

Sensor Óptico Para Medidas de Altas Correntes em Geração e Transmissão Elétricas

A.F.G.F.Filho, M.V.P. Lopes, T.S.M. Fernandes e A.S.B.Sombra

Resumo – Este artigo apresenta o estudo experimental de um sensor a fibra óptica baseado no efeito Faraday para medição de corrente de altas intensidades em geração e transmissão, onde as formas de ondas podem ser periódicas e/ou aperiódicas e com larga faixa espectral. O esquema experimental sob estudo oferece diversas vantagens, quando comparados com os tradicionais sensores indutivos e capacitivos, para aplicações em sistemas de potência, dentre elas citamos: alta precisão sobre todo range de operação, pequeno peso e tamanho, utilizam-se dispositivos eletricamente passivos, não há necessidade de alimentação (potência) nos pontos de alta tensão, que são relativamente inacessíveis, excelente desempenho e baixos custos, contrariamente aos transformadores convencionais.

Palavras-chave – Sensor Óptico, corrente elétrica, sensor de fibras óptica, constante de Verdet

I. INTRODUÇÃO

Desde o seu aparecimento, no início dos anos 70 [1], e durante quase uma década, as fibras óticas foram usadas e estudadas exclusivamente como elementos de sistemas de comunicações. A partir de 1977 [2], começaram a surgir as primeiras pesquisas sobre o uso de fibras para a construção de elementos capazes de medir diferentes parâmetros físicos, chamados de sensores de fibras óticas [16],[18],[23]. 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 muito lucrativo. O sensor de fibra ótica é simplesmente um pedaço de fibra que modula de maneira conhecida a luz que o atravessa e é detectada na outra extremidade [4], [5]. 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 [20], [21], [22]. Existe ainda um tipo de sensor que pode ser colocado em uma classe isolada: o sensor interferométrico [12], [13], [15], [17], [24].

A proposta do presente trabalho é desenvolver estudos experimentais para um sensor óptico de altas correntes em linhas de transmissão. Até agora foram realizadas as seguintes atividades: levantamento dos elementos necessários para gerar um banco de dados de informações à modelagem do protótipo proposto; desenvolvimento dos esquemas necessários para montagem do aparato experimental segundo configurações escolhidas; montagem experimental para testes e validações iniciais do protótipo, considerando as variáveis analisadas nos itens precedentes; análise dos resultados experimentais com base na geração de banco de dados.

O projeto Sensor Óptico Para Medidas de Altas Correntes em Geração e Transmissão Elétricas, código ANEEL 2934-011/2007, está em fase de execução. A entidade executora foi a UFC- Universidade Federal do Ceará e como entidade de suporte financeiro temos a Central Geradora Termelétrica Fortaleza S/A.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Desenvolvimento Teórico

Estado de Polarização

Considere a seguir o caso de uma onda monocromática que se propaga ao longo do eixo dos z que pode ser representado na forma

$$\vec{E}(x, y, z) = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} \quad (1)$$

onde

$$\vec{E}_x(x, y, z, t) = A_x \cos(\omega t - kz + \phi_x) \quad (2)$$

$$\vec{E}_y(x, y, z, t) = A_y \cos(\omega t - kz + \phi_y) \quad (3)$$

a classificação dos diferentes tipos de polarização depende da fase relativa

$$\phi = (\phi_y - \phi_x) \quad (4)$$

assim como dos valores relativos das amplitudes A_x e A_y .

Podemos identificar os distintos tipos de polarização através da fase relativa entre as componentes do campo elétrico.

A.F.G.F.Filho, M.V.P. Lopes e T.S.M. Fernandes integram a equipe do Laboratório de Óptica Não linear, Ciências e Engenharia dos Materiais – LOCEM – Departamento de Física – Universidade Federal do Ceará.

A.S.B.Sombra é chefe do Laboratório de Telecomunicações e Ciência dos Materiais e Engenharia dos Materiais – LOCEM - Departamento de Física - Universidade Federal do Ceará.

Polarização	Diferença de Fase	
	Linear	$2\pi n$
Circular	$\pm \frac{\pi}{2} + 2\pi n$	
Elíptica	$\pm \frac{\pi}{2} + 2\pi n^{(*)}$	

(*) Com as amplitudes do campo E_x e E_y diferentes

B. Rotação de Faraday

A rotação do plano de polarização da luz que passa através de um meio submetido a um campo magnético alinhado paralelamente à direção de propagação da luz foi descoberta por M. Faraday em 1845 [3],[4], [5].

O Efeito Faraday se caracteriza pela mudança da direção de polarização de um feixe de luz polarizado quando este feixe se propaga ao longo do campo magnético a que está submetido um meio transparente [3],[4]. A luz transmitida é em geral elípticamente polarizada com o seu eixo maior girado em relação à direção do plano de polarização do feixe incidente. Para um dado material sentido de rotação com referencia ao campo magnético não depende da direção da luz [14].

Para materiais isotrópicos o ângulo de giro do plano de polarização da luz, θ , é proporcional à espessura do material, l , e a intensidade do campo magnético B :

$$\theta = \int_l V B dl \quad (5)$$

temos que a integral do campo magnético ao longo de um caminho fechado de um condutor depende somente da corrente nesse condutor :

$$\theta = V \int \overline{B dl} \quad (6)$$

retornando a igualdade

$$\theta = V(\lambda, T) .l. B \quad (7)$$

onde V , que depende do comprimento de onda da luz e da temperatura, é denominada constante de Verdet e é expressa no SI em [rad/T.m], mas também é frequentemente encontrada na literatura expressa em [min. de arco/Gauss.cm][9],[11].

C. OCS - Esquemas usando Fibras Ópticas que preservam a polarização como elemento de sensoriamento

Para dispositivos que tem a fibra óptica como elemento de sensoriamento, OCS – Sensores Ópticos de Corrente, o estado de polarização (SOP) muitas vezes não é preservado devido a presença de uma birrefringência intrínseca da fibra

ou extrínseca [7],[8]. Por consequência, a sensibilidade deste tipo de dispositivo é menor do que seria previsível para o efeito *Faraday*. Entretanto sendo a birrefringência dependente da temperatura, a sensibilidade do dispositivo também está sujeito a perturbações ambientais de temperatura. A fim de prever o desempenho desse tipo de sensor é importante reduzir os efeitos das fontes de birrefringência na concepção atual sensores de fibra óptica. Com base nos resultados uma série de sensores que têm sido relatados. Algumas das possibilidades de soluções para resolver os problemas particulares de birrefringência estão resumidas a seguir.

D. Suprimir a birrefringência linear, usando fibra com um elevado grau de birrefringência circular

Sabe-se que uma grande quantidade de birrefringência circular é introduzido na fibra [10]. A curva induzida da birrefringência linear pode ser suprimida devido a rotação de Faraday que é um efeito magneticamente de birrefringência circular, A birrefringência circular introduzida na fibra é superposta com a birrefringência circular do efeito magnético de *Faraday* que é um efeito natural e por consequência a medida de sensibilidade é mantida. Um tipo especial de fibra com largo grau de birrefringência circular pode ser obtido por uma torção na fibra ou usando uma fibra de birrefringência elíptica (SEB). O maior problema para a construção do sensor está na dependência da temperatura. No entanto, empregando um esquema de compensação de temperatura mostra-se que no regime de 20° a 70°C um sensor de corrente construído a partir desse tipo de fibra exibi apenas 0,05% por 1°C uma mudança na sua sensibilidade.

E. Removendo a birrefringência linear usando espira de fibra

Uma das abordagens atraentes para remover a birrefringência linear induzida é por meio de anelamento. Consiste em uma espira de fibra que é aquecido de 800-900°C por cerca de 24h e em seguida é vagarosamente resfriada. A desvantagem desta abordagem é que a alta temperatura o anelamento remove a camada protetora da fibra e tende a enfraquecer a fibra

F. Rotação de Faraday- Separa birrefringência linear usando multiplexação no tempo para dois diferentes estados de polarização da luz de entrada

Em vez de eliminar birrefringência linear induzida introduziu um novo regime de detecção, em que a rotação Faraday separa birrefringência linear induzida pelo uso de uma multiplexagem no tempo de dois diferentes estados de polarização da luz de entrada. Nesse sistema, tanto a luz polarizada linearmente como circularmente são lançados na fibra alternadamente.

Para a luz de entrada linearmente polarizada, o sensor de saída torna-se:

$$S_1 = 2\phi_F \frac{\sin(\sqrt{\delta^2 + (2\phi_F)^2})}{\sqrt{\delta^2 + (2\phi_F)^2}} \quad (8)$$

Onde Φ é o ângulo de polarização e δ é o efeito de birrefringência. Para a luz de entrada circularmente polarizada, o sensor de saída torna-se:

$$S_2 = \delta \frac{\sin(\sqrt{\delta^2 + (2\phi_F)^2})}{\sqrt{\delta^2 + (2\phi_F)^2}} \quad (9)$$

Entretanto a rotação de Faraday pode ser obtida diretamente para as duas saídas a partir das equações citadas, é dado por:

$$2\phi_F = \frac{\arcsin(\sqrt{S_1^2 + S_2^2})}{\sqrt{1 + (S_1/S_2)^2}} \quad (10)$$

Conseqüentemente, para um caso ideal, isto é, quando os estados da luz de entrada são perfeitamente, linearmente e circularmente polarizados, respectivamente, o efeito da birrefringência linear pode ser eliminada por meio desse regime. Se os estados de entrada não são perfeitos, haverá uma sensibilidade aparente, que não será exatamente a mesma prevista através da equação da rotação de *Faraday*

G. Rotação de Faraday, que separa a birrefringência geometricamente linear, através um enrolamento de topologia especial.

Neste esquema a birrefringência linear induzida circularmente é empregada como retardador de fase. Cuidadosamente pela arquitetura do sensor a birrefringência linear induzida circularmente pode ser arranjada na forma de um quadrado onde a birrefringência linear induzida circularmente está presente nos quatros braços do sensor.

Em cada canto deste sensor, existem três loops de fibra uma quantidade ínfima 10mm de raio, produzindo um retardo de 2π entre as duas componentes ortogonais da luz linearmente polarizada. As vantagens deste sistema são de que o tamanho do sensor pode ser muito pequeno, e sua sensibilidade pode ser aumentada linearmente com o aumento do número de loops de fibra. As principais desvantagens do sensor é que a sua sensibilidade está sujeita as variações de temperatura devido à presença de um elevado grau de birrefringência circularmente induzida[11].

H. Aparato Experimental

Foram adquiridos diversos componentes para a montagem dos experimentos. Neste aparato utilizamos uma fonte laser que opera na região do infravermelho no comprimento de onda de $1,55 \mu\text{m}$ e que gera potência até 2,5 mW. Temos também um isolador óptico que opera no mesmo comprimento de onda da fonte laser. Utilizamos também uma fibra óptica que mantém polarização de comprimento de 5 metros. Para concentrar o feixe proveniente da fibra utilizamos um colimador e dessa forma concentramos o feixe no polarizador. Para fazer a leitura em potência utilizamos um fotodetector na faixa do infravermelho. O mesmo pode ser conectado a um computador e os dados mais facilmente cole-

tados para a montagem de gráficos. Todos estes materiais citados acima foram comprados na empresa Thorlabs®. As especificações dos mesmos no site da empresa se encontram na Tabela 1.

Utilizamos uma fonte de corrente alternada NM 250 Turbo fabricada pela Bambozzi®. Essa fonte nos fornece uma variação de 70 a 250 A (AC). Em uma segunda configuração do sensor, utilizamos um material rotacionador de Faraday de 5,10 mm de diâmetro e 32 mm de espessura. Esse dielétrico (vidro) possui uma constante de Verdet (V) dada por $-1,206 \cdot 10^{-4}$ rd/A, o que equivale a aproximadamente 6,9 graus, para uma corrente de 1kA. Para esta faixa de corrente temos a fibra óptica que possui uma constante de Verdet na faixa de $0,75 \cdot 10^{-6}$ rd/A. Notamos que o vidro (rotacionador de Faraday) é bem mais sensível a um campo magnético externo no sentido de polarização da luz do que a fibra (cerca de 100 vezes). Esse pode ser um fator culminante na miniaturização de um futuro protótipo.

Tabela I. Especificações dos Componentes da Thorlabs®.

Equipamento	Referência
Fonte de Laser 1550nm, 2.5 mW	S1FC1550PM
Isolador Óptico	IO-H-1550FC
Fibra Óptica	P1-1550PM-FC-5
Colimador	50-1550-FC
Medidor de Potência	PM122D

De acordo com a metodologia escolhida, podemos analisar o desempenho de duas configurações experimentais, mostradas na Figura 1(a) e 1(b).

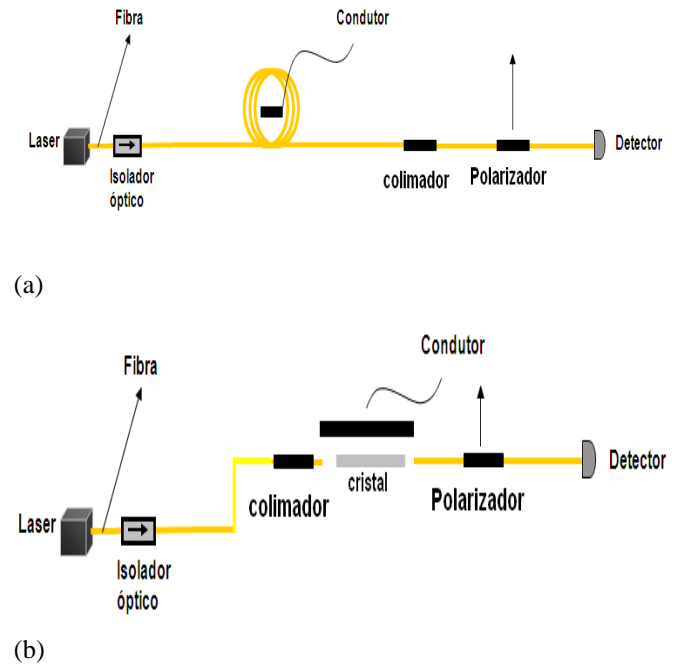


Figura 1. Modelos propostos no trabalho.

O primeiro modelo (ver figura 1a) consiste numa fibra acoplada a um laser óptico centrado em um comprimento de onda $1,55 \mu\text{m}$. A luz é inserida em um isolador óptico evitando fenômenos de reflexão, possibilitando assim a propa-

gação da luz em uma única direção. A luz está linearmente polarizada a 45° em relação aos seus eixos de polarização. O isolador óptico é então conectado a uma bobina de fibras que se encontra enrolada ao redor do condutor elétrico. A bobina é então conectada em série a um colimador que faz a função de concentrar a luz num polarizador rotacionado 45° (ou 90°) em relação aos eixos de polarização da luz na ausência de corrente no condutor que passa no centro da bobina de fibras. A luz que emerge do colimador e atravessa o polarizador é então detectada num fotodetector de potência. Na respectiva configuração, em nossas detecções a intensidade de luz é captada pelo medidor de potência é mínima, quando a bobina de fibras está na ausência de corrente elétrica que passa pelo condutor. A ideia do sensoriamento surge quando aplicamos uma corrente elétrica na faixa de 90A a 115A de modo que o campo magnético gerado pela corrente possa alterar o estado de polarização da luz, causando uma mudança de intensidade que será detectada no nosso medidor de potência. Podemos supor que a grande sensibilidade se aplica a baixos valores de corrente, nosso sensor com certeza terá um bom desempenho quando aplicamos altos valores de corrente, adequando o mesmo a essa nova faixa de correntes.

O segundo modelo segue o mesmo princípio físico e é bastante parecido com o primeiro em termo de modelagem, no entanto, eles diferem num detalhe muito importante: o meio que será sensível ao campo magnético para nossas medidas é um pequeno vidro (rotacionador de Faraday) localizado próximo ao condutor. Esse vidro possui uma propriedade física que o torna mais atrativo em relação às fibras. Ele possui uma constante de Verdet mais elevada, como vimos anteriormente, e isso faz com que o sistema seja mais sensível ao campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa pelo condutor. O segundo modelo (ver figura 1b) consiste numa fibra acoplada a um laser óptico centrado em um comprimento de onda $1,55\mu\text{m}$. A luz é inserida em um isolador óptico evitando fenômenos de reflexão. A luz está linearmente polarizada a 45° em relação aos seus eixos de polarização. O isolador óptico é então conectado a um colimador que faz a função de concentrar a luz num cristal localizado próximo ao condutor elétrico. A luz que emerge do colimador e atravessa o polarizador rotacionado 45° em relação aos eixos de polarização da luz na ausência de corrente. Em seguida a luz é detectada num fotodetector de potência.

I. C. Discussões e Resultados

A seguir são mostrados os dois aparatos experimentais montados em laboratório para a simulação dos dois tipos de sensores. Na Figura 2 é mostrado o aparato experimental referente ao sensor óptico utilizando fibra óptica. Essa Figura faz referência a Figura 1. Na Figura 3 é mostrado o aparato experimental referente ao sensor óptico fazendo a substituição da fibra óptica por um cristal que possui uma constante de Verdet maior que a constante da Fibra. Essa foto faz referência a figura 1b.



Figura 2. Sistema do sensor de altas correntes à fibra óptica.

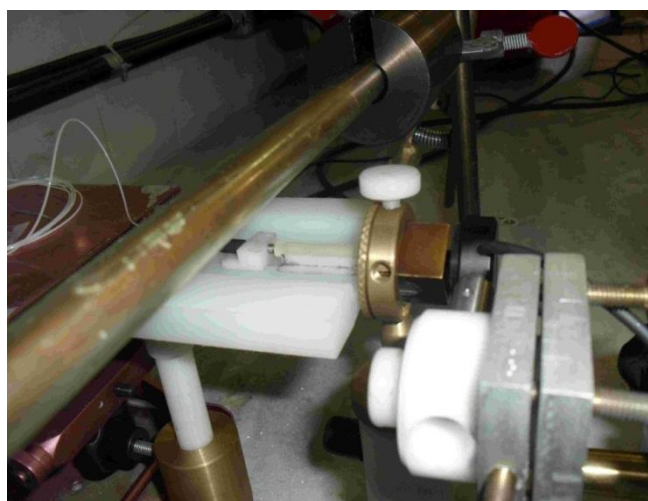


Figura 3. Sistema de monitoramento utilizando o vidro.

Como início do desenvolvimento de nossas medidas, tivemos que analisar as variações de potência do laser e analisar como seria o comportamento de nossas diversas estruturas para após esse momento iniciar medidas fazendo uso de altos valores de corrente. A seguir são descritas as diversas estruturas medidas.

O primeiro sistema em que medimos os valores para as perdas foi o sistema a seguir: Laser – Isolador – Fibra Óptica (*Maintaining Polarization*) – Colimador – Medidor de Potência. Essa medida desse sistema sem o uso do polarizador foi feita, pois se suspeitava que o uso do polarizador (prisma) pode ter alterado o valor dessa perda em nosso sistema. Essa mudança na perda do sistema poderá ser comprovada no tópico seguinte.

O segundo sistema que utilizamos para medir as perdas foi o seguinte: Laser – Isolador – Fibra Óptica (*Maintaining-Polarization*) – Colimador – Polarizador-Medidor de Potência. Note que esse sistema se diferencia do primeiro pelo acréscimo do polarizador (prisma) que funcionará com um analisador da luz proveniente do laser.

Note que pelas respostas gráficas, que o sistema sem o polarizador tem uma resposta linear quanto a resposta de potência de saída versus potência de entrada. Já para o sistema com o vidro, a resposta só é linear para potências de entrada maiores que 1,5 mW, onde a resposta de potência de saída e de entrada é linear (ver Figura 4). Essa boa resposta

a partir de 1,5 mW foi um dos fatores que nos levou a operar nosso sensor com uma potência de entrada em 1,5 mW. Avaliando o gráfico da Figura 5, para potências de entrada maiores que 1,5 mW temos uma perda entre 0.2 e 0.3 dB.

De acordo com as especificações dos fabricantes dos componentes, a Tabela 2 mostra as diversas perdas para cada componente utilizado nos sistemas anteriores:

Tabela 2 – Perdas dos componentes segundo dados dos fabricantes.

Componente	Perdas
Laser 1550 nm	0,05 dB (com 15 minutos de funcionamento)
Isolador	Entre 0,3 e 0,7 dB
Fibra	0,2 dB
Colimador	<0,2 dB

O único componente cuja perda não foi encontrada no site do fabricante foi o polarizador (prisma de Glan-Thomson). Note que se somarmos as perdas referentes aos componentes mostrados na Tabela 2 teremos uma perda máxima de aproximadamente de 1,1 dB e uma mínima perda de aproximadamente 0,9 dB. Estas perdas se aproximam das perdas vistas anteriormente no gráfico da Figura 5.

Essas mesmas perdas são aumentadas quando acrescentamos ao sistema o polarizador e chegam ao valor de 8,0 dB (Figura 5). O único componente cuja perda não foi encontrada no site do fabricante foi o polarizador (prisma de Glan-Thomson). Essa perda do polarizador é considerável, como pudemos constatar anteriormente. Note que se somarmos as perdas referentes aos componentes mostrados na Tabela 2 teremos uma perda máxima de aproximadamente de 1,1 dB e uma mínima perda de aproximadamente 0,9 dB. Dessa forma, acreditamos que de alguma forma o melhor funcionamento do sistema pode estar ligado ao melhor funcionamento do polarizador. Estão sendo estudadas outras possibilidades para se ter uma boa medida.

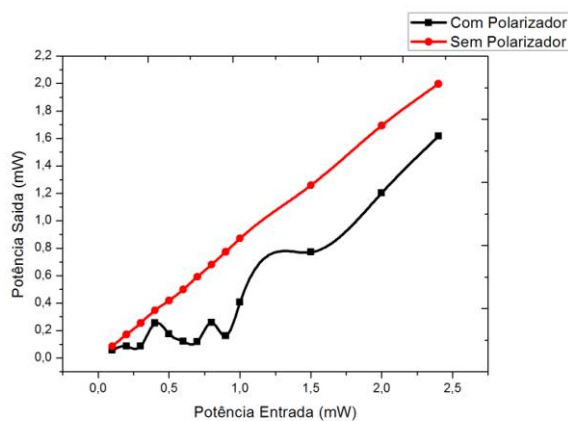


Figura 4. Potência luminosa em função da Corrente alternada no sistema com vidro.

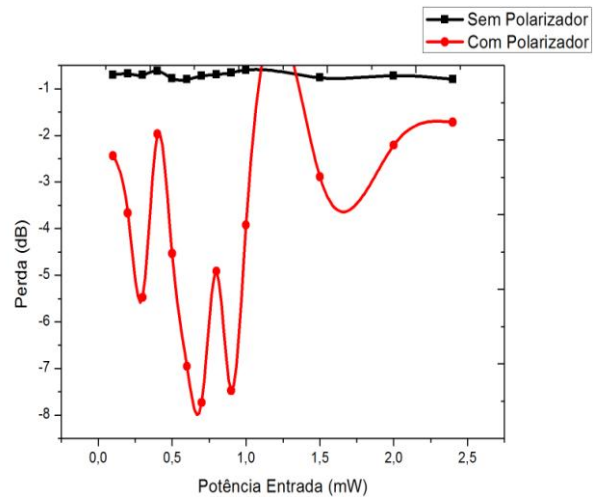


Figura 5. Perda em função da Potência de Entrada.

Em um segundo momento da pesquisa, montamos os dois aparatos experimentais mostrados anteriormente. Dispomos no laboratório de uma fonte de corrente AC que fornece valores de corrente de 90A até 250A. Para efeitos de segurança, preferimos utilizar correntes até 115 A, pois depois desse valor tínhamos um aquecimento muito grande da fonte. Outra forma de se gerar essas correntes está sendo estudada.

No gráfico da Figura 3, mostra-se uma variação da potência luminosa recebida pelo detector óptico versus a corrente alternada que passava pelo condutor, conforme montagem vista na Figura 2. Note que o uso da corrente no sistema faz com que ocorra realmente o efeito Faraday, que em nosso sistema é visto como uma mudança na intensidade da luz que incide sobre o fotodetector (medidor de potência). Vale ressaltar que essa mudança ainda não é linear e contínua, de acordo com o gráfico da Figura 6, o que mostra que nosso sistema ainda não está bem adequado a medida de faixas contínuas de corrente. Mudanças no sistema estão sendo realizadas para minimizar esse efeito.

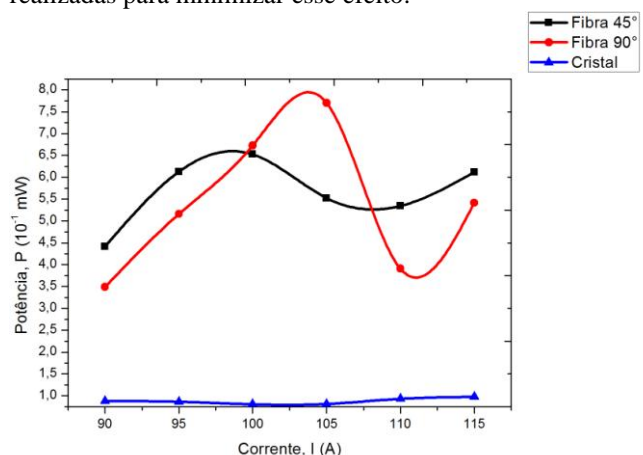


Figura 6. Comparativo de Potência luminosa em função da Corrente alternada para os dois sistemas.

No gráfico da Figura 6, começamos a fazer as medidas de potência para correntes de 90 A. No aparato montado com fibra são realizados dois tipos de casamento de polarização: cruzada (90°) e semi-cruzada (45°). No casamento de polarização cruzada o polarizador está com um deslocamento an-

gular de 90° em relação à polarização do sinal de entrada na fibra e no casamento de polarização semi-cruzada o polarizador está com um deslocamento angular de 45° em relação à polarização do sinal de entrada na fibra. Analisando o sistema cruzado (Fibra 90° - ver Figura 6), ao aumentar a corrente temos um aumento da potência luminosa medida, no caso da fibra. Quando estamos em cerca de 105 A chegamos em um máximo de potência luminosa medida em cerca de $7,8 \cdot 10^{-8} \text{ mW}$. Ao aumentar a corrente para 110A temos um decaimento desse valor de medida e ao aumentar novamente o valor da corrente para 115A temos um novo aumento. Acredita-se que esse aumento seja devido à instabilidade da geração de corrente por parte da fonte de corrente. Outra explicação para esse fenômeno, é que pelo tamanho da fibra e pelo número de voltas da mesma em torno do condutor a rotação da luz seja superior à 90° o que estaria acarretando esse aumento e diminuição da medida da potência luminosa.

Outra análise foi feita substituindo a fibra pelo vidro e os resultados também são mostrados na Figura 6. Note, que apesar do vidro ter uma maior sensibilidade (maior valor de constante de Verdet) que a fibra, sua resposta em potência luminosa se comparada a fibra é muito pequena. Se essa variação for comparada com a fibra notamos que a média permanece em torno de 100 μW com um leve aumento a partir de 105 A. A explicação para esse fenômeno se deve ao fato de termos uma menor região de interação por parte do cristal.

III. CONCLUSÕES

Durante estes trabalhos pudemos constatar a presença do efeito Faraday e sua influência na polarização da luz proveniente do laser na faixa do infravermelho e detectada via modulação da luz incidente na fibra. O projeto esta entrando na fase de análise dos transientes e estabilidade do sinal óptico modulado e seus transientes associados as características da corrente. Esses experimentos ainda irão incluir também a utilização de outros tipos de fibras ópticas (IFP1550SM-PC e IFP1550PM-PC) e também a substituição da mesma por um vidro, conforme o modelo 2 descrito neste relatório. Estas duas configurações serão adaptadas para medidas de altas correntes a serem estudadas

TRABALHOS FUTUROS

A proposta do presente projeto é desenvolver estudos experimentais para um sensor de altas corrente, com base nesses estudos temos como perspectivas futuras:

- Acompanhamento dos transientes em corrente presentes na rede elétrica em grandes geradores e consumidores
- Estudo dos comprimentos de fibras necessários para a adaptação do sensor a faixa de corrente a ser medida
- Estudo da compactação do experimento para facilitação de transporte e operação em campo

IV. AGRADECIMENTOS

Desejaríamos agradecer a Christiane Sampaio e Jarbas Macena da ENDESA pelo suporte ao projeto e as discussões e sugestões que estão permitindo um andamento com sucesso.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C.K. Kao e G.A. Hockham, "Dielectric Fibre Surface Waveguides For Optical Frequencies", Proceedings of the IEE, vol. 113, n.O7, Julho 1966, pp. 1151-1158.
- [2] JA. Bucaro et al, "Fiber Optic Hydrophone", Journal of The Acoustical Society of America, vot. 62, n.O 5, Maio 1977, pp. 1302-1304.
- [3] Kumagai T., Ohnuki W., Yamamoto S., Hongo A., Sone I., "Optical.Fiber Sensors Applications at Hitachi Cable", pp.35-38, 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, USA, Maio 2002
- [4] Sanders G.A., Blake J.N., Rose A.H, Rahmatian F., Herdman C., "Commercialization of Fiber-Optic Current and Voltage Sensors atNxtPhase", pp.31-34, 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical
- [5] Bohnert K., Gabus P., Brändle H., Guggenbach P., "Fiber-optic dc current sensor for the electro-winning industry", pp.210-213, 17thInternational Conference on Optical Fiber Sensors, Belgium, Maio 2005
- [6] J. L. Cruz, J. Marzal, M. V. Andrés, "An all-fiber RF modulation technique: frequency response calibration of optical detectors", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 43, N° 9, pp. 2361-2363, 1995.
- [7] W. Johnstone, "Optical detection", en Principles of Modern Optical Systems, Editadopor Ivan Andonovic y Deepak Uttamchandani, Artech House, 1989.
- [8] M. C. Brain, "Coherent optical systems and networks", en Principles of Modern Optical Systems, Vol. II, Editadopor Deepak Uttamchandani y Ivan Andonovic, Artech House, 1992.
- [9] H. B. Killen, Fiber Optic Communications, Prentice Hall, 1991.
- [10] L. Fabiny, S. T. Vohra, F. Bucholtz, "Multiplexed low-frequency electric and magnetic field fiber optic sensors", Optical Fiber technology, Vol. 2, pp. 106-113, 1996.
- [11] Tang D.; Rose A.H.; Day G.W. and Etzel, S.M., "Annealing of LinearBirefringence in Single-Mode Fiber Coils: Application to Optical FiberCurrent Sensors", Journal of Lightwave Technology, vol. 9, No. 8,pp1031-1037 Agosto 1991
- [12] D. A. Jackson, R. Priest, A. Drandridge, A. B. Tveten, "Elimination of drift in a single-mode optical fiber interferometer using a piezoelectrically stretched coiled fiber", Applied Optics, Vol. 19, N° 17, pp. 2926-2929,1980.
- [13] S. K. Sheem, T. G. Giallorenzi, K. Koo, "Optical techniques to solve the signal fading problem in fiberinterferometers", Applied Optics, Vol. 21, N°4, pp. 689-693, 1982.
- [14] P. Coghill, I. M. Basset, D. Wong, S. B. Poole, "A passive high sensitivity magnetic field sensor based onmetallic glass wire", Journal of Lightwave technology, Vol. 14, N° 8, pp. 1918-1925, 1996.
- [15] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh, T. Ose, "Fiber-optic Fabry-Perot interferometer and its sensorapplications", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol QE-18, N° 10, pp. 1624-1633, 1982.
- [16] K. T. V. Grattan, T. Sun, "Fiber optic sensor technology: an overview", Sensors and Actuators A, Vol. 82, pp.40-61, 2000.
- [17] B. J. Vakoc, M. J. F. Digonnet, G. S. Kino, "A novel fiber-optic sensor array based on the Sagnac interferometer", Journal of Lightwave Technology, Vol. 17, N° 11, pp. 2316-2326, 1999.
- [18] J. P. Dakin, M. Volanthen, "Distributed and multiplexed fibre grating sensors, including discussion of problem areas", IEICE Transactions on Electronics, Vol. E83, N° 3, pp. 391-399, 2000.
- [19]H. Lefèvre, The fiber-opticgyroscope, ArtechHouse, 1993.Sensores de fibra óptica codificados enfrecuencia: medida de voltaje y corriente
- [20] H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson, "1,65 mm Raman-based distributed temperature sensor", Electronics Letters, Vol. 35, N° 21, pp. 1869-1871, 1999.

- [21] Distributed temperature sensor to the experimental fast reactor JOYO with correction techniques”,*Measurement Science and Technology*, Vol. 12, pp. 966-973, 2001.
- [22] G. P. Lees, P. C. Wait, M. J. Cole, T. P. Newson, “Advances in optical fiber distributed temperature sensing using the Landau-Placzek ratio”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, N° 1, pp. 126-128, 1998.
- [23] A. D. Kersey, “A review of recent developments in fiber optic sensor technology”, *Optical Fiber Technology*, Vol. 2, pp. 291-317, 1996.
- [24] A. D. Kersey, A. Dandridge, “Multiplexed Mach-Zehnder ladder array with ten sensor elements”, *Electronics Letters*, Vol. 25, N° 19,