



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº BR 102014029540-2

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: BR 102014029540-2

(22) Data do Depósito: 26/11/2014

(43) Data da Publicação Nacional: 31/05/2016

(51) Classificação Internacional: G01R 15/22.

(54) Título: APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS

(73) Titular: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ, Pessoa Jurídica. CGC/CPF: 10744098000145. Endereço: RUA LÍVIO BARRETO, Nº 94, JOAQUIM TÁVORA, FORTALEZA, CE, BRASIL(BR), 60130-110, Brasileira

(72) Inventor: AGLIBERTO MELO BASTOS; JOSE WALLY MENDONÇA MENEZES; ANTÔNIO SERGIO BEZERRA SOMBRA.

Prazo de Validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 26/11/2014, observadas as condições legais

Expedida em: 24/05/2022

Assinado digitalmente por:

Alexandre Dantas Rodrigues

Diretor Substituto de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados



“APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS”.

CAMPO DE APLICAÇÃO

[1] A presente patente de invenção trata de aperfeiçoamento introduzido em sensor óptico para medidas de altas correntes em geração e transmissão elétricas, mais especificamente, um sensor óptico baseado em um interferômetro, onde, o sensoriamento da corrente é obtido através de uma perturbação mecânica na fibra óptica sensível do interferômetro. Esta perturbação leva a uma interferência óptica detectada na fibra de controle e se mostra proporcional à amplitude de corrente presente no condutor.

FUNDAMENTOS DA TÉCNICA

[2] Um sistema de energia em alta tensão, composto por subestações e linhas aéreas de transmissão, deve ser trabalhado como um ambiente eletromagnético extremamente complexo por sua própria natureza. Devido à complexidade eletromagnética do ambiente das subestações e das linhas aéreas, os elementos de sensoriamento, controle e seu meio de transmissão devem oferecer imunidade à alta tensão, à radiointerferência, a campos magnéticos, a descargas atmosféricas e a pulsos eletromagnéticos, bem como não causar riscos de explosão. Fato é que não é trivial ficar imune a essas interferências quando a tecnologia tradicional, por meio de sistemas eletroeletrônicos, é utilizada.

[3] Devido à sua intrínseca imunidade a todos os fatores adversos citados, a fibra óptica apresenta-se como a melhor opção para a função de sensoriamento em sistemas de alta tensão. Além de se consistir em um meio de transmissão imune a interferências eletromagnéticas, com alta largura de banda e baixa perda de transmissão, a fibra óptica pode também transmitir energia na forma óptica após conversão para energia elétrica, na alimentação de sensores ou circuitos de telecomando com tecnologia tradicional

[4] Os dispositivos de medida que utilizam fibras ópticas oferecem diversas vantagens para aplicações em sistemas de potência. Entre os parâmetros que podem ser medidos com técnicas de fibras ópticas estão: corrente, voltagem, temperatura,

pressão e etc.

[5] O monitoramento de corrente (campo magnético) e voltagem (campo elétrico) são críticos para sistemas de alta tensão, e sistemas em geral, onde altas potências elétricas são utilizadas.

[6] Nos últimos anos, têm sido desenvolvidos sensores com tecnologia que utilizam dispositivos eletro-ópticos e que são utilizados para medidas de altas tensões e altas correntes em sistemas elétricos de potência, tais como: transformadores de tensão e corrente ópticos, também conhecidos como OVT (*Optical Voltage Transformer*) e OCT (*Optical Current Transformer*). Esses tipos de sensores apresentam características muito interessantes, como, resposta rápida a transitórios, baixa susceptibilidade a interferência eletromagnética, alta relação Sinal/Ruído, tamanho e peso reduzidos, alta isolamento galvânica e, atualmente, com custo em declínio.

[7] É de conhecimento dos especialistas no assunto que o monitoramento de corrente “campo magnético” e voltagem “campo elétrico” é crítico para sistemas de alta tensão, e sistemas em geral, onde altas potências elétricas são utilizadas.

