



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) BR 112012008347-3 B1**



**(22) Data do Depósito:** 16/09/2010

**(45) Data de Concessão:** 08/12/2020

**(54) Título:** MÉTODO DE MEDIÇÃO DE UMA POSIÇÃO E/OU FORMATO PARA UMA FIBRA DE MÚLTIPLOS NÚCLEOS, APARELHO PARA A REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES DE POSIÇÃO E/OU FORMATO DE UMA FIBRA DE MÚLTIPLOS NÚCLEO E MEIO DE ARMAZENAMENTO NÃO TRANSITÓRIO

**(51) Int.Cl.:** G01B 11/24; G02B 6/10; G01N 21/41.

**(30) Prioridade Unionista:** 01/06/2010 US 61/350,343; 02/09/2010 US 12/874,901; 18/09/2009 US 61/243,746; 28/10/2009 US 61/255,575.

**(73) Titular(es):** INTUITIVE SURGICAL OPERATIONS, INC..

**(72) Inventor(es):** MARK E. FROGGATT; JUSTIN W. KLEIN; DAWN K. GIFFORD; STEPHEN TOD KREGER.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2010002517 de 16/09/2010

**(87) Publicação PCT:** WO 2011/034584 de 24/03/2011

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 19/03/2012

**(57) Resumo:** MÉTODO DE MEDIÇÃO PARA UMA FIBRA DE MÚLTIPLOS NÚCLEOS, APARELHO PARA A REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES DE UMA FIBRA DE MÚLTIPLOS NÚCLEOS E MEIO DE ARMAZENAMENTO NÃO TRANSITÓRIO. A presente invenção refere-se a um método e aparelho para a medição precisa que são descritos para a percepção de formato com uma fibra de múltiplos núcleos. Uma mudança no comprimento ótico é detectada em alguns dos núcleos na fibra de múltiplos núcleos até um ponto na fibra de múltiplos núcleos. Uma localização e/ou direção são determinadas no ponto na fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento ótico. A precisão da determinação é superior a 0,5% do comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos até o ponto na fibra de múltiplos núcleos. Em uma modalidade ilustrativa preferida, a determinação inclui a determinação de um formato de pelo menos uma parte da fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento ótico.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para  
**"MÉTODO DE MEDIÇÃO DE UMA POSIÇÃO E/OU FORMATO  
PARA UMA FIBRA DE MÚLTIPLOS NÚCLEOS, APARELHO PARA  
A REALIZAÇÃO DE MEDIÇÕES DE POSIÇÃO E/OU FORMATO DE  
UMA FIBRA DE MÚLTIPLOS NÚCLEO E MEIO DE  
ARMAZENAMENTO NÃO TRANSITÓRIO".**

Campo Técnico

[001] O campo técnico refere-se a medições óticas, e mais particularmente, à posição ótica e/ou percepção de formato. Esta invenção trata de um método e aparelho para realizar tais medições para uma fibra de múltiplos núcleos, e de um associado meio de armazenamento não transitório.

Antecedentes

[002] A medição de formato é um termo geral que inclui a percepção da posição de estrutura no espaço tridimensional. Essa medição coincide com o que o olho humano percebe como a posição de um objeto.

[003] Visto que os olhos realizam continuamente essa tarefa, pode-se assumir que a medição seja simples. Se se considerar um comprimento de corda, pode-se medir fisicamente a posição em cada centímetro ao longo da corda para se estimar o formato. Mas essa tarefa é entediante e é cada vez mais difícil com formatos mais complexos.

[004] Outra consideração é como se realizar a medição se a corda não for fisicamente alcançada ou vista.

[005] Se a corda for contida dentro de uma caixa vedada, sua posição não pode ser determinada por técnicas de medição convencionais. A corda, nesse exemplo, pode ser substituída por uma fibra ótica.

[006] A percepção do formato de um cilindro deformado longo e

fino, tal como uma fibra ótica, é útil em muitas aplicações variando, por exemplo, da fabricação e construção até medicina e aplicações aeroespaciais. Na maior parte dessas aplicações, o sistema de percepção de formato deve ser capaz de determinar com precisão a posição da fibra, por exemplo, dentro de menos de um por cento de seu comprimento, e, em muitos casos, menos de um décimo de um por cento de seu comprimento. Existe um número de abordagens para o problema de medição de formato, mas nenhuma soluciona adequadamente as exigências da maior parte das aplicações visto que são muito lentas, não abordam as precisões necessárias, não funcionam na presença de dobras apertadas, ou falham em compensar adequadamente a torção da fibra. Em muitas aplicações, a presença de forças toroidais que torcem a fibra mina a precisão, e dessa forma, a utilidade dessas abordagens.

[007] Abordagens convencionais para medir o formato de uma fibra utilizam tensão como o sinal de medição fundamental. A tensão é uma razão da mudança no comprimento de um segmento de fibra pós-tensão  $X$  o comprimento original desse segmento (pré-tensão). À medida que um objeto como uma fibra é dobrado, o material no exterior da dobra é alongado, enquanto que o material no interior da dobra é comprimido. Conhecendo-se essas mudanças na tensão local e conhecendo-se a posição original do objeto, uma aproximação da nova posição da fibra pode ser realizada.

[008] A fim de se perceber efetivamente a posição com alta precisão, vários fatores-chave devem ser solucionados. Primeiro, para uma abordagem baseada em tensão, as medições de tensão são preferivelmente precisas em dezenas de níveis de nanotensões (10 partes por bilhão). Mas as medições de tensão de alta precisão não são prontamente obteníveis pelas medições de tensão resistivas e óticas convencionais. Portanto, uma nova técnica para se medir a

tensão com precisão extremamente alta deve ser vislumbrada e não é baseada em tensão no sentido convencional.

[009] Em segundo lugar, a presença da torção na fibra ótica deve ser medida a um alto grau de precisão e compensada na computação do formato. Pela criação de uma fibra de múltiplos núcleos que é espiralada e possui um núcleo central, a torção de uma fibra pode ser percebida. Mas o problema é como se obter uma precisão de posição rotativa menor do que 1 grau. Para um sensor de rotação de alta precisão, a posição dos sensores de tensão ao longo do comprimento da fibra deve ser conhecida também com um alto grau de precisão. Portanto, alguma forma de medir a taxa de rotação dos núcleos externos na fibra espiralada é desejável, que pode então ser utilizada para corrigir o cálculo da posição da fibra.

[0010] Em terceiro lugar, a fibra com múltiplos núcleos que é espiralada em uma taxa suficiente e com grade de Bragg (um medido de tensão ótico convencional) é difícil e cara de se fabricar. É, portanto, desejável se fornecer um método de obtenção de resoluções de nanotensão sem grade de Bragg.

[0011] Em quarto lugar, a fibra de múltiplos núcleos não mantém tipicamente a polarização e, assim, os efeitos da polarização são preferivelmente considerados.

### Sumário

[0012] A tecnologia descrita abaixo explica como se utilizar as propriedades intrínsecas da fibra ótica para permitir um cálculo de formato muito preciso em vista dos fatores e considerações acima. Essencialmente, a posição de fibra é determinada pela interpretação dos reflexos posteriores da luz de laser espalhada a partir das moléculas de vidro dentro da fibra. Essa medição pode ser realizada de forma rápida, com uma alta resolução e com um alto grau de precisão.



[0013] Um método de medição muito preciso e aparelho são descritos para medir a posição e/ou a direção de uma fibra de múltiplos núcleos. Uma mudança no comprimento ótico é detectada em um dos núcleos na fibra de múltiplos núcleos até a ponta na fibra de múltiplos núcleos. Uma localização e/ou uma direção apontada são determinadas na ponta da fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento obtido. A direção corresponde a m ângulo de dobra da fibra de múltiplos núcleos na posição ao longo da fibra de múltiplos núcleos determinada com base nos sinais de tensão ortonormais. A precisão da determinação é melhor do que 0,5% do comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos até a ponta da fibra de múltiplos núcleos. Em uma modalidade ilustrativa preferida, a determinação inclui a determinação de um formato de pelo menos uma parte da fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento ótico.

[0014] A determinação pode incluir o cálculo de um ângulo de dobra da fibra de múltiplos núcleos em qualquer posição ao longo da fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento até a posição. Depois disso, o formato da fibra de múltiplos núcleos pode ser determinado com base no ângulo de dobra calculado. O ângulo de dobra pode ser calculado em duas ou três dimensões.

[0015] A detecção da mudança no comprimento ótico inclui preferivelmente a detecção de uma mudança incremental no comprimento ótico em um dos núcleos na fibra de múltiplos núcleos para cada um dos comprimentos de segmento múltiplos até uma ponta na fibra de múltiplos núcleos. A mudança detectada geral no comprimento ótico é então baseada em uma combinação de mudanças incrementadas. A mudança no comprimento ótico é determinada pelo cálculo de uma mudança de fase ótica em cada

comprimento de segmento ao longo da fibra de múltiplos núcleos e o desenrolamento da mudança de fase ótica para se determinar o comprimento ótico.

[0016] Mais especificamente, em uma modalidade ilustrativa não limitadora, uma resposta de fase de um sinal de luz refletido em pelo menos dois dos múltiplos núcleos a partir de comprimentos de segmento múltiplos pode ser detectada. A tensão na fibra nos comprimentos do segmento causa uma mudança na fase do sinal de luz refletido dos comprimentos dos segmento nos dois núcleos. A resposta de fase é preferivelmente e continuamente monitorada ao longo do comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos para cada comprimento de segmento.

[0017] Em outra modalidade ilustrativa não limitadora, um padrão de espalhamento Rayleigh refletido no sinal de luz refletido é detectado para cada comprimento de segmento, eliminando, assim, a necessidade de grade de Bragg ou similares. O padrão de espalhamento Rayleigh refletido é comparado com um padrão de espalhamento Rayleigh de referência para cada comprimento de segmento. A resposta de fase é determinada para cada comprimento de segmento com base na comparação.

[0018] Uma modalidade ilustrativa não limitadora também determina um parâmetro de torção associado com a fibra de múltiplos núcleos em um ponto na fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas em comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos. A localização no ponto na fibra de múltiplos núcleos é então transladada para um sistema de coordenadas ortonormais com base no parâmetro de torção determinado. Preferivelmente, o parâmetro de torção determinado é corrigido para cada um dos comprimentos de segmento.

[0019] Em uma aplicação ilustrativa onde a fibra de múltiplos

núcleos inclui três núcleos periféricos espaçados em torno de um quarto núcleo ao longo do centro da fibra de múltiplos núcleos, uma resposta de fase de um sinal de luz refletido em cada um dos quatro núcleos a partir de cada comprimento de segmento é determinada. A tensão na fibra de múltiplos núcleos em um ou mais dos comprimentos de segmento causa uma mudança na fase do sinal de luz refletido em cada núcleo. As respostas de fase para os três núcleos periféricos são medidas. A resposta de fase medida é combinada com a resposta de fase do quarto núcleo para remover uma tensão de modo comum. O parâmetro de torção é então determinado a partir da resposta de fase combinada.

[0020] Em outra modalidade ilustrativa não limitadora, as mudanças de comprimento ótico induzido por dobra ao longo da fibra de múltiplos núcleos são determinadas e compensadas quando da determinação do parâmetro de torção. Uma dobra em um dos comprimentos de segmento é calculada e quadrada. A dobra quadrada é multiplicada por uma constante para produzir um produto de dobra que é combinado com a mudança determinada no comprimento ótico de um núcleo externo da fibra de múltiplos núcleos em um comprimento de segmento. Uma aplicação benéfica ilustrativa para essa modalidade é que o raio de dobra seja inferior a 50 mm.

[0021] Outra modalidade ilustrativa não limitadora determina uma orientação rotativa da fibra de múltiplos núcleos em torno de seu eixo geométrico em um ponto na fibra de múltiplos núcleos em cada um dos comprimentos de segmento. Uma correção é feita para realizar a torção e a torção resultante na orientação determinada com base nas mudanças detectadas no comprimento ótico dos múltiplos núcleos de fibra. Essa correção é necessária para se computar a direção de dobra corrente.

[0022] De acordo com uma fibra de múltiplos núcleos

caracterizada por uma taxa de rotação nominal, outra modalidade ilustrativa não limitadora determina uma rotação angular da fibra de múltiplos núcleos em uma ponta na fibra de múltiplos núcleos em cada um dos comprimentos de segmento em comparação com a taxa de rotação nominal da fibra de múltiplos núcleos. Uma variação na taxa de rotação nominal no ponto ao longo da fibra de múltiplos núcleos é determinada e corrigida. Um "fator de oscilação" é determinado para a fibra de múltiplos núcleos pela restrição da fibra de múltiplos núcleos a uma orientação curva em um plano. A correção é então feita para o fator de oscilação quando da determinação da localização no ponto na fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento ótico.

[0023] Em outra modalidade ilustrativa não limitadora, a luz é transmitida com pelo menos dois estados de polarização ao longo da fibra de múltiplos núcleos. Os reflexos da luz com pelo menos dois estados de polarização são combinados e utilizados na determinação da localização ou direção apontada no ponto na fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças detectadas no comprimento ótico. Os dois estados de polarização incluem um primeiro estado de polarização e um segundo estado de polarização que são pelo menos nominalmente ortogonais. Um controlador de polarização é utilizado para transmitir um primeiro sinal de luz no primeiro estado de polarização ao longo da fibra de múltiplos núcleos. Uma mudança independente de polarização no comprimento ótico em cada um dos múltiplos núcleos na fibra de múltiplos núcleos é calculada até o ponto na fibra de múltiplos núcleos utilizando reflexos dos primeiro e segundo sinais de luz.

#### Breve Descrição dos Desenhos

[0024] A figura 1 ilustra uma seção transversal de uma fibra de múltiplos núcleos ilustrativa;

- [0025] A figura 2 ilustra uma fibra de múltiplos núcleos dobrada;
- [0026] A figura 3 ilustra que a dobra na fibra é proporcional à tensão nos núcleos fora de centro;
- [0027] A figura 4 ilustra que o ângulo de dobra em qualquer local ao longo da fibra pode ser determinado por uma soma de todos os ângulos anteriores;
- [0028] A figura 5 ilustra que à medida que uma fibra contendo grade de Bragg é tensionada, uma diferença de fase medida a partir de um estado de referência começa a acumular;
- [0029] A figura 6 ilustra um relógio que ajuda a visualizar a relação entre a mudança de fase e posição;
- [0030] A figura 7 ilustra como uma falta de resolução na fase de medição pode ser problemática;
- [0031] A figura 8 é um gráfico que ilustra uma diferença de fase de um sinal de espalhamento Rayleigh entre uma digitalização de referência e uma digitalização de medição no começo de uma seção de fibra que está sob tensão;
- [0032] A figura 9 é um gráfico que ilustra que a coerência é perdida com a medição de referência em uma distância maior descendo por uma fibra sob tensão;
- [0033] A figura 10 ilustra uma fase ótica representada contra a frequência para dois retardos diferentes;
- [0034] A figura 11 ilustra uma fase recuperada através de uma seção da fibra onde uma terceira mudança de índice ocorreu;
- [0035] A figura 12 ilustra um exemplo de fibra de percepção de formato de múltiplos núcleos enrolada helicoidalmente;
- [0036] A figura 13 ilustra uma fibra ótica de múltiplos núcleos de teste ilustrativa e não limitadora;
- [0037] A figura 14 ilustra uma seção transversal de uma fibra espiralada onde a posição dos núcleos externos parece girar em torno

do núcleo central progredindo descendentemente pelo comprimento da fibra;

[0038] A figura 15 é um gráfico que ilustra um exemplo de variações na taxa de rotação de uma fibra;

[0039] A figura 16 é um gráfico que ilustra um sinal de oscilação ilustrativo com uma variação de fase periódica de uma taxa de rotação fabricada ao longo do comprimento de uma fibra de percepção de formato;

[0040] A figura 17 ilustra como a torção muda a taxa de rotação de uma fibra de percepção de formato com base na orientação da força para a direção de rotação nominal da fibra;

[0041] A figura 18 ilustra um núcleo externo que sofre torção modelada como um cilindro achatado à medida que translada ao longo da superfície;

[0042] A figura 19 é um fluxograma ilustrando procedimentos ilustrativos não limitadores para calcular a torção externa ao longo da fibra;

[0043] A figura 20 ilustra um conjunto de dados ilustrativo para um formato genérico que ilustra os procedimentos da figura 19 em maiores detalhes;

[0044] A figura 21 é um gráfico que ilustra um desvio leve entre duas curvas de fase;

[0045] A figura 22 é um gráfico ilustrando um sinal de torção produzido a partir da figura 21;

[0046] A figura 23 ilustra a necessidade de compensação de torção no cálculo de formato;

[0047] A figura 24 apresenta curvas de tensão ortogonal ilustrativas para uma fibra localizada em várias dobras que ocorrem no mesmo plano;

[0048] A figura 25 ilustra um diagrama de fluxograma descrevendo

etapas ilustrativas não limitadoras para o cálculo de formato a partir de tensão;

[0049] A figura 26 ilustra que se cada um dos múltiplos vetores de orientação for colocado de ponta a ponta uma medição precisa do formato é obtida;

[0050] A figura 27 é um sistema de percepção de formato e posição ótica ilustrativo e não limitador;

[0051] A figura 28 é um fluxograma ilustrando etapas ilustrativas não limitadoras para calcular a correção de birrefringência;

[0052] A figura 29 ilustra um perfil de tensão induzido por dobra de uma seção transversal de uma fibra de percepção de formato;

[0053] A figura 30 ilustra duas representações de fase comparando um sinal de fase de núcleo central com uma fase média dos núcleos externos;

[0054] A figura 31 ilustra uma resposta à tensão ilustrativa para um núcleo externo para um circuito de fibra de 40 mm de diâmetro;

[0055] A figura 32 é um gráfico ilustrando uma correção de birrefringência induzida por dobra para o circuito de fibra de 40 mm de diâmetro;

[0056] A figura 33 é um gráfico comparando um sinal de torção com e sem uma correção de birrefringência de 2a. ordem;

[0057] A figura 34 ilustra um controlador de polarização de circuito ilustrativo não limitador entre uma fibra de percepção de formato e um sistema de percepção de posição e formato;

[0058] A figura 35 ilustra um sinal em plano para um formato relativamente simples onde 1,4 metros de fibra de percepção de formato são direcionados através de uma única volta de 180 graus com um raio de dobra de 50 mm;

[0059] A figura 36 ilustra três medições fora de plano sucessivas onde entre cada medição, a polarização varia utilizando-se um

controlador de polarização;

[0060] A figura 37 é um gráfico ilustrando um exemplo no qual duas medições sucessivas do núcleo central, com diferentes estados de polarização de entrada não possuem uma variação significativa na resposta de fase;

[0061] A figura 38 é um gráfico ilustrando um exemplo no qual duas medições sucessivas de um núcleo externo respondem diferentemente à polarização de entrada fornecendo evidencia para a birrefringência na fibra de sensor de formato;

[0062] A figura 39 é um gráfico ilustrando que a correção da birrefringência aperfeiçoa a precisão do sistema; e

[0063] A figura 40 é um gráfico ilustrando que a correção de ambas a birrefringência de primeira e segunda ordem aperfeiçoa a precisão do sistema.

#### Descrição Detalhada

[0064] Na descrição a seguir, para fins de explicação e não limitação, detalhes específicos são apresentados, tal como nós particulares, entidades funcionais, técnicas, protocolos, padrões, etc. a fim de se fornecer uma compreensão da tecnologia descrita. Será aparente aos versados na técnica que outras modalidades podem ser praticadas além dos detalhes específicos descritos abaixo. Em outros casos, as descrições detalhadas dos métodos, dispositivos, técnicas bem conhecidos, etc. são omitidas de modo a não obscurecer a descrição com detalhes desnecessários. Blocos funcionais individuais são ilustrados nas figuras. Os versados na técnica apreciarão que as funções desses blocos podem ser implementadas utilizando circuitos de hardware individuais, utilizando programas de software e dados em conjunto com um microprocessador programado de forma adequada ou computador de finalidade geral, utilizando circuitos integrados específicos de aplicativo (ASIC) e/ou utilizando um ou mais



processadores de sinal digital (DSPs). As instruções de programa de software e dados podem ser armazenadas no meio de armazenamento legível por computador e quando as instruções são executadas por um computador ou outro controle de processador adequado, o computador ou processador realizam as funções.

[0065] Dessa forma, por exemplo, será apreciado pelos versados na técnica que os diagramas em bloco apresentados aqui podem representar vistas conceituais do conjunto de circuito ilustrativo ou outras unidades funcionais consubstanciando os princípios da tecnologia. De forma similar, será apreciado que qualquer fluxograma, diagramas de transição de estado, pseudocódigos, e similares representam vários processos que podem ser substancialmente representados no meio legível por computador e executados por um computador ou processador, caso ou não tal computador ou processador seja explicitamente ilustrado.

[0066] As funções dos vários elementos incluindo blocos funcionais, incluindo, mas não limitado, aos rotulados ou descritos como "computador", "processador", ou "controlador" podem ser fornecidas através do uso de hardware tal como hardware de circuito e/ou hardware capaz de executar software na forma de instruções codificadas armazenadas no meio legível por computador. Dessa forma, tais funções e blocos funcionais ilustrados devem ser compreendidos como sendo implementados por hardware e/ou implementados por computador, e, dessa forma, implementados por máquina.

[0067] Em termos de implementação de hardware, os blocos funcionais podem incluir ou englobar, sem limitação, hardware de processador de sinal digital (DSP), processador de conjunto de instrução reduzido, conjunto de circuito de hardware (por exemplo, digital ou analógico) incluindo, mas não limitado, a circuitos integrados

específicos de aplicativo (ASIC), e (onde adequado) máquinas de situação capazes de realizar tais funções.

[0068] Em termos de implementação de computador, um computador é geralmente compreendido para compreender um ou mais processadores ou um ou mais controladores, e os termos computador e processador e controlador podem ser empregados de forma intercambiável aqui. Quando fornecidas por um computador ou processador ou controlador, as funções podem ser fornecidas por um único computador, processador ou controlador dedicado, por um único computador, processador ou controlador compartilhado, ou por uma pluralidade de computadores, processadores, controladores individuais, alguns dos quais podem ser compartilhados ou distribuídos. Ademais, o uso do termo "processador" ou "controlador" deve ser considerado também como fazendo referência a outro hardware capaz de realizar tais funções e/ou executar o software, tal como, por exemplo, o hardware citado acima.

#### Rastreamento de Fase para Aumentar a Precisão Angular

[0069] A figura 1 ilustra uma seção transversal de uma fibra de múltiplos núcleos ilustrativa 1 que inclui um núcleo central 2 e três núcleos periféricos 3, 4 e 5 cercados pelo revestimento 6. Esses núcleos 3-5 ilustrados nesse exemplo são espaçados por aproximadamente 120 graus.

[0070] A percepção de formato com uma fibra de múltiplos núcleos assume que as distâncias entre os núcleos na fibra permaneçam constantes, quando observadas em seção transversal, independentemente do formato da fibra. Essa consideração é frequentemente válida visto que o vidro é muito duro e muito elástico. Adicionalmente, a seção transversal da fibra (por exemplo, ~125 microns) é pequena em comparação com as dimensões das curvas sofridas pela fibra (por exemplo, raios de dobra superiores a 5 mm).

Essa manutenção da posição transversal dos núcleos implica em que toda a deformação da fibra deva ser acomodada pelo alongamento ou compressão dos núcleos. Como ilustrado na figura 2, quando uma fibra de formato é dobrada, um núcleo no exterior 7 da dobra será alongado, enquanto um núcleo no interior 8 da dobra sofrerá compressão.

[0071] Visto que o comprimento médio de um segmento de núcleo de fibra é considerado inalterado, um exercício de geometria mostra que a mudança na direção (isso é, um vetor que descreve a posição do eixo geométrico central do segmento de fibra), pode ser calculada com base na mudança nos comprimentos de núcleo e distância entre os núcleos. Outros efeitos, tal como coeficiente de tensão ótica, devem ser levados em consideração. O resultado é que a mudança na direção para um determinado segmento da fibra é diretamente proporcional à diferença nas mudanças de comprimento nos núcleos dentro do segmento.

[0072] A figura 3 ilustra que a dobra na fibra  $\theta$  é proporcional à tensão  $\varepsilon$  nos núcleos fora de central onde  $s$  é o comprimento de segmento,  $r$  é o raio e  $k$  é uma constante. A fim de se eliminar a tensão e temperatura da medição, uma medição diferencial entre os núcleos é utilizada.

$$\Delta\theta = k \left( \frac{d_{s_2} - d_{s_1}}{s} \right) = k(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad \text{Eq. 1}$$

[0073] A equação acima descreve a mudança angular para um determinado segmento de fibra e como se relaciona com uma mudança na tensão. O movimento para o próximo segmento na fibra, a mudança angular do segmento anterior deve ser adicionado à próxima mudança no ângulo para o próximo segmento para se calcular a direção atual da fibra. Em duas dimensões, todos os ângulos anteriores podem ser acumulados para se encontrar o ângulo de dobra

em qualquer local particular ao longo da fibra. A figura 4 ilustra que o ângulo de dobra em qualquer ponto ou localização ao longo da fibra pode ser determinado por uma soma de todos os ângulos levando até o ponto, por exemplo,  $\theta_5 = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4 + \Delta\theta_5$ . Se houver erro, esse erro se torna maior quanto maior a fibra, crescendo como a raiz quadrada do número de segmentos.

[0074] Para se evitar esse erro de medição de ângulo acumulado, os inventores conceberam a medição direta da mudança no comprimento de um segmento ao invés da tensão de medição. Matematicamente, a soma dos ângulos então se torna a soma das mudanças de comprimento ao longo da fibra como ilustrado na equação (2) onde L corresponde ao comprimento de fibra.

$$\theta = \sum \Delta\theta = k \sum \frac{(d_{s2} - d_{s1})}{s} = \frac{k(\Delta L_2 - \Delta L_1)}{s} \quad \text{Eq. 2}$$

[0075] Dessa forma, o ângulo em qualquer posição Z ao longo da fibra então se torna linearmente proporcional à diferença entre as mudanças totais no comprimento dos núcleos até essa posição como ilustrado na equação (3).

$$\theta(z) \propto \Delta L_2(z) - \Delta L_1(z) \quad \text{Eq. 3}$$

[0076] Portanto, se a mudança de comprimento total ao longo da fibra puder ser precisamente rastreada de forma contínua, ao invés da soma de cada mudança local individual na tensão, o erro angular pode ser impedido de crescer. Posteriormente, será ilustrado como é possível se rastrear a mudança no comprimento de um núcleo para uma precisão melhor que 10 nm, e se manter essa precisão através de todo o comprimento da fibra. Esse nível de precisão resulta em 0,3 grau de precisão angular com uma separação de 70 microns entre os núcleos e, teoricamente, cerca de 0,5% de precisão de posição de comprimento de fibra.

[0077] Infelizmente, a relação cumulativa definida em (3) não se

mantém em três dimensões, mas a maior parte dos formatos dimensionais pode ser precisamente representada como uma sucessão de curvas bidimensionais, e na presença de mudanças angulares pequenas ( $<10$  graus), ângulos tridimensionais também possuem essa relação cumulativa simples. Consequentemente, essa abordagem é útil para se determinar as distribuições de erro em três dimensões.

[0078] O insight fornecido por esse exercício geométrico é que a mudança de comprimento total como uma função da distância ao longo da fibra de múltiplos núcleos seja utilizada ao invés da tensão local. Em outras palavras, erros relativamente grandes nos valores de tensão local medidos podem ser tolerados desde que toda a tensão medida correspondente à mudança de comprimento total até esse ponto, permaneça precisa. Precisão de nanotensão são alcançadas sem se exigir razões de sinal para ruído extremamente grandes, visto que as distâncias através das quais as nanotensões são calculadas são relativamente grandes (por exemplo, muitos centímetros tal como 10 a 1000 cm.). Como explicado posteriormente na descrição, o rastreamento da mudança no comprimento também pode ser utilizado para determinar a rotação ao longo do comprimento da fibra permitindo precisões mais altas do que o esperado na medição da rotação da fibra, ou ângulo de rotação em torno do eixo geométrico da fibra, também.

#### Rastreamento de Fase na Fibra Ótica

[0079] Como um sensor, uma fibra ótica pode fornecer medições espacialmente contínuas ao longo de todo o seu comprimento. As medições contínuas são importantes visto que as mudanças de fase ótica são utilizadas para fornecer medições de deslocamento de resolução muito alta. Posteriormente é explicado como o espalhamento intrínseco na fibra pode ser utilizado para alcançar essa

medição, mas é conceitualmente mais fácil se começar a explicação com Grade de Bragg de Fibra (FBGs). Uma Graduação Bragg de Fibra é uma modulação periódica do índice de refração da fibra. Cada período tem cerca de meio comprimento de onda de luz na fibra. O comprimento de onda de vácuo da luz é de cerca de 1550 nm, e seu comprimento de onda na fibra é de cerca de 1000 nm. O período de graduação é, portanto, de cerca de 500 nm. Tipicamente, uma graduação Bragg é utilizada como um sensor pela medição de seu espectro refletido. A condição de graduação Bragg é calculada utilizando-se a equação abaixo

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad \text{Eq. 4}$$

[0080] Nessa equação,  $\lambda_B$  representa o comprimento de onda,  $n$  é o índice de refração da fibra, e  $\Lambda$  corresponde ao período de graduação. É considerado que o índice de refração permaneça constante, então o comprimento de onda refletido depende apenas do período de graduação. À medida que a fibra é tensionada, o período de graduação é distorcido, criando uma mudança no comprimento de onda refletido. Dessa forma, para uma mudança no comprimento de onda, é possível se derivar a quantidade de tensão que foi aplicada à fibra. O período de uma graduação Bragg é altamente uniforme, e é conveniente se modelar essa periodicidade como uma modulação sinusoidal. Quando representadas como senoide, as distorções no período de graduação podem ser descritas como mudanças de fase. Para se ilustrar esse conceito, considera-se o exemplo na figura 5 que ilustra que uma fibra contendo grade de Bragg seja tensionada, uma diferença de fase medida a partir de um estado de referência começa a acumular.

[0081] A representação de uma graduação Bragg tensionada ilustrada na figura 5 ilustra as mudanças locais no índice de refração como segmentos brancos e tracejados alternados. Considerando-se

uma graduação Bragg ideal, todos os períodos são idênticos, e a fase de padrão de modulação aumenta linearmente se movendo ao longo da graduação. Em outras palavras, a taxa de mudança de fase com distância é inversamente proporcional ao período de graduação. Se uma pequena parte da graduação for esticada, então a taxa de mudança da fase diminui na parte esticada.

[0082] Na figura 5, o padrão superior apresenta uma graduação não distorcida com uma fase perfeitamente linear como uma função da posição. O padrão alterado inferior apresenta uma distorção de graduação devido à tensão. O gráfico inferior ilustra a diferença na fase entre as duas graduações em cada local. A distorção na graduação resulta em uma mudança de fase no sinal refletido da graduação com relação à fase não distorcida original. Uma mudança de fase de 90 graus é ilustrada. Depois do segmento tensionado, a taxa de mudança retorna para o estado não tensionado. No entanto, a fase nessa região está agora desviada da fase original por uma quantidade igual à mudança de fase total no segmento tensionado. Esse desvio de fase é diretamente proporcional à mudança de comprimento real da fibra ótica.

[0083] Essa ilustração ilustra apenas quinze períodos de graduação. Visto que um período tem 500 nm, isso soma 7,5 um de comprimento. O estiramento da fibra para indução de uma mudança de fase de 90 graus desloca o restante das graduações não tensionadas por um quarto de um período, ou 125 nm. Uma medição de Reflectometria de Domínio de Frequência Ótica (OFDR) pode ter uma resolução espacial da ordem de 50 microns. Em outras palavras, cada ponto de dados OFDR, ou índice, é separado por 50 um. Logo, uma distorção de 125 nm resulta em apenas uma fração pequena de uma mudança de índice OFDR na posição real da graduação. Enquanto a mudança de 125 nm na posição não é detectável

propriamente dita, a mudança de fase de 90 graus é relativamente facilmente medida com um sistema OFDR.

[0084] OFDR pode, portanto, ser utilizado para medir as distorções dentro de grade de Bragg, e, ao invés de apenas medir a taxa de mudança de fase (isto é, comprimento de onda), a fase absoluta pode ser medida, e a partir da fase, as mudanças de distância em cada segmento ao longo do núcleo da fibra. Isso é importante para medições precisas de formato em uma situação na qual a fase na graduação é observada como tendo mudado, enquanto a posição da graduação não ilustra qualquer mudança discernível. Tecnologias de medição de fibra ótica convencionais tratam a mudança de fase e de posição como efeitos separados.

[0085] Uma forma de se visualizar a relação entre a mudança de fase e a posição é imaginar que a fase do sinal ótico é representada pelo ponteiro de segundos de um relógio, e que a localização ao longo da fibra no índice é representada pelo ponteiro das horas de um relógio. A figura 6 ilustra um relógio sem ponteiro de minutos. Tal relógio dificulta a determinação do tempo para uma resolução de um minuto. Mas esse relógio ainda é útil para temporização de ambos os eventos de curta duração com o ponteiro de segundos e eventos de longa duração com o ponteiro de horas. A falta de um ponteiro de minutos, não é útil para medição de eventos de duração média intermediários (por exemplo, 1 hora e 12 minutos e 32 segundos) para a precisão de um segundo. Essa dificuldade de conexão de duas escalas tem feito com que os sistemas de medição ótica convencionais tratem os fenômenos separadamente.

[0086] Essa analogia com o relógio ajuda a esclarecer porque uma medição contínua é necessária ao longo de todo o comprimento da fibra. Pelo monitoramento da posição do ponteiro de segundos continuamente, o número de revoluções completas pode ser medido, o



que permite o monitoramento simultâneo de durações longas com uma alta precisão. Conectando-se a analógica de relógio com a discussão anterior das grade de Bragg, cada  $360$  graus, ou  $2\pi$ , de mudança de fase é igual a uma mudança de  $500$  nm na localização. Pelo rastreamento contínuo de fase ao longo da fibra ótica, ambas as tensões locais e as mudanças de comprimento totais da fibra ótica podem ser medidas com uma precisão muito alta.

[0087] Um desafio no rastreamento de fase continuamente é que a resolução da medição deve ser suficiente de modo que a fase não mude de um segmento para o próximo por mais de  $2\pi$ . A figura 7 ilustra como essa falta de resolução pode ser problemática visto que não existe forma de se distinguir, por exemplo, entre uma mudança de  $\pi/3$  e uma mudança de  $\pi/3+2\pi$ . Logo, duas mudanças de fase diferentes parecem ter o mesmo valor no círculo unitário. Em outras palavras, um erro de um índice seria incorrido em uma conta de  $2\pi$  revoluções totais. Nesse exemplo, a medição da mudança geral no comprimento da fibra ótica seria deficiente por  $500$  nm.

[0088] Logo, é importante que um sistema de percepção de formato tenha uma resolução suficiente para garantir a capacidade de se rastrear a fase ao longo de todo o comprimento de uma fibra de percepção de formato para se garantir a precisão de um sistema de percepção de formato.

#### Medições com Base em Espalhamento Rayleigh

[0089] Como explicado acima, o uso típico de um FBG para perceber envolve mudanças de medição no espectro refletido de grade de Bragg individuais espaçadas em algum intervalo descendendo por uma fibra. A tensão é derivada para cada seção da fibra a partir da medição para cada graduação Bragg. Para a percepção de formato utilizando-se FBGs, cada medição de tensão indica quanto um determinado segmento é dobrado e em que direção. Essa informação

é somada para todos os segmentos medidos para fornecer a posição e/ou formato de fibra total. No entanto, utilizando-se esse método, um erro em cada segmento acumula ao longo da fibra. Quanto maior a fibra, maior o erro na medição. Esse erro utilizando múltiplas grade de Bragg limita a velocidade de operação e a faixa de aplicações.

[0090] Se houver uma graduação contínua ao longo da fibra, então a fase pode ser rastreada em cada ponto ao longo da fibra como descrito acima. O rastreamento da fase ao longo de todo o comprimento do núcleo evita acúmulo de erro. A invés do acúmulo de erro como a raiz quadrada do número de segmentos de fibra, o erro de comprimento total permanece constante em uma fração do comprimento de onda ótica no material. Como mencionado anteriormente, um comprimento de onda de luz pode ter cerca de 1550 nm em um vácuo e cerca de 1000 nm na fibra, o que é efetivamente 500 nm em reflexo. Uma razão de sinal para ruído de 50 fornece uma precisão de 10 nm devido à natureza de percurso de ida e volta (reflexo) da medição. A precisão da tensão resultante através de um metro de fibra será de 10 nanotensão.

[0091] O espalhamento Rayleigh pode ser visualizado como uma graduação Bragg com fases randômicas e amplitudes ou uma graduação Bragg consistindo totalmente de defeitos. Esse padrão de espalhamento Rayleigh enquanto aleatório, é fixado dentro de um núcleo de fibra quando esse núcleo é fabricado. A tensão aplicada a uma fibra ótica causa mudanças ou distorções no padrão de espalhamento Rayleigh. Essas distorções induzidas do padrão de espalhamento Rayleigh podem ser utilizadas como uma medição de tensão de alta resolução para percepção de formato pela comparação de uma digitalização de referência da fibra quando a fibra está em um formato conhecido com uma nova digitalização da fibra quando a mesma foi dobrada ou tensionada.

[0092] A figura 8 ilustra resultados ilustrativos de tal comparação. Essa figura ilustra a diferença de fase do sinal de espalhamento Rayleigh entre uma digitalização de referência e uma digitalização de medição no começo de uma seção de fibra que entra em uma região que está sob tensão. Os dados são representados como uma função do índice de fibra, que representa a distância ao longo da fibra. Uma vez que a região de tensão é adentrada, a diferença de fase começa a acumular. Visto que  $\pi$  e  $-\pi$  possuem o mesmo valor no círculo unitário, o sinal sofre "envolvimento" a cada múltiplo de  $2\pi$  à medida que a diferença de fase cresce ao longo do comprimento da fibra. Isso pode ser observado em torno do índice 3550 onde os valores para a esquerda do mesmo estão se aproximando de  $\pi$ , e então, subitamente, os valores estão em  $-\pi$ . Como ilustrado, cada envolvimento representa cerca de 500 nm de mudança de comprimento na fibra. Visto que um índice representa cerca de 50 microns de comprimento, leva cerca de cem envoltimentos da fase para cumular um índice total de mudança de retardo entre as medições e a referência.

[0093] Os dados na figura 9 são do mesmo conjunto de dados que os da figura 8, mas a partir de uma área mais para baixo da fibra em torno de cerca de 35 envoltimentos de fase, ou, aproximadamente um terço de um índice. O ruído nos dados de diferença de fase tem aumentado e é causado pela mudança crescente entre os padrões de espalhamento de medição e referência. Isso reduz a coerência entre os dados de referência e medição utilizados para determinar a diferença de fase. Se a localização aparente de um segmento de fibra de espalhamento individual mudar por mais de um índice, então a coerência entre a referência e medição é perdida, e nenhuma medição de tensão pode ser obtida a partir da comparação dos sinais espalhados.

[0094] Portanto, os dados de referência devem ser combinados com os dados de medição pela compensação de mudança devido à tensão ao longo da fibra. No caso de um índice ser de cerca de 50 mícrons, através de um segmento de um metro, isso soma apenas 50 partes por milhão, que não é uma tensão grande. De fato, o peso da fibra propriamente dita pode induzir tensões dessa ordem. Além disso, uma mudança na temperatura de apenas poucos graus Celsius pode induzir uma mudança similar. Portanto, essa mudança no índice deve ser compensada no cálculo de distorção de núcleo.

[0095] Uma mudança como resultado da tensão em uma expansão física dos segmentos individuais que resulta em um tempo aumentado de voo da luz espalhada. A mudança entre a referência e a medição é referida como retardo. O retardo pode ser compensado pela consulta a um modelo de como uma mudança no retardo para qualquer ponto no núcleo de percepção afeta o sinal refletido a partir desse ponto. Se um campo (luz) estiver oscilando em uma frequência,  $\nu$ , e sofrer um retardo de  $\tau$ , então a fase ótica como uma função do retardo é fornecida por:

$$\phi = 2\pi\tau\nu \quad \text{Eq. 5}$$

[0096] Se a fase ótica,  $\phi$ , for representada como uma função da frequência,  $\nu$ , uma linha reta é obtida que forma uma interseção com a origem. Na prática, a passagem através de um material tal como vidro distorce essa curva de uma linha perfeita, o que deve ser mantido em mente quando da comparação do valor medido, com os valores previstos por esse modelo. Mas para fins imediatos, esse modelo é suficiente. A figura 10 ilustra essa fase para dois retardos diferentes. Em um exemplo, o sistema de medição não limitador utilizando o princípio descrito acima, uma varredura típica de laser deve cobrir uma faixa de 192,5 a 194,5 THz. Essas frequências representam uma varredura de 1542 nm (194,5 THz) para 1558 nm (192,5 THz), que foi

uma faixa de varredura de teste para uma aplicação de sensor de formato de teste não limitador. Através dessa faixa de interesse, a fase para um retardo determinado varre através de uma faixa de  $\Delta\phi$ . Para os dois retardos ilustrados,  $\tau_1$  e  $\tau_2$ , a diferença nessa faixa de varredura,  $\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1$  é inferior à mudança na fase da frequência central (193,5 THz), rotulada  $d\phi$ . O fator entre a mudança na fase da frequência central e a mudança na fase de faixa de varredura será a razão da frequência central para a faixa de varredura de frequência. Nesse caso ilustrativo, a razão é de 96,7.

[0097] Na aplicação de teste ilustrativa, a faixa de varredura,  $\Delta\nu$ , determina a resolução espacial,  $\delta\tau$ , da medição. Em outras palavras, determina o comprimento de um índice no domínio de tempo. Esses são relacionados por uma relação invertida:

$$\delta\tau = 1/(\Delta\nu) \quad \text{Eq. (6)}$$

[0098] Para a faixa de frequência ilustrativa descrita acima, o comprimento de um índice é de 0,5 ps, ou 50 microns no vidro. Na frequência central, uma mudança de fase de  $2\pi$  é induzida por uma mudança no retardo de apenas 0,00516 ps ou 516 nm no vidro. Uma mudança de fase de  $2\pi$ , então, representa apenas uma mudança de índice fracionada dos dados de domínio de tempo. A fim de mudar o retardo por um índice no domínio de tempo, o retardo deve mudar o suficiente para induzir uma mudança de fase na frequência central de  $96,7 \times 2\pi$ .

[0099] Esses exemplos ilustram que uma mudança de fase linear representa uma mudança na localização dos eventos no domínio de tempo, ou retardo. Como observado acima, uma mudança de um índice irá distorcer completamente as medições da mudança de fase ao longo do comprimento da fibra. Para se comparar adequadamente as fases, então, essas mudanças devem ser compensadas à medida que ocorrem, e os dados de referência devem ser alinhados com os

dados de medição descendo por todo o comprimento do núcleo. Para corrigir essa degradação de coerência, uma mudança temporal dos dados de referência é necessária. Isso pode ser realizado pela multiplicação de dados de referência para um segmento determinado,  $r_n$ , por uma fase linear. Aqui  $n$  representa o índice no domínio de tempo, ou o aumento da distância ao longo da fibra. A inclinação dessa correção de fase,  $\gamma$ , é encontrada pela realização de um encaixe linear nos valores de retardo anteriores. O desvio de fase nesse termo de correção,  $\varphi$ , é selecionado de modo que o valor médio dessa fase seja igual a zero.

$$\tilde{r}_n = r_n e^{i(\gamma n + \varphi)} \quad \text{Eq. 7}$$

[00100] A figura 11 ilustra a diferença de fase corrigida através de uma seção de fibra onde um terço de uma mudança de índice ocorreu. A diferença de fase nesse local mantém a mesma razão de sinal para ruído como a parte mais próxima da fibra. Pela aplicação de uma mudança temporal com base no retardo em uma distância particular, a coerência foi recuperada reduzindo-se o ruído de fase.

#### Fibra de Percepção de Formato Ilustrativa

[00101] O rastreamento de distorções no espalhamento Rayleigh da fibra ótica fornece medições contínuas de alta resolução da tensão. A geometria da fibra de percepção de formato de múltiplos núcleos é utilizada para explicar como essa estrutura de múltiplos núcleos permite as medições de ambas a dobra e a direção de dobra ao longo do comprimento de fibra.

[00102] A fibra ótica contém múltiplos núcleos em uma configuração que permite a percepção de ambas uma torção externa e tensão independentemente da direção de dobra. Uma modalidade ilustrativa não limitadora de tal fibra é ilustrada na figura 1 e descrita abaixo. A fibra contém quatro núcleos. Um núcleo é posicionado ao longo do

eixo geométrico central da fibra. Os outros três núcleos externos são colocados de forma concêntrica com relação a esse núcleo em intervalos de 120 graus em uma separação de 70  $\mu\text{m}$ . Os núcleos externos são girados com relação ao núcleo central criando um hélice com um período de 66 voltas por metro. Uma ilustração dessa fibra de percepção de formato de múltiplos núcleos helicoidalmente envolvida é apresentada na figura 12. Uma representação de uma fibra ótica de múltiplos núcleos de teste não limitadora utilizada nessa discussão é apresentada na figura 13.

[00103] Outro exemplo não limitador de uma fibra de percepção de formato contém mais de três núcleos externos para facilitar a fabricação da fibra ou para adquirir dados adicionais para aperfeiçoar o desempenho do sistema.

[00104] Em uma seção transversal de uma fibra espiralada, a posição de cada núcleo externo parece girar em torno de um núcleo central que progride descendentemente pelo comprimento da fibra como ilustrado na figura 14.

#### Correção de Oscilação na Fibra Torcida

[00105] Para se traduzir os sinais de tensão dos núcleos externos em dobra e direção de dobra, a posição de rotação de um núcleo externo deve ser determinada com um alto grau de precisão. Considerando-se uma taxa de rotação constante do hélice (ver figura 12), a posição dos núcleos externos pode ser determinada com base na distância ao longo da fibra. Na prática, a fabricação da fibra espiralada introduz alguma variação na taxa de rotação pretendida. A variação na taxa de rotação ao longo do comprimento da fibra causa um distanciamento angular da variação linear esperada a partir da taxa de rotação nominal, e esse distanciamento angular é referido como "oscilação" e simbolizada como um sinal de oscilação  $W(z)$ .

[00106] Uma fibra de teste ilustrativa fabricada com uma geométrica

de múltiplos núcleos helicoidais possui um grau muito alto de precisão em termos de taxa de rotação média, 66 voltas por metro. No entanto, através de distancias curtas (por exemplo, 30 cm) a taxa de rotação varia de forma significativa, e pode fazer com que a posição angular varie tanto quanto 12 graus a partir de uma mudança de fase puramente linear com a distância. Esse erro na taxa de rotação é medido pela colocação da fibra em uma configuração que causará uma dobra contínua em um único plano, como é o caso de uma fibra espiralada em uma superfície plana. Quando a fibra é colocada em tal espiral, um núcleo helicoidal alternará entre tensão e compressão à medida que percorre através da parte externa de uma dobra e a parte interna de uma dobra. Se a distorção de fase for representada  $X$  distância, um sinal sinusoidal é formado com um período que combina a taxa de rotação da fibra. Variações na fabricação da fibra de múltiplos núcleos podem ser detectadas como pequenas mudanças na fase a partir da taxa de rotação constante esperada da fibra.

[00107] Um exemplo dessas variações na taxa de rotação é ilustrado na figura 15. A curva sólida são dados de fase (sinal de dobra) tirados de um espiral plano, e a linha pontilhada é uma senoide perfeita gerada na mesma frequência e fase que o hélice. Note-se que no começo do segmento de dados as curvas estão em fase com os cruzamentos zero alinhados. Pelo meio do segmento, a curva sólida avança ligeiramente adiante da curva pontilhada, mas pelo final do segmento de dados, um desvio significativo é observado. Se o componente DC do sinal de fase for removido, e uma mudança de fase calculada, a diferença entre esses dois sinais é significativa e de alguma forma periódica.

[00108] A figura 16 ilustra um sinal de Oscilação ilustrativo,  $W(z)$ , com uma variação periódica de uma taxa de rotação fabricada ao longo do comprimento de uma fibra de percepção de formato. A



variação de fase é ilustrada como uma função do comprimento no índice de fibra. O conjunto de dados ilustrativo representa cerca de três metros de fibra. Da ordem de um terço de um metro, uma periodicidade na natureza da taxa de rotação da fibra é detectada. Através do comprimento da fibra, uma taxa de rotação média consistente da fibra é produzida, mas essas pequenas flutuações devem ser medidas a fim de se interpretar corretamente os dados de fase produzidos pela fibra torcida de múltiplos núcleos. Essa medição na mudança na taxa de rotação ou "oscilação" pode ser reproduzida e é importante para o cálculo do formato de acordo com a fabricação prática da fibra.

#### Percepção de Torção em Fibras de Múltiplos Núcleos

[00109] As forças de torção aplicadas à fibra também possuem o potencial de induzir uma mudança rotativa dos núcleos externos. Para se mapear adequadamente os sinais de tensão dos núcleos para as direções de dobra corretas, ambas a oscilação e torção aplicada devem ser medidas ao longo de todo o comprimento da fibra de percepção de formato. A geometria da fibra de múltiplos núcleos espiralada permite a medição direta da torção ao longo do comprimento da fibra em adição à tensão induzida por dobra como será descrito abaixo.

[00110] Se uma fibra de múltiplos núcleos for girada enquanto é puxada, o núcleo central é essencialmente não perturbado, enquanto os núcleos externos seguem um percurso helicoidal descendente pela fibra como ilustrado no centro da figura 17. Se tal estrutura for então submetida à tensão de torção, o comprimento do núcleo central permanece constante. No entanto, se a direção da tensão de torção combinar com a retirada do hélice, o período do hélice aumenta e os núcleos externos serão alongados uniformemente como ilustrado no topo da figura 17. Inversamente, se a direção de

torção for contrária à retirada do hélice, os núcleos externos são "desenrolados" e sofrem uma compressão ao longo de seu comprimento como ilustrado no fundo da figura 17.

[00111] Para se derivar a sensibilidade da configuração de múltiplos núcleos à torção, a mudança no comprimento que um núcleo externo sofrerá devido à torção é estimada. Um segmento de fibra é modelado como um cilindro. O comprimento  $L$  do cilindro corresponde ao tamanho de segmento, enquanto que a distância do núcleo central para um núcleo externo representa o raio  $r$  do cilindro. A superfície de um cilindro pode ser representada como um retângulo se se fatiar o cilindro longitudinalmente e então achatar a superfície. O comprimento da superfície é igual ao comprimento de segmento  $L$  enquanto a largura da superfície corresponde à circunferência do cilindro  $2\pi r$ . Quando a fibra é torcida, o ponto final da fibra move em torno do cilindro, enquanto o ponto inicial permanece fixo. Projetado na superfície achatada, o núcleo torcido forma uma linha diagonal que é mais longa do que o comprimento  $L$  do retângulo. Essa mudança no comprimento do núcleo externo é relacionada com a torção na fibra.

[00112] A figura 18 ilustra um núcleo externo que sofre a torção e pode ser modelado como um cilindro achatado à medida que translada ao longo da superfície. A partir da superfície achatada acima, o seguinte pode ser ilustrado:

$$\partial d \approx \frac{2\pi r^2}{L} \partial \phi \quad \text{Eq. 8}$$

[00113] Na equação acima,  $\partial d$  é a mudança no comprimento do núcleo externo devido à mudança na rotação  $\partial \phi$ , da fibra a partir de seu estado espiralado. A distância radial entre um núcleo central e um núcleo externo é representada por  $r$ , e  $2\pi/L$  é a taxa de rotação da fibra helicoidal em rotação por comprimento unitário.

[00114] A distância mínima detectável é considerada nesse

exemplo como sendo um comprimento de um radiano de uma onda ótