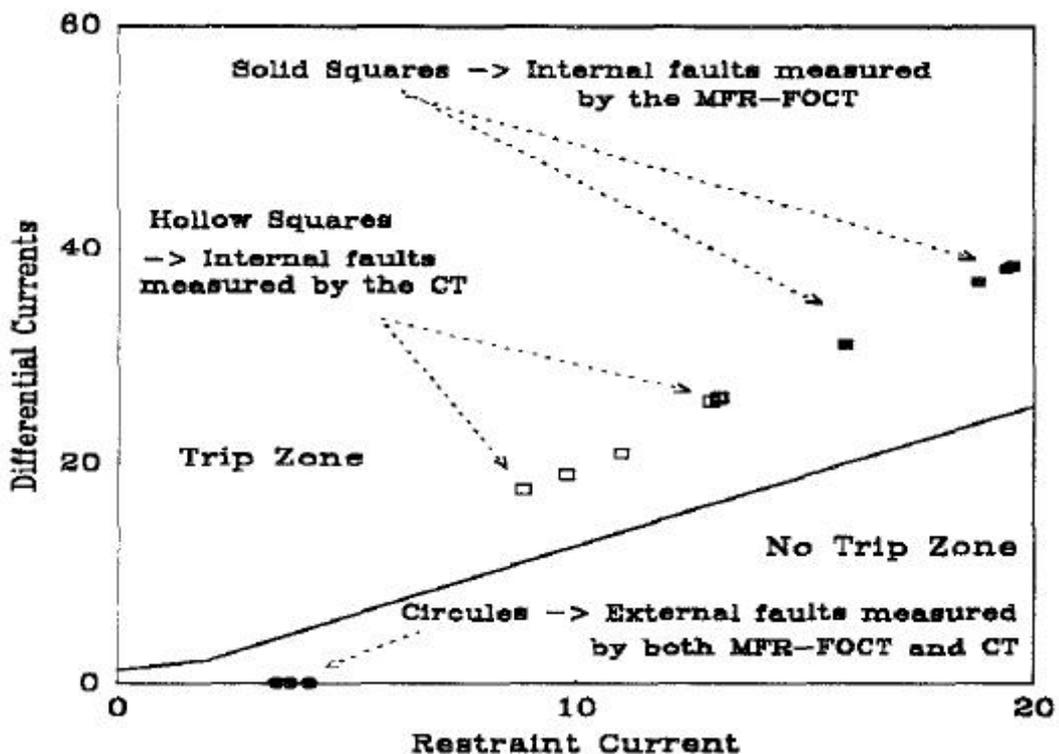


Fig. 3-17. Desempenho da proteção contra faltas internas e externas usando TC convencional e um TCO com o transdutor MFR-FOCT. [11]

Na figura 3.17, vemos que para faltas externas, tanto as correntes diferenciais, quanto as de restrição são nulas. Para baixas correntes de falta, foi visto que os erros apresentados nas duas configurações (com TCO e com TC convencional), além de serem mínimos, são os mesmos. Porém para faltas internas, observa-se que com o uso do TC convencional a proteção responde a correntes mais baixas do que quando é usado o MFR-FOCT. A razão disto, segundo H. Y. Li, P. A. Crossley e R. K. Aggarwal, é justamente devido à saturação do núcleo do TC.

Quando se considera a resposta de operação da proteção, tanto a corrente da saída do TC, quanto a da saída do MFR-FOCT estão significativamente acima da característica de operação, conseqüentemente a operação não tem problema em atuar em qualquer caso que a falta é interna ao alimentador a ser protegido.

O efeito da remanência nos TCs deve também ser levado em consideração, pois pode provocar erros severos quando a corrente de falta é relativamente baixa. Isso significa que no caso de uma falta externa, os erros devido à remanência podem induzir o algoritmo de proteção a detectar esta falta dentro da zona de atuação. Para fazer o combate a esse tipo de erro, reduz-se a sensibilidade da proteção.

Justamente por isso é que o uso do MFR-FOCT é preferido em detrimento ao TC convencional, ou seja, não tem o problema da remanência e desta forma melhora a sensibilidade dos relés diferenciais usados na proteção dos sistemas elétricos.

Uma desvantagem do MFR-FOCT quando comparado ao TC convencional é devido à limitação de sua precisão em função da faixa de operação, pois quando o mesmo é projetado para medir altas correntes de falta e a corrente no momento da falta é baixa, sua precisão cai. De modo que, para resolver esse problema, o tipo do MFR-FOCT aplicado deve ser cuidadosamente escolhido para alcançar uma precisão aceitável, quando esta corrente de falta for baixa. <sup>[11]</sup>

### 3.5. UM TCO HÍBRIDO

No ano de 2003, os pesquisadores Wenbin Yu, Guonqing Zhang e Zhizhong Guo, ambos membros do IEEE, publicaram o artigo “A Hybrid Optical Current Sensor for Power System Metering and Protection”.

O modelo é dito híbrido devido ser formado pela combinação do sensor do tipo *bulk-optic* com os sinais amostrados de um TC convencional. Nesse projeto, adotou-se uma técnica de ajuste de coeficientes, onde usando as saídas estacionárias de um TC convencional, ajustam-se as saídas da cabeça sensora bulk-optic, melhorando efetivamente a estabilidade da precisão ao longo do tempo e também os desempenhos transitórios e estacionários.

De acordo com K. Bohner, P. Gabus, J. Nehring e H. Brändle num artigo publicado no JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 20, NO. 2, FEBRUARY 2002, em materiais com elevada constante de Verdet, esta pode sofrer sensíveis variações ao longo do tempo devido à temperatura e vibrações. Ainda neste artigo, os mesmos apresentam um

método de compensação nas medições, entre outros encontrados na literatura. O fato é que a complexidade desses métodos reduz a confiabilidade dos sensores ópticos.

Os TCs convencionais, apesar de apresentar as desvantagens já comentadas anteriormente, têm a vantagem de terem precisão estacionária, pois são insensíveis à temperatura. Os autores se aproveitaram desta importante característica dos TCs, para através de um coeficiente desenvolvido matematicamente, ajustar as leituras apresentadas pelo sensor óptico.

Uma expressão para a saída do sensor óptico pode ser

$$u = k(T).i \quad (3.2)$$

onde,  $i$  é a corrente primária,  $u$  é a saída de tensão do sensor bulk-optic e  $k(T)$  é o coeficiente de proporção, que é função da temperatura.

Num curto-circuito, antes deste ocorrer, as correntes primárias são medidas e gravadas precisamente por um TC. De acordo com as correntes, os coeficientes do sensor são calculados. Em vez de usar os coeficientes antes da falta, os coeficientes depois da falta que são usados para implementar a compensação.

Além de fazer a devida compensação, quando por algum motivo o sensor óptico não funcionar, o TC convencional pode ser usado. [12]

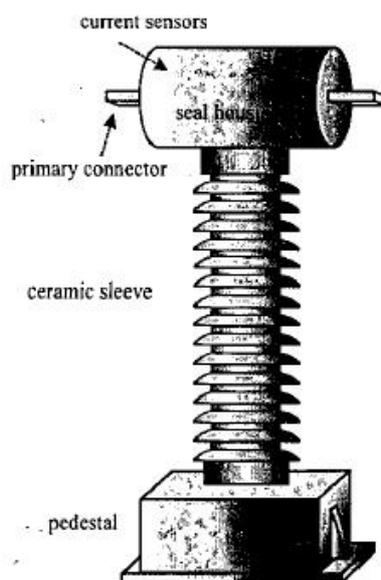


Fig. 3-18. Protótipo do HOCS. [12]

Desta forma, o uso da tecnologia HOCS se mostra conveniente, pois esta alternativa contribui para que o progresso prático dos sensores ópticos de corrente não desacelere em consequência da desvantagem apresentada. [12]

## 4. TPs ÓPTICOS

### 4.1. INTRODUÇÃO

Um medidor óptico de tensão não mede diretamente a tensão elétrica, porém, em tal dispositivo, a variação do campo elétrico associado a esta tensão, provoca alteração nas características de certos materiais submetidos à presença deste campo. Com isto, algum parâmetro da onda luminosa como, por exemplo, sua polarização ou sua fase, pode ser alterado ao atravessar esta região do material. Por exemplo, em 1987, um trecho de fibra óptica revestida com Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) foi utilizado como parte de um sensor interferométrico, proporcionando modulação de fase óptica na presença de campo elétrico externo. O PVDF é um polímero piezoelétrico que se deforma na presença de campo elétrico. Em 1993, o efeito eletro-óptico do niobato de lítio foi aplicado na modulação por campo elétrico, num sensor de alta tensão, confeccionado em óptica integrada. Em 1995, o primeiro sistema de medição baseado em um transdutor opto-elétrico de tensão (*eletro-optic voltage transducer*, EOVT) foi fabricado e instalado em campo.

Como se observa através dos exemplos citados, sensores ópticos de tensão foram relatados nas duas últimas décadas, sendo que a maioria destes é baseada no efeito eletro-óptico em material cristalino volumétrico (*bulk*). As vantagens dos sensores que usam cristais eletro-ópticos são: a influência de campos eletromagnéticos externos é reduzida devido à maioria dos materiais que formam os sensores serem dielétricos e a largura de banda de operação ser muito grande.

O efeito eletro-óptico pode ser descrito como a propriedade de um material apresentar uma birrefringência induzida por um campo elétrico externo. A birrefringência é um fenômeno que resulta quando duas ondas, com polarizações ortogonais entre si e que se propagam numa mesma direção, possuem velocidades diferentes.

O efeito eletro-óptico quadrático, observado originalmente em líquidos como o dissulfeto de carbono, é conhecido como efeito Kerr. O efeito eletro-óptico linear, que acontece em materiais cujas redes cristalinas não exibem centro de simetria, é conhecido como efeito Pockels. Quando o efeito eletro-óptico linear está presente em um material, este é dominante e, geralmente, o efeito quadrático é desconsiderado por ser muito reduzido. Uma célula Pockels transversal é um dispositivo composto pelo cristal eletro-óptico colocado entre eletrodos planos (em forma de sanduíche), paralelos à direção de propagação do feixe de laser. [3]

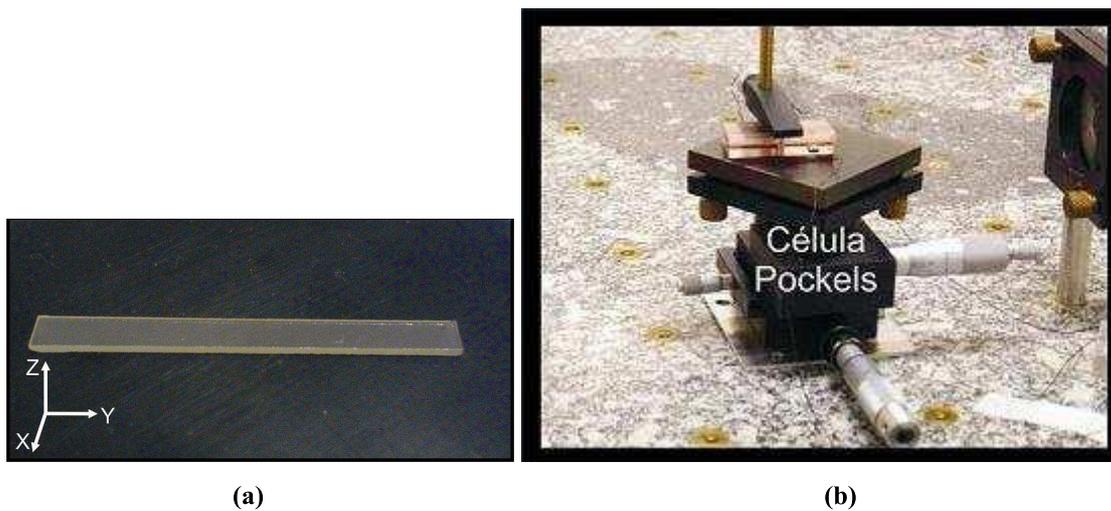


Fig.4-1. Célula Pockels de LiNbO3 empregada num sensor óptico de tensão. (a) Cristal de LiNbO3 utilizado como elemento sensor. (b) Célula Pockels transversal montada com o cristal num suporte. <sup>[3]</sup>



Fig.4-2. Sensor óptico de tensão montado num laboratório. <sup>[3]</sup>

## 4.2. EOVT

### 4.2.1. Princípios de operação do EOVT

O transdutor opto-elétrico de Tensão opera usando uma variação do efeito eletro-óptico de Pockels, denominado Célula de Quadratura de Pockels. O efeito de Pockels é o

nome do princípio físico que descreve como um campo elétrico pode modular o estado de polarização da luz, à medida que esta passa através de um material transparente.

A configuração usada pelo EOVT pode ser descrita como células de Pockels longitudinais, dentro de um mesmo cristal. Cada célula representa um plano óptico pelo qual se propaga um feixe de luz polarizada. A célula de quadratura de Pockels se mostra na Fig. 4-3. O feixe de luz é dividido em dois por um polarizador, e um deles passa por uma placa de onda que produz um defasamento de  $+45^\circ$ , enquanto o outro passa por uma placa que produz um defasamento de  $-45^\circ$ . Por conseqüência, os sinais estão em quadratura. A tensão nos terminais do cristal dá origem a um campo elétrico que produz uma modulação na freqüência da luz. Quando a luz se propaga de um extremo ao outro do cristal, a modulação representará a integral da intensidade do campo elétrico, cópia fiel da tensão aplicada. A forma de onda da tensão é reconstituída digitalmente a partir de amostras dos sinais em quadratura. [7]

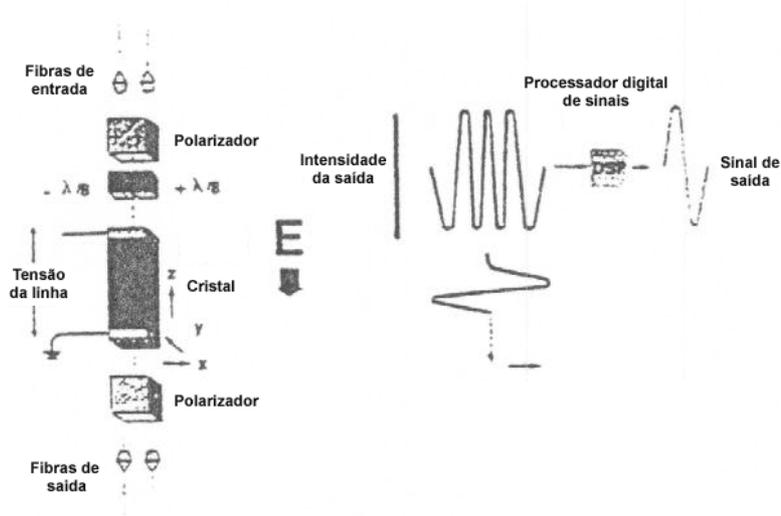


Fig. 4-3. Diagrama de sinais nas células de quadratura de Pockels. [7]

Em suma, o sensor eletro-óptico reduz a forma de onda da tensão e a mede como a integral do campo elétrico presente no caminho do sinal óptico. O EOVT descarta a necessidade de divisores de tensão, e sua precisão não é afetada pela presença de objetos metálicos, como é o caso dos divisores capacitivos tradicionais.

A Fig. 4-4 mostra o diagrama completo do conjunto óptico usado no conceito de quadratura da célula de Pockels. O feixe é disparado em uma extremidade do cristal. No outro extremo há um prisma que faz a reflexão do sinal, o que permite que as fibras e demais elementos ópticos possa ficar no extremo aterrado do equipamento, facilitando o alojamento e conexões ópticas. Esta configuração em dupla trajetória resulta numa modulação óptica dupla, como na célula tradicional de Pockels.

O módulo eletrônico do EOVT utiliza LEDs e fotodiodos para a prover a luz que tráfegará no cristal. Além disso, contém uma unidade de processamento digital, um conversor D/A e uma unidade de processamento analógico que fornece o sinal de saída.

Eletrodos realizam a conexão entre a linha e o cristal, que deve ser suficiente largo para suportar a tensão de linha. A precisão de medição excede a Classe 0.3, de acordo com a norma ANSI C57, e a Classe 0.2 de acordo com a IEC, com uma carga de 75VA. A tensão de saída é de 120 V, proporcional à tensão medida.

O cristal fica dentro de isoladores ocos, feitos de material polimérico e preenchidos com SF<sub>6</sub>, o que provê o isolamento necessário para tensão de fase.

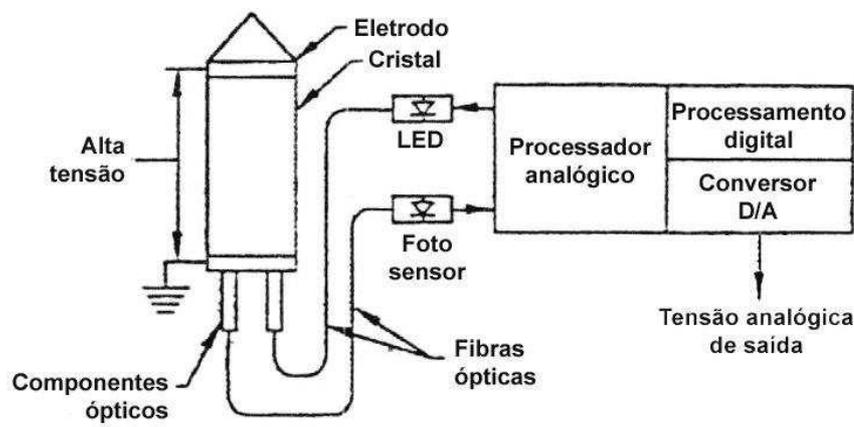


Fig. 4-4. Diagrama de blocos do Sensor óptico de tensão. [7]

#### 4.2.2. Aplicações do EOVT

A tecnologia EOVT tem sido instalada em estruturas tipo coluna, até 420 kV. Um isolador cilíndrico oco é usado para suportar a unidade e alojar o sensor conectado entre a linha e a terra, em um ambiente preenchido com SF<sub>6</sub>. Além da alta precisão, os EOVTs têm baixo tempo de resposta transitória, isolamento óptico desde o circuito de alta tensão e não uso de óleo dielétrico. Estas vantagens tornam o EOVT excelente opção para subestações blindadas a SF<sub>6</sub>. Os primeiros modelos foram comercializados em 1997. [7]

#### 4.3. NXVT - TRANSDUTOR OPTO-ELÉTRICO DE TENSÃO DESENVOLVIDO PELA NxtPhase

Na subseção 3.3 apresentamos o NXCT (transdutor magneto-óptico de corrente), desenvolvido pela empresa Norte-Americana NxtPhase, como um aprimoramento do MOCT

visto na seção 3.2. Assim como existe o NXCT, foi também desenvolvido o NXVT (transdutor eletro-óptico de tensão), que trás melhoramentos ao antigo EOVT.

O NXVT combina os benefícios típicos da tecnologia de sensoriamento óptico com destaques adicionais que promovem outros benefícios aos usuários. Um exemplo é a não necessidade de SF6 ou isolamento à papel-óleo, tornando-o mais ambientalmente amigável e de uso mais seguro. Ele consiste numa coluna de isolador oco, com pequenos sensores de campo montados em seu interior, montados de tal forma a não sofrer influência do campo exterior (outras fases).

Depois de muitas modelagens, um protótipo de 230 kV foi desenvolvido e testado para comprovar suas características teóricas (Fig. 4-6). Tal protótipo consistiu num isolador polimérico de alta qualidade de 2,3 m, com eletrodos metálicos e buchas em seus terminais e três sensores de campo elétrico encapsulados (células de Pockels). Essas células foram divididas ao longo da coluna do isolador oco. [9]



**Fig. 4-5. NXVT (primeiro protótipo).** <sup>[9]</sup>

O transdutor foi testado em Abril de 1999. Sua eletrônica analógica e digital foi encapsulada numa caixa de cobre, logo abaixo da coluna montada num suporte de 2,5 m. As fibras saíam debaixo da coluna e eram conectadas à caixa de cobre onde, os dados digitais que representavam o campo elétrico medido pelos três sensores de tensão eram transmitidos a um computador de aquisição de dados à taxa de 66 ks/s.

Hoje em dia o NXVT (Figs. 4-6 e 4-7) é o único sensor óptico de tensão capaz de realizar medições acima de 550 kV (enquanto que o EOVT realizava medições até no máximo 420 kV).

As principais vantagens desse produto são:

1. Precisão na medição e Proteção: o NXVT ultrapassa as classes de precisão IEC 0.2 e IEC 0.3 para medição fiscal e também a classe IEC 3P exigida para proteção e, desta forma, o TPO pode ser usado tanto para medição quanto pra proteção;
2. Ajuste de relação: o sensor é altamente linear e destaca-se por ter um ajuste eletrônico para várias classes de tensão;
3. Leveza e volume reduzido;
4. Seguro e ambientalmente correto: a coluna de isolador não contém óleo ou gás SF<sub>6</sub>;
5. Baixa necessidade de manutenção: o material que reveste a coluna isolante é a borracha de silicone, que não tem necessidade de se fazer limpeza. [9]

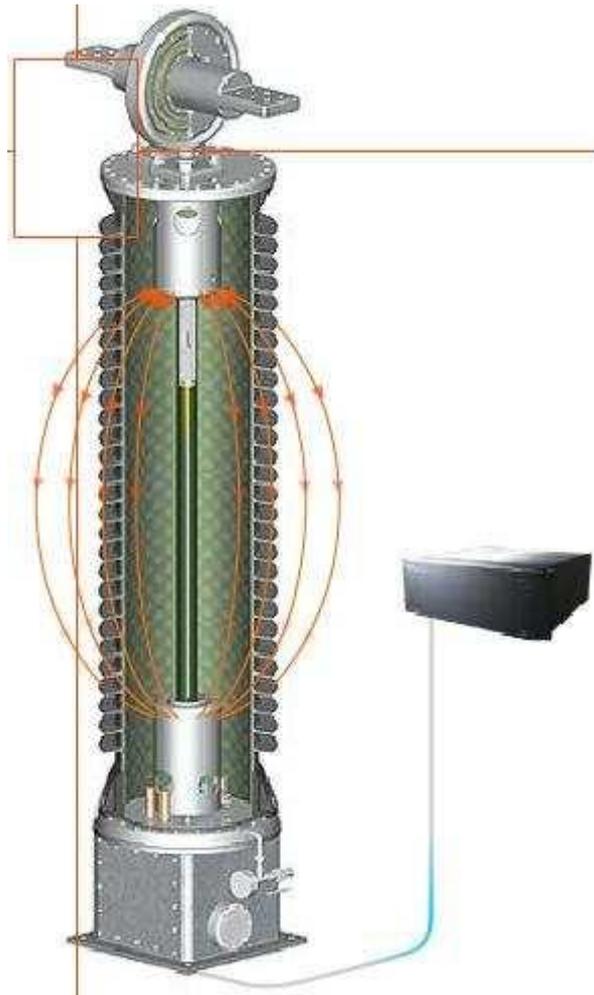


Fig. 4-6. NXVT (modelo mais atual).<sup>[9]</sup>



Fig. 4-7. Interface eletrônica de um NXVT.<sup>[9]</sup>

O princípio de funcionamento é o seguinte:

1. A tensão no condutor cria um campo elétrico entre a linha e a terra;

2. Dispositivo eletro-óptico envia o sinal luminoso gerado por um LED, através de fibra óptica;
3. Esse sinal luminoso sobe pela coluna de isolamento;
4. A luz entra pelas três células de Pockels localizadas estrategicamente ao longo do isolador;
5. Como a luz passa pelo cristal, o campo elétrico muda sua polarização circular para uma polarização elíptica e, a medição precisa dessa “elipsidade”, provê uma medição precisa da tensão a que o isolador está submetido;
6. Os dados provenientes dos três sensores estrategicamente localizados são combinados e tratados para render uma alta acuracidade nas medições, que não sofrem com influências externas, como outras estruturas de elevado potencial próximas ao NXVT. [9]

As especificações desse produto estão no Anexo 8.2 deste trabalho.

#### 4.4. MEDIDA DE DESEMPENHO DE UM TRANSDUTOR ÓPTICO DE TENSÃO APLICADO À FAIXA DE 132 kV A 150 kV

Na *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995*, consta uma outra abordagem do Engenheiro Dinamarquês Lars Hofmann Christensen, da Universidade Técnica da Dinamarca, onde este apresenta o artigo: *Design, construction, and test of a passive optical prototype*.

Foram realizados e apresentados três testes num trnsdutor óptico de tensão, a fim de verificar:

1. A influência da temperatura;
2. A relação de transformação.

Os resultados são apresentados na sequência. [13]

##### 4.4.1 – Teste de temperatura

A Fig. 4-8 faz alusão à dependência de temperatura do módulo óptico, quando submetido a temperaturas entre -40°C e 70°C.

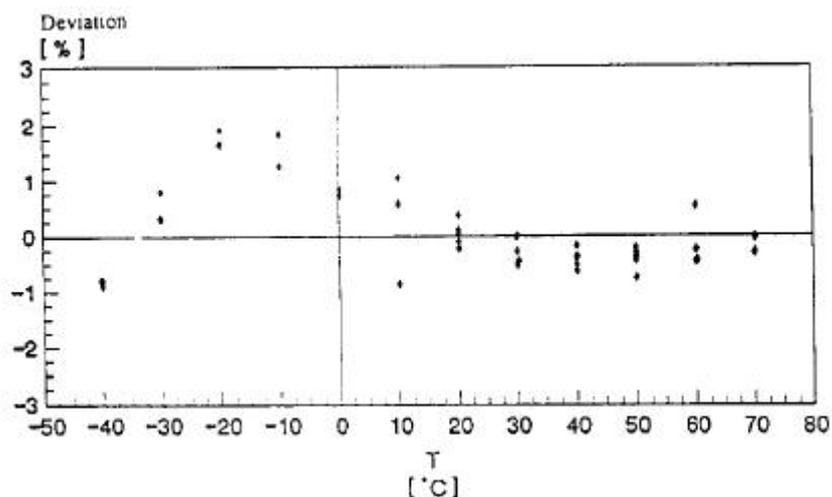


Fig. 4-8. Resultado do teste de influência da temperatura. [13]

Como pode ser visto, o erro de relação do módulo óptico é em média:  $\pm 1.3\%$  na faixa de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C}$  e de  $\pm 0.5\%$  na faixa de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $70^{\circ}\text{C}$ . [13]

#### 4.4.2. Relação de transformação

A relação de transformação foi armazenada e apresentada num gráfico (Fig. 4-9) que mostra o valor RMS da saída de tensão AC em função do valor RMS da tensão aplicada no OVT.

Para tensões inferiores a 100 kV, foram feitas duas medições separadas para cada ponto plotado no gráfico, porém, a reprodução das medidas, é tão correlacionada que as duas medidas se apresentam praticamente como um único ponto. [13]

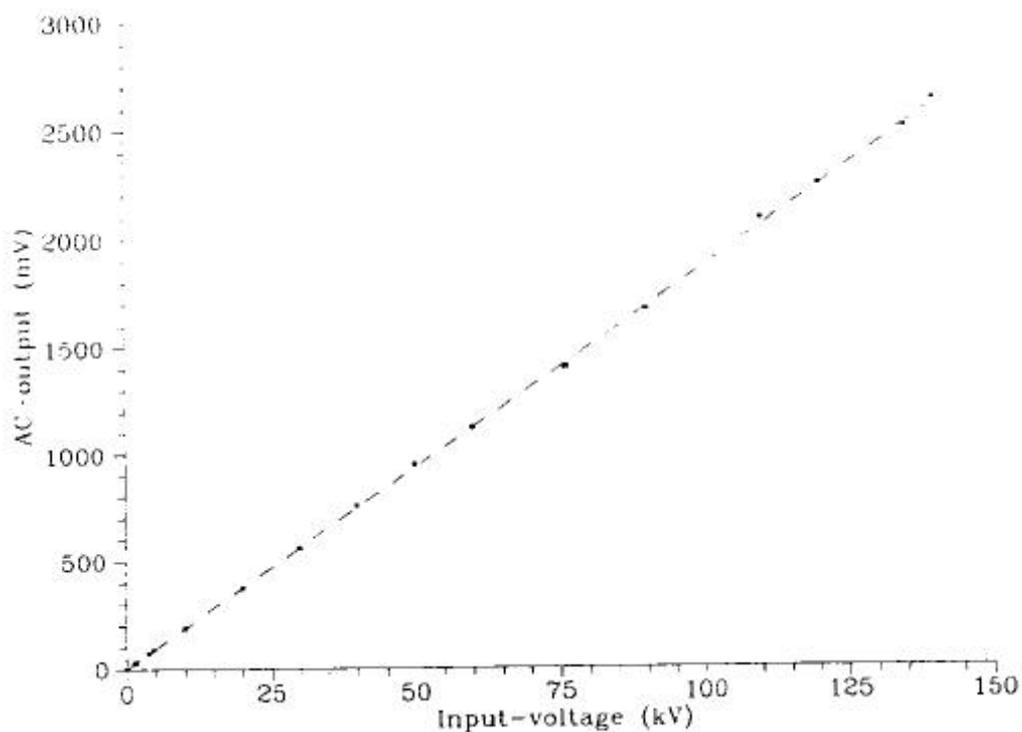


Fig. 4-9. Saída de tensão AC do OVT em relação à tensão aplicada. <sup>[13]</sup>

Acima de 100 kV, foi feita apenas uma medição. O gráfico revela uma relação altamente linear confirmada por um coeficiente de correlação igual à unidade.

A reta pode ser descrita pela equação:

$$V_{ac} \text{ de saída do OVT} = 1,9E-5 \times V_{ac} \text{ de linha aplicada} + 2,5E-4 \quad (4.1)$$

#### 4.4.3. Considerações sobre o peso

O peso do protótipo testado é de aproximadamente 275 kg, ou seja, praticamente a metade do peso dos transformadores de tensão convencionais para a mesma faixa de tensão.

Essa redução de peso é devido ao sensor em si e também à ausência da isolamento à óleo, que pesa aproximadamente 80 kg.

A vantagem disso é a facilidade de transporte e instalação do TCO. [13]

## 5. TCOs E TPOs INTEGRADOS

### 5.1. OMU

A empresa ABB inc., que se localiza no estado da Pensilvânia nos EUA, foi a primeira a desenvolver um equipamento denominado de optical metering unit (OMU), que tem tanto a função de TP como de TC óptico. O sistema tem interface para medidores de potência, é composto por uma unidade monofásica leve e que possui tamanho compacto. Estes aspectos aliados à maior precisão em relação aos TCs e TPs convencionais, indicam que o produto é aplicável principalmente a subestações onde o fator espaço é um fator a ser considerado.

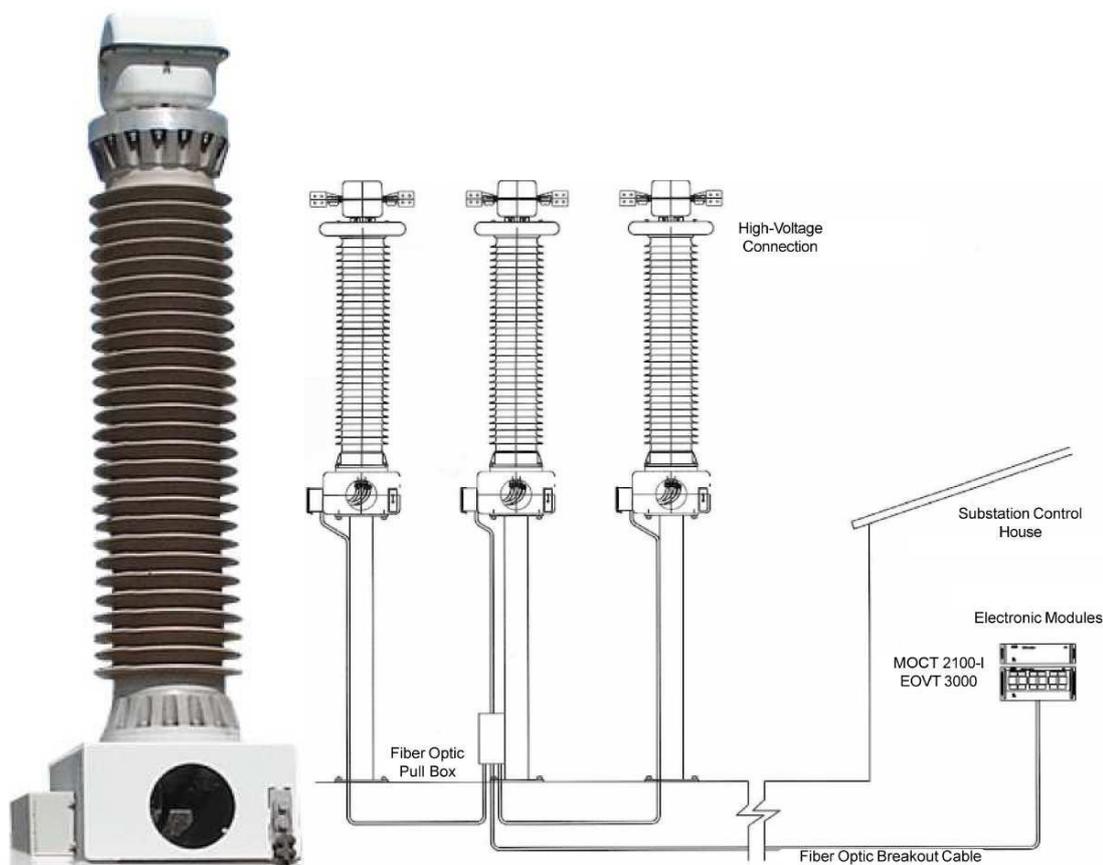
Tanto o elemento de corrente como o de tensão excedem a classe 0.2 indicada pela IEC. O equipamento suporta valores máximos de corrente contínua de 2000 A a 3000 A, trabalha na faixa de tensão de 72,5 – 550 kV (50/60 Hz), e é uma unidade de medida óptica completamente passiva.

O elemento sensor óptico de tensão opera com SF6 (hexafluoreto de enxofre) num isolador de tubo de fibra de vidro oco e possui suportes de silicone e borracha. Este projeto permite medição de tensão óptica verdadeira a ser realizada com a máxima precisão e estabilidade. A eliminação de óleo / papel isolante proporciona maior segurança e redução dos custos de manutenção.

Já o elemento sensor óptico de corrente é montado no topo do OMU, fora do ambiente a SF6 num espaço separado. As conexões entre os sensores (MOCT e EOVT) no equipamento e os módulos eletrônicos na casa de controle são feitos via cabos de fibra óptica.

[7]

Abaixo podemos ver uma imagem real do OMU, bem como o esquema de instalação trifásico em uma subestação:



**Fig. 5.1. Foto e esquema de montagem de três unidades do OMU. [7]**

## 5.2. NXVCT

Nas subseções 3.3 e 4.2 foram apresentados o NXCT e o NXVT, respectivamente. Como foi citado, essa moderna linha de transformadores para instrumentos foi desenvolvida pela empresa Norte-Americana NxtPhase, que é líder no ramo.

A NxtPhase resolveu então inovar mais ainda projetando o que chamou de NXVCT (optical voltage and current sensor), fazendo a fusão das duas tecnologias inicialmente desenvolvidas, sendo capaz de trabalhar em faixas de tensão superiores a 550 kV.

Tamanho e peso reduzido, quando comparado aos TCs e TPs convencionais como isolamento à óleo, permite uma fácil instalação em subestações compactas ou em aplicações onde o fator espaço possui alguma limitação. Este equipamento combinado substitui com vários méritos, os dispositivos convencionais, trazendo mais flexibilidade no projeto de subestações. [9]



**Fig. 5.2. Aplicação do NXCVT numa linha de 550 kV. <sup>[9]</sup>**

As vantagens ofertadas pelo NXCVT são as seguintes:

1. Precisão na medição e Proteção: o NXCVT ultrapassa as classes de precisão IEC 0.2 e IEC 0.3 para medição fiscal e também a classe IEC 3P exigida para proteção e, desta forma, este TPO pode ser usado tanto para medição quanto pra proteção (enquanto que os TCs convencionais são desenvolvidos especificamente para uma das utilidades, onde não é permitido o uso de um transformador de instrumento para medição em proteção e vice-versa);
2. Não há o problema da abertura do TC em carga nem da ferroressonância apresentada pelos TPs convencionais;
3. Leveza e volume reduzido: característica que além de facilitar o transporte, traduz-se numa alternativa em locais com atividades sísmicas;

4. Ambientalmente correto: a coluna de isolador não contém óleo ou gás SF<sub>6</sub>;
5. Baixa necessidade de manutenção: não precisam de testes periódicos de fator de dissipação para detecção antecipada de contaminação e deterioração de buchas, o material que reveste a coluna isolante é a borracha de silicone, que não tem necessidade de se fazer limpeza;
6. Larga faixa dinâmica: a precisão especificada é mantida, na faixa de 1 A a 3000 A, devido a um dispositivo eletrônico seletor de espiras (de fibra óptica). Suporta também picos de corrente acima de 171 kA.[9]

As especificações do NXCVT estão no Anexo 8.3 deste trabalho.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo do estudo realizado, podemos constatar através de vários artigos internacionais pesquisados, que o uso da tecnologia óptica aplicada aos transformadores para instrumentos mostra-se bastante promissor, apresentando pouquíssimas desvantagens como um preço elevado e problemas quando submetido a altas temperaturas e vibrações (mas que já há soluções).

Como foi visto, atualmente a fabricante norte-americana NxtPhase (recentemente incorporada à gigante AREVA) detém a mais avançada tecnologia existente na área, que inclusive, é um aprimoramento de uma tecnologia espacial, feito por seus engenheiros.

Apesar de parecer ser uma tecnologia nova, estudos na área são realizados desde a década de setenta, porém, na minha opinião, o fato dos TCs e TPs ópticos não estarem ainda tão disseminados nas subestações do mundo inteiro, se dá possivelmente devido a lobby das empresas que detém o mercado mundial de TIs convencionais e também pela relutância que os clientes do ramo oferecem à absorção de novas tecnologias.

É possível que nos próximos anos, a tecnologia de sensores ópticos de corrente e tensão penetre fortemente no mercado de transformadores para instrumentos, haja vista o leque de vantagens ofertadas em relação à antiga tecnologia, porém, uma condição para que o sucesso seja atingido é a edição de padrões bem elaborados com procedimentos e testes para sua aplicação.

## 7. REFERÊNCIAS

- [1] <http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/historico>, acessado em 23/11/2009 às 19:19h.
- [2] <http://vsites.unb.br/iq/kleber/EaD/Fisica-4/Aulas>, acessado em 23/11/2009 às 20:22h.
- [3] Luiz Antônio Perezi Marçal - Novas técnicas de detecção de fase óptica em interferômetros homódinos aplicadas à caracterização de atuadores piezoelétricos flexionáveis - 2008 .
- [4] <http://en.wikipedia.org>, acessado em 24/11/2009 às 02:31 h.
- [5] Fei Long, Jianhuan Zhang, Chunrong Xie e Zhiwei Yuan - Application of the Pockels Effect to High Voltage Measurement – 2007.
- [6] Edmundo Antonio Soares - Sensores de Fibras Ópticas – 1989.
- [7] Tarso Vilela Ferreira - UMA BREVE INTRODUÇÃO AOS SENSORES DE TEMPERATURA, DEFORMAÇÃO, TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICAS BASEADOS EM FIBRAS ÓPTICAS – 2004.
- [8] T. W. Cease e Paul Johnston - A MAGNETO-OPTIC CURRENT TRANSDUCER – 1990.
- [9] <http://www.nxtphase.com>, acessado em 25/11/2009 às 23:47h.
- [10] J. N. Blake, and A. H. Rose - Fiber-Optic Current Transducer Optimized For Power Metering Applications – 2003.
- [11] H. Y. Li, P. A. Crossley e R. K. Aggarwal - APPLICATION OF FIBRE OPTICAL CURRENT TRANSDUCER TO PROTECTION – 1997.

[12] Wenbin Yu, Guonqing Zhang e Zhizhong Guo - A Hybrid Optical Currentt Sensor for Power System Metering and Protection – 2003.

[13] Lars Hofmann Christensen - Design, construction, and test of a passive optical prototype – 1995.

## 8. ANEXOS

### 8.1. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM NXCT. [9]

<b>Column Mechanical &amp; Electrical Ratings</b>		<b>72.5 kV</b>	<b>121 kV</b>	<b>145 kV</b>	<b>245 kV</b>	<b>362 kV</b>	<b>420 kV</b>	<b>550 kV</b>	<b>800 kV</b>
	Maximum Voltage	72.5 kV	121 kV	145 kV	245 kV	362 kV	420 kV	550 kV	800 kV
	BIL	350 kV	550 kV	650 kV	1050 kV	1300 kV	1550 kV	1800 kV	2100 kV
	Column Height	61"	81"	81"	110"	130"	208"	208"	208"
		1.55 m	2.05 m	2.05 m	2.80 m	3.30 m	5.28 m	5.28 m	5.28 m
	Min. Creep Distance	57"	115"	115"	193"	285"	562"	562"	562"
		1.40 m	2.90 m	2.90 m	4.90 m	7.24 m	14.28 m	14.28 m	14.28 m
	Weight	108 lbs	125 lbs	125 lbs	144 lbs	158 lbs	210 lbs	210 lbs	210 lbs
	49 kg	56 kg	56 kg	65 kg	72 kg	95 kg	95 kg	95 kg	
Static Withstand	675 lbs	675 lbs	675 lbs	900 lbs	900 lbs	Suspension application only			
	3000 N	3000 N	3000 N	4000 N	4000 N	Suspension application only			
Note: Ratings and dimensions shown are for IEC pollution Class 2. Other ratings are available.									
<b>Environmental</b>		Operating Temperature Range -40°C to 55°C (-40°F to 131°F) Outdoor Service Conditions							
		Opto-Electronic Module -5°C to 40°C (23°F to 104°F) Indoor Service Conditions							
		Seismic Capability 0.5 g							
<b>Mechanical</b>		Standard Pollution Withstand IEC Level II, other ratings available							
		Insulation Solid composite insulator							
		Electronics Dimensions 19" x 18" x 8.75" (482 mm x 457 mm x 222 mm) (includes high energy metering interface)							
<b>Electronics</b>		Packaged in 2 modules:							
	Low Energy Analog Interfaces <sup>1</sup> :	4 V <sub>ms</sub> metering 200 mV <sub>ms</sub> protection							
	Dynamic Range	<0.2% error at rated current for 4V output, <0.5% error at rated current for 200mV output <2% error at 108 kA <sub>peak</sub> (using protection sensor)							
	Bandwidth	0.5 Hz to 6 kHz							
	High Energy Analog Interfaces <sup>1</sup> :	1 A <sub>ms</sub> or 5 A <sub>ms</sub> nominal, B-0.1 (2.5 VA) burden at power factor 0.9 for metering							
	Dynamic Range	<0.2% error from 1 A to 4000 A (using extended metering range sensor)							
	Bandwidth	10 Hz to 6 kHz for 1 A metering output							
	Input Power Requirements	70 V <sub>dc</sub> to 150 V <sub>dc</sub> Typical power 50 W							
	Electronic Turns Ratio	User selectable							
		Alarms Contacts Data invalid Maintenance required							
<b>Electrical Performance</b>		Type I <sup>2</sup> :							
		Metering Accuracy	IEC Class 0.2S, IEEE Class 0.3						
		Protection Accuracy	IEC Class 5P IEEE 10%						
		Type II <sup>2</sup> :							
		Extended Range	0.2% (0.2% to 150% of rated current) <sup>2</sup>						
		Std Metering Accuracy							
		Type III <sup>2</sup> :							
		Extended Range	0.15% (0.2% to 150% of rated current) <sup>2</sup>						
		High Metering Accuracy							
		Continuous Current	4000 A Max (4000 A, RF = 1; or 3000 A, RF = 1.33; or 2500 RF = 1.5)						
		Rated Current	User specified for up to 4000 A						
		Short-time Thermal Current	63 kA <sub>ms</sub> for 1 s						

<sup>1</sup> Scales linearly with primary voltage and current.

<sup>2</sup> Accuracy window moves with selected ratio.

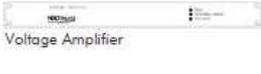
<sup>3</sup> Other ratings available, consult NitPhase.

## 8.2. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM NXVT. [9]

<b>Column Mechanical &amp; Electrical Ratings</b>		<b>121 kV</b>	<b>145 kV</b>	<b>245 kV</b>	<b>362 kV</b>	<b>420 kV</b>	<b>550 kV</b>
	Maximum Voltage	121 kV	145 kV	245 kV	362 kV	420 kV	550 kV
	BIL	550 kV	650 kV	1050 kV	1300 kV	1550 kV	1800 kV
	Column Height	79"	79"	125"	153"	153"	174"
		2.01 m	2.01 m	3.16 m	3.89 m	3.89 m	4.42 m
	Creep Distance	126"	126"	211"	252"	252"	405"
		3.22 m	3.22 m	5.36 m	6.39 m	6.39 m	10.29 m
Weight	290 lbs	290 lbs	395 lbs	615 lbs	615 lbs	1500 lbs	
	132 kg	132 kg	178 kg	279 kg	279 kg	682 kg	
Static Withstand	675 lbs	675 lbs	900 lbs	900 lbs	900 lbs	1350 lbs	
	3000 N	3000 N	4000 N	4000N	4000N	6000N	
Note: Ratings and dimensions shown are for IEC pollution Class 2. Other ratings are available.							
<b>Environmental</b>		Operating Temperature Range -40°C to 50°C (-40°F to 122°F) Outdoor Service Conditions					
		Opto-Electronic Module -5°C to 40°C (23°F to 104°F) Indoor Service Conditions					
		Seismic Capability 0.5 g					
<b>Mechanical</b>		Standard Pollution Withstand IEC Level II, other ratings available					
		Insulation Nitrogen gas					
		Electronics Dimensions 19" x 18" x 10.5" (482 mm x 457 mm x 267 mm)					
<b>Electronics</b>		Packaged in 3 modules:					
	Low Energy Analog Interfaces <sup>1</sup> :	4 V <sub>rms</sub> ; 5 kΩ burden 4 V <sub>rms</sub> protection					
	Dynamic Range	<0.2% error at 50% to 200% of rated voltage <3% error at 2% of rated voltage					
	Bandwidth	0.5 Hz to 6 kHz					
	High Energy Analog Interfaces <sup>1</sup> :	69 V <sub>rms</sub> (1 VA) or 120 V <sub>rms</sub> (2.5VA)					
	Dynamic Range	<0.2% error at 80% to 120% of rated voltage					
	Bandwidth	10 Hz to 3 kHz					
	Input Power Requirements	70 V <sub>ac</sub> to 150 V <sub>ac</sub> Typical power 60 W					
		Electronic Turns Ratio	Not applicable				
		Alarms Contacts	Data invalid Maintenance required				
<b>Electrical Performance</b>		Metering Accuracy	IEC Class 0.2 IEEE Class 0.3				
		Protection Accuracy	IEC Class 3P IEEE Class 0.3				
		Overload Factor	Typically 1.2 (continuous), 2.0 (30 seconds)				

<sup>1</sup> Scales linearly with primary voltage.

### 8.3. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE UM NXCVT. [9]

<b>Column Mechanical &amp; Electrical Ratings</b>		<b>121 kV</b>	<b>145 kV</b>	<b>245 kV</b>	<b>362 kV</b>	<b>420 kV</b>	<b>550 kV</b>
	Maximum Voltage	121 kV	145 kV	245 kV	362 kV	420 kV	550 kV
	BIL	550 kV	650 kV	1050 kV	1300kV	1550kV	1800kV
	Column Height	105.55"	105.55"	138.25"	166.59"	166.59"	200.84"
		2.681 m	2.681 m	3.511 m	4.231 m	4.231 m	5.101 m
	Creep Distance	142.7"	142.7"	241.14"	454.72"	454.72"	541.34"
		3.625 m	3.625 m	6.125 m	11.55 m	11.55 m	13.75 m
Weight	353 lbs	353 lbs	625 lbs	825 lbs	825 lbs	1200 lbs	
	160 kg	160 kg	285 kg	374 kg	374 kg	544 kg	
Static Withstand	675 lbs	675 lbs	900 lbs	900 lbs	900 lbs	1350 lbs	
	3000 N	3000 N	4000 N	4000N	4000N	6000N	
Note: Ratings and dimensions shown are for IEC pollution Class 2. Other ratings are available.							
<b>Environmental</b>		Operating Temperature Range -40°C to 50°C (-40°F to 122°F) Outdoor Service Conditions (-50°C Available)					
		Opto-Electronic Module -5°C to 40°C (23°F to 104°F) Indoor Service Conditions					
		Seismic Capability 0.5 g					
<b>Mechanical</b>		Standard Pollution Withstand IEC Level II, other ratings available					
		Insulation Nitrogen gas					
<b>Electronics</b>		<b>Voltage Sensor</b>		<b>Current Sensor</b>			
Packaged in 3 modules:		Low Energy Analog Interfaces <sup>1</sup> : 4 V <sub>rms</sub> metering 4 V <sub>rms</sub> protection		4 V <sub>rms</sub> metering 200 mV <sub>rms</sub> protection			
	Dynamic Range	<0.2% error at 50% to 200% of rated voltage <3% error at 2% of rated voltage		Multiple types available. See Electrical Performance below.			
	Bandwidth	0.5 Hz to 6 kHz		0.5 Hz to 6 kHz			
	High Energy Analog Interfaces <sup>1</sup> :	69 V <sub>rms</sub> , 115 V <sub>rms</sub> or 120 V <sub>rms</sub> nominal		1 A <sub>rms</sub> or 5 A <sub>rms</sub> nominal, B-0.1 (2.5 VA) burden at power factor 0.9 for metering			
	Current Amplifier/Power Supply	2.5 VA burden at power factor 0.9		2.5 VA burden at power factor 0.9			
	Dynamic Range	<0.2% error at 50% to 120% of rated voltage		<0.2% error from 1 A to 3000A (using extended metering range sensor)			
	Bandwidth	30 Hz to 5 kHz		10 Hz to 6 kHz			
Input Power Requirements		70 V <sub>dc</sub> to 150 V <sub>dc</sub> Typical power 60 W		70 V <sub>dc</sub> to 150 V <sub>dc</sub> Typical power 50 W			
Electronic Turns Ratio		Not applicable		User selectable			
Alarms Contacts		Data invalid Maintenance required		Data invalid Maintenance required			
<b>Electrical Performance</b>		Thermal Current Not applicable		3000 A			
		Overload Factor 1.2 (continuous), 2.0 (30 seconds)		1.5			
		Short-time Mechanical Current 63 kA <sub>rms</sub> for 1 s		63 kA <sub>rms</sub> for 1 s			
		Short-time Thermal Current		Type IP <sup>2</sup> :			
Accuracy		IEC Class 0.2 IEEE Class 0.3 IEC Class 3P		Metering Accuracy		IEC Class 0.2S, IEEE Class 0.3	
				Protection Accuracy		IEC Class 5P, IEEE 10%	
				Type IP <sup>2</sup> :			
				Extended Range Std Metering Accuracy		0.2% (0.2% to 150% of rated current) <sup>3</sup>	
				Type III <sup>3</sup> :			
				Extended Range High Metering Accuracy		0.15% (0.2% to 150% of rated current) <sup>3</sup>	

<sup>1</sup> Scales linearly with primary voltage and current.

<sup>2</sup> Accuracy window moves with selected ratio.

<sup>3</sup> Other ratings available, consult NxtPhase.