[8] Atualmente, no mercado são utilizados os dispositivos de medida de altas correntes, que usam fibras ópticas oferecem diversas vantagens para aplicações em sistemas de potência. Entre os parâmetros que podem ser medidos com técnicas de fibras ópticas estão: corrente, voltagem, temperatura, pressão e etc.

[9] O principal inconveniente reside no fato dos profissionais especializados na manutenção e monitoramento, obrigatoriamente, precisam respeitar uma distância mínima referente aos condutores de alta tensão, logo, sensores comercializados no mercado tornam-se inviáveis devido ao fato dos mesmos necessitarem do desligamento da rede para serem conectados.

[10] Logo, os sensores atuais utilizados em subestações de alta voltagem são bastante seguros, porém têm, como o principal inconveniente, o fato de serem intensamente dispendiosos, o que torna a tecnologia de sensores ópticos de corrente e voltagem bastante atrativa, tendo em vista que estes dispositivos são vistos como a próxima geração de dispositivos de medida de alta corrente e voltagem, substituindo os transformadores convencionais utilizados na indústria de energia elétrica de

potência.

ANÁLISE DO ESTADO DA TÉCNICA

[11] Em pesquisa realizada em bancos de dados especializados foram encontrados documentos referentes a sensor para medidas de altas correntes, tal como, o documento de nº. BR102012025441-7 que trata-se de um dispositivo sensor de corrente e fibra óptica compreendendo um suporte plano que pode ser envolto/curvado ao redor de um condutor de corrente elétrica, dito suporte plano contendo: uma fibra óptica de entrada para receber um sinal óptico proveniente de um primeiro arranjo óptico de polarização externo; um enlace óptico formado por uma sequência intercalada de pelo menos dois tipos de fibra óptica constituídas por materiais com constantes de Verdet V_1 e V_2 diferentes, ditas fibras ópticas emendadas/acopladas entre si em um caminho óptico contínuo, de tal modo que o sinal óptico é propagado ao longo desse enlace óptico onde sofrerá alterações conforme a ação de um campo magnético B gerado pela corrente elétrica que passa pelo condutor; uma fibra óptica de saída ao final do enlace óptico para transmitir o dito sinal óptico a um segundo arranjo óptico de polarização externo.

[12] Outro documento de nº. MU 8902115-0 refere-se de um equipamento de sensoriamento destinado à aferição sem interrupção da rede, pertencente ao campo dos equipamentos de medição elétrica; constituído por um sensor para aquisição de dados elétricos, o qual é posicionado diretamente no cabo de média tensão e conectado ao instrumento de medição por meio de cabos isolados; mais especificamente o sensor com dupla função é composto por uma bobina de corrente de alta isolamento, induzida pela corrente primária, um sensor resistivo, um circuito de proteção de sobre tensão, dotado de fusíveis de proteção, ligados a um cabo de ligação isolado dotado de um conector para conexão com cabo ao instrumento de medição e também um cabo de conexão à terra através do conector.

OBJETIVOS DA INVENÇÃO

[13] Visando apresentar melhorias ao mercado consumidor, o requerente desenvolveu aperfeiçoamento introduzido em sensor óptico para medidas de altas correntes em geração e transmissão elétricas, mais precisamente, um sensor óptico

baseado em um interferômetro, onde, o sensoriamento da corrente é obtido através de uma perturbação mecânica na fibra óptica sensível do interferômetro.

[14] Dito sensor é dividido em dois módulos. O primeiro módulo é constituído pelo interferômetro composto por dois acopladores de fibra óptica conectados, além de equipamentos auxiliares, tal como, fonte de laser, colimador, foto detector e osciloscópio. O segundo é constituído pelo agente perturbador mecânico, uma bobina que induz um campo magnético, proveniente da passagem de uma corrente elétrica AC, com frequência de 60Hz, em um ímã permanente preso no final de uma haste flexível de aço, onde a outra extremidade da mesma é presa em uma estrutura imóvel.

[15] Dentro destes aspectos podem ser salientadas as vantagens em se utilizar a tecnologia de fibras ópticas nas medidas de corrente e tensão. O desenvolvimento deste sensor de alta precisão permitirá às empresas geradoras, distribuidoras e fornecedoras de energia, o acesso a um produto de custos menores para aquisição e manutenção.

[16] Outra vantagem reside no fato do uso da tecnologia de fibras ópticas para medição de tensão e corrente, sem estar conectada diretamente na rede de alta tensão, inovar na qualidade da segurança quanto ao manuseio do sensor.

[17] Outra vantagem reside no fato do sensor ser constituído com um interferômetro de fibra óptica, obtendo-se a facilidade de coletar dados geograficamente distribuídos, contribuindo na logística para centralizar, em um único ponto, ou em vários, as informações de como se encontra a qualidade da energia.

DESENVOLVIMENTO E PESQUISA PARTA REALIZAÇÃO DA INVENÇÃO

[18] O desempenho do sensor foi idealizado utilizando um campo magnético, que foi induzido por uma corrente senoidal que circulava em uma bobina indutora magnética de cobre em forma de cone (figuras 1A e 1B). A magnetização do ímã permanente é orientada pela direção perpendicular das espiras da bobina indutora magnética. Considerando a distância D entre o ímã e a bobina, a força de Lorentz aplicada ao ímã é dada por:

$$\vec{F} = VB_M \frac{I}{2\pi D^2} \vec{a}_r, \quad (1)$$

onde I é a corrente que circula na bobina indutora magnética;

\vec{a}_r é o vetor unitário, indicando a direção radial a partir das espiras da referida bobina;

V e B_M são o volume e a magnetização do ímã permanente, respectivamente.

[19] A equação 1 dá a expressão da força da Lorentz que atua sobre o ímã permanente, tal como uma função da corrente I e da distância D . As oscilações na haste que contém o magneto são induzidas por variações de força que, por sua vez, distendem a fibra. Estas deformações mecânicas causam uma tensão axial que provocam mudança no comprimento da fibra de maneira não uniforme. Portanto, provocando uma mudança de fase na luz que viaja na fibra mono modo (MMF).

[20] Uma vez que o comprimento da seção sensível da fibra mono modo, presa ao ímã, é muito maior do que a amplitude das oscilações forçadas em *cantilever*, pode-se sugerir que as tensões induzidas na fibra mono modo são muito pequenas e elásticas, e são diretamente proporcional à tensão e à força aplicada ao braço da haste com o ímã, mas o suficiente para ser sensoriado por um interferômetro de *Mach-Zehnder*:

$$\varphi_m = K |\vec{F}|, \quad (2)$$

Onde K é um coeficiente que considera as propriedades mecânicas da haste *cantilever* e MMF, o módulo de *Young* das fibras, de tração estático salienta aplicado ao MMF, o comprimento da parte sensível da fibra (entre grampos), e o comprimento de onda da luz. Quando uma corrente alternada com uma frequência de oscilação f_i induz um campo magnético, a força que atua sobre o feixe de *cantilever* produz tensões dinâmicas no MMF, com uma periodicidade de $1/f_i$. A equação relevante para a corrente alternada será:

$$I = I_0 \sin(2\pi f_i t) \quad (3)$$

onde I_0 é a amplitude da corrente e t é o tempo. Depois substituindo Eq. 3 em Eq. 1 a então Eq. 1 em Eq. 2 obtém-se que:

$$\varphi_m = KV_B M \frac{I_0 \sin(2\pi f_i t)}{D^2} \quad (4)$$

Considerando V e BM como parâmetros invariáveis, pode-se deduzir, a partir da Equação 4, que a conversão eficiente de corrente AC na fase transitória depende da distância D e no coeficiente K .

[21] No sensor ora inovado pequenas fases transientes dadas pela equação 4 são medidas por meio de um interferômetro adaptativo fotorrefractivo. Em todas as variações da intensidade do interferômetro, a intensidade de interferência do feixe PD (medida pelo fotodetector) são proporcionais ao seno da diferença de fase entre a onda de referência e objeto:

$$P_D = P_O + P_R + 2\sqrt{P_O P_R} \cos \Delta\phi \quad \text{com} \quad \Delta\phi = \phi_0 + \phi_m, \quad (5)$$

onde P_O e P_R são as intensidades do objeto transmitido e as ondas de referência difratados, respectivamente, e é o desvio de fase média entre o feixe de objeto e de referência. Portanto, de acordo com a Eq. 5, transientes pequenos são linearmente transferidos para as variações de intensidade se a função cosseno pode ser aproximada por seu argumento.

[22] A equação 6 que expressa a Lei de Biot-Savart e descreve o vetor indução magnética \vec{B} na bobina, que representa o agente perturbador de 60Hz, figura 1B.

$$B = \frac{\mu_0 N i R^2}{2(Z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (6)$$

onde B é a quantificação da indução magnética na bobina, μ_0 a permissividade do meio, N o numero de espiras da bobina, i a corrente passando pela bobina, R o raio das espiras da bobina, Z é o eixo da bobina perpendicular ao plano xy e passa pelo centro da espiral.

DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[23] A complementar a presente descrição de modo a obter uma melhor compreensão das características do presente invento e de acordo com uma preferencial realização prática do mesmo, acompanha a descrição, em anexo, um conjunto de desenhos, onde, de maneira exemplificada, embora não limitativa, se representou seu funcionamento:

a figura 1A representa uma vista esquemática do conjunto de acopladores de fibra óptica simétrico e equipamentos auxiliares ao Interferômetro;

a figura 1B ilustra um agente perturbador o qual promove o movimento do imã junto com a fibra a uma distância da bobina.

a figura 2 mostra um gráfico com leituras do sensor para correntes de 15 a 60 A, desenho em cores conforme seção IV, artigo 26, inciso VII, parágrafo 7º do IN 13/2013;

a figura 3 revela um gráfico com leituras do sensor para correntes variando de 60 a 160 A, desenho em cores conforme seção IV, artigo 26, inciso VII, parágrafo 7º do IN 13/2013;

a figura 4 representa um gráfico com leituras das medições tomando a amperagem fixa em 70 A e com a variação das distancias em centímetros nos valores de: 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 e 5.0 cm, desenho em cores conforme seção IV, artigo 26, inciso VII, parágrafo 7º do IN 13/2013;

a figura 5 revela um perfil temporal dos pulsos ópticos obtidos do sensor para uma corrente de 70 A com variação da distância D em 1.5 cm, 3.0 cm, 4.5 cm, desenho em cores conforme seção IV, artigo 26, inciso VII, parágrafo 7º do IN 13/2013; e

a figura 6 mostra um gráfico variando a amperagem em 70 A, 90 A e 100 A e mantendo a distância em 3.0 cm, desenho em cores conforme seção IV, artigo 26, inciso VII, parágrafo 7º do IN 13/2013;

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

[24] Com referência aos desenhos ilustrados, a presente patente de invenção se refere à “APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS”, mais precisamente, um sensor de corrente (1) com tecnologia de fibras ópticas para medição de: corrente, voltagem, temperatura, pressão e etc.

[25] Dito sensor (1) é dividido em dois módulos:

i) o primeiro módulo (M1) é constituído pelo Interferômetro (2) de Mach-Zender, acopladores de Fibra Óptica conectados, onde, essencialmente, são previstos

equipamentos auxiliares, tais como, fonte de laser (3), colimador (4), foto detector (5) e osciloscópio (6). O sensor funciona com o rearranjo de um Interferômetro (2) juntamente com seu agente perturbador (M2). Quando uma perturbação mecânica é aplicada à região sensível, entre "s" (s) e "t" (t) da fibra óptica do interferômetro, faz surgir uma modulação de fase na trajetória da luz, na região sensível da fibra, que se propaga até a saída do interferômetro. A amplitude da modulação de fase é proporcional à amplitude da perturbação, ou seja, quanto maior o campo magnético provocado pela passagem da corrente na bobina indutora, maior será a amplitude de perturbação, que por consequência, maior será a amplitude da modulação de fase na fibra óptica. A frequência da modulação de fase será a mesma da perturbação, ou seja, 60 Hz, frequência da rede analisada.

ii) O segundo módulo (M2) é constituído pelo agente perturbador mecânico (7), o qual permanece a uma distância (D), variação esta em centímetros nos valores de: 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 e 5.0 cm em relação a uma bobina (8) que induz um campo magnético, proveniente da passagem de uma corrente elétrica AC, com frequência de 60Hz, em um ímã (12) permanente preso no final de uma haste (9) flexível de aço, onde a outra extremidade da mesma é presa em uma estrutura cilíndrica (10) imóvel. A mediana da fibra óptica (11) entre "s" (s) e "t" (t) da região sensível é fixado ao ímã (12), constituindo uma geometria equilátera onde será realizada a perturbação, a qual provocará uma mudança de fase na trajetória da luz que passa pela fibra óptica (11).

[26] Desta feita, a tecnologia de fibras ópticas pode ser utilizada para medição de tensão e corrente, sem estar conectada diretamente na rede de alta tensão, inovando na qualidade da segurança quanto ao manuseio do sensor.

[27] É certo que quando o presente invento for colocado em prática, poderão ser introduzidas modificações no que se refere a certos detalhes de construção e forma, sem que isso implique afastar-se dos princípios fundamentais que estão claramente substanciados no quadro reivindicatório, ficando assim entendido que a terminologia empregada não teve a finalidade de limitação.

REIVINDICAÇÕES

1. **“APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS”**, mais precisamente, um aperfeiçoamento introduzido em sensor óptico para medição de correntes elétricas caracterizado por o sensor (1) ser dividido em dois módulos:

i) O primeiro módulo (M1) é constituído pelo interferômetro (2) de Mach-Zender, acopladores de fibra óptica conectados, onde são previstos equipamentos auxiliares: fonte de laser (3), colimador (4), fotodetector (5) e osciloscópio (6); o sensor funciona como o rearranjo de um interferômetro (2) juntamente com seu agente perturbador (M2); qualquer perturbação mecânica aplicada à região sensível, entre “s” (s) e “t” (t) da fibra óptica do interferômetro, faz surgir uma modulação de fase na trajetória da luz, na região sensível da fibra, que se propaga até a saída do interferômetro; a frequência da modulação de fase analisada será a mesma da perturbação, ou seja, a frequência da rede analisada; e

ii) O segundo módulo (M2) é constituído pelo agente perturbador mecânico (7), que permanece a uma distância (D), variação esta em centímetros nos valores de: 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 cm em relação a uma bobina (8), que induz um campo magnético, proveniente da passagem de uma corrente elétrica AC em um ímã (12) permanente preso no final de uma haste (9) flexível de aço, onde a outra extremidade da mesma está presa em uma estrutura cilíndrica (10) imóvel.

2. **“APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS”**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a amplitude da modulação de fase (M1) ser proporcional à amplitude da perturbação; quanto maior o campo magnético provocado pela passagem de corrente na bobina indutora, maior será a amplitude de perturbação, e, por consequência, maior será a amplitude da modulação de fase na fibra óptica.

3. **“APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS”**, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por mediana da fibra óptica (11) do módulo (M2) aplicada entre “s” e “t” da região sensível, ser fixado ao ímã (12), constituindo uma geometria equilátera onde será realizada a perturbação, a qual provocará uma mudança de fase na trajetória da luz que passa pela fibra óptica (11).

4. **“APERFEIÇOAMENTO INTRODUZIDO EM SENSOR ÓPTICO PARA MEDIDAS DE ALTAS CORRENTES EM GERAÇÃO E TRANSMISSÃO ELÉTRICAS”**, de acordo com a reivindicações anteriores, caracterizado por ser empregado na medição de corrente elétrica sem a necessidade de estar conectado diretamente à rede de alta tensão.

1/4

Figuras

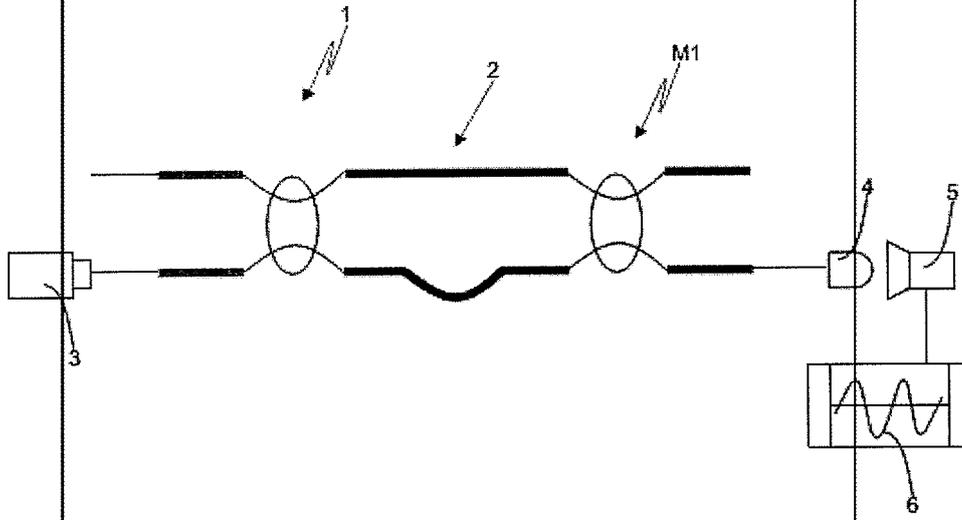


Figura 1A

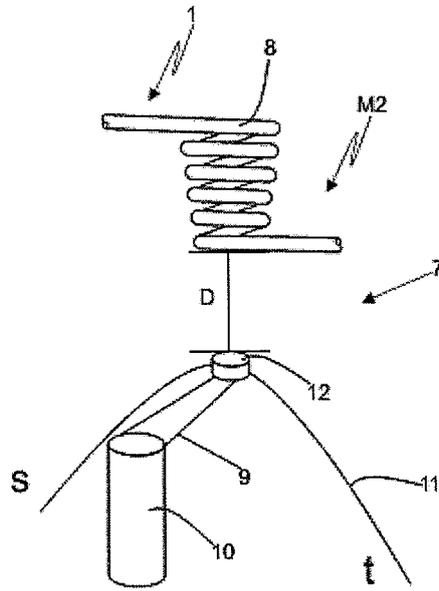


Figura 1B

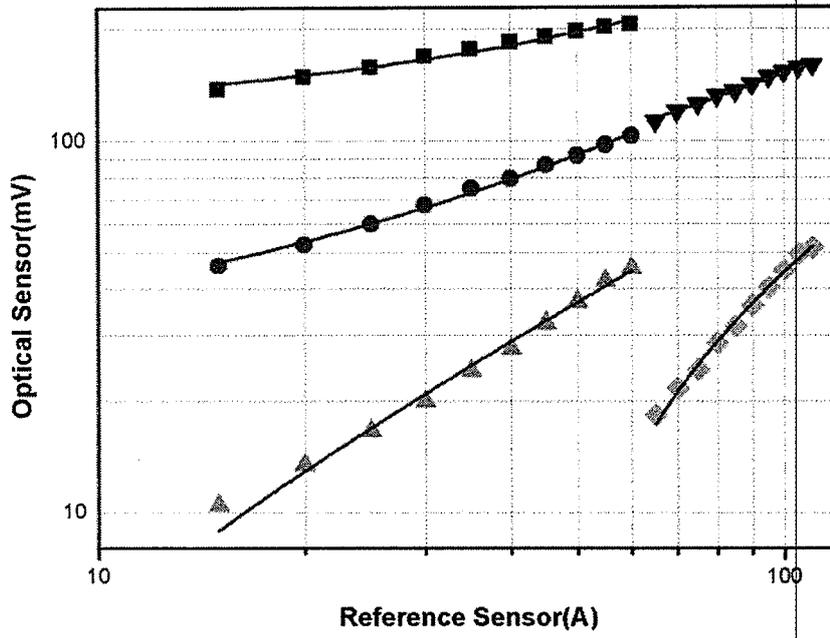


Figura 2

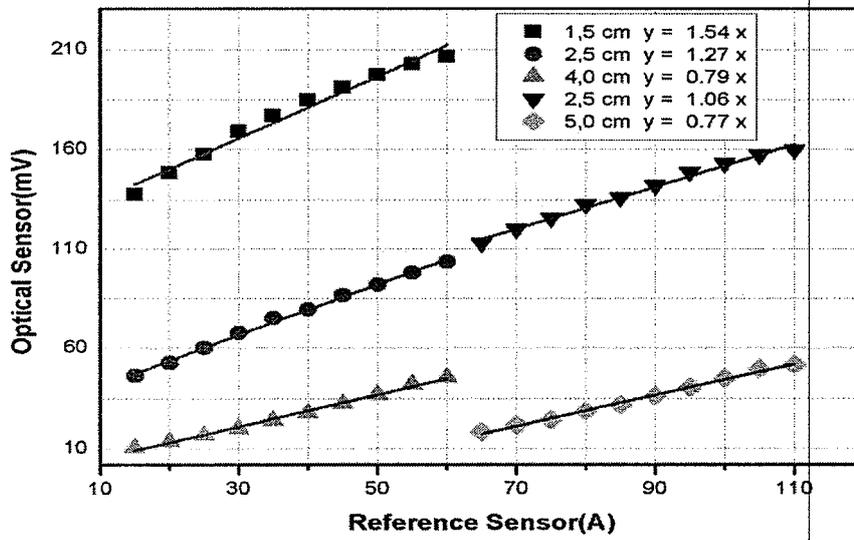


Figura 3

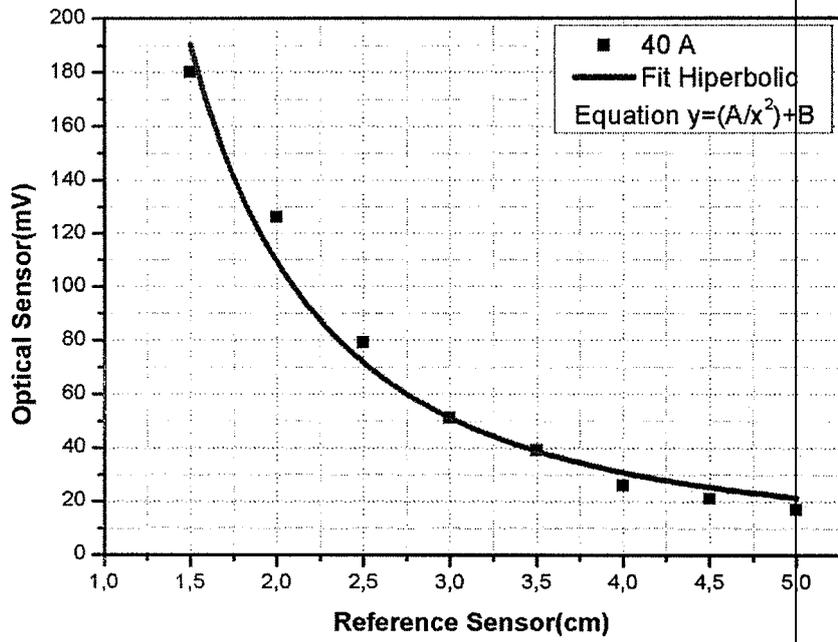


Figura 4

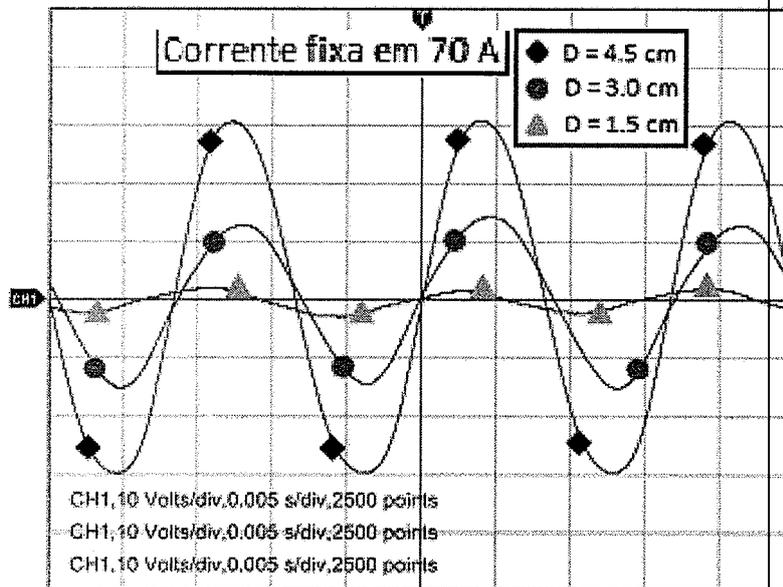


Figura 5

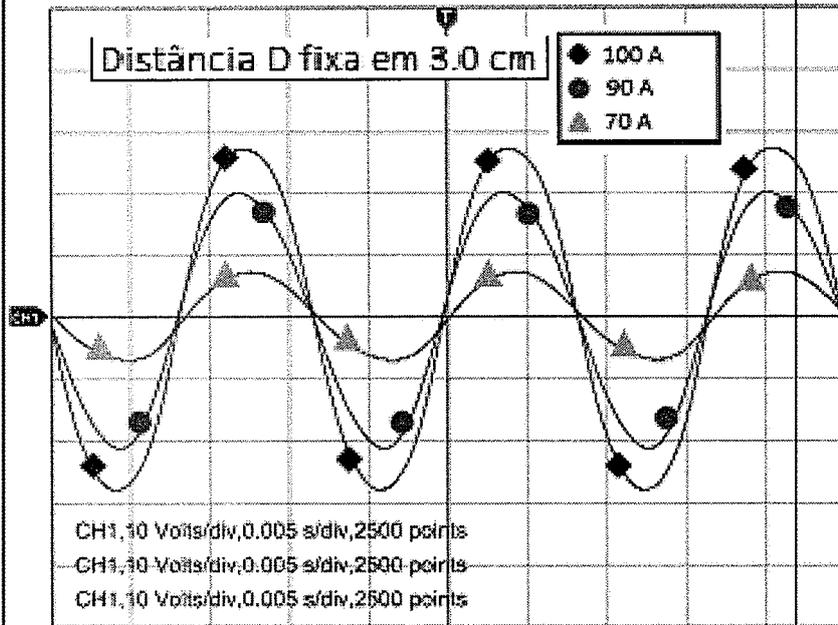


Figura 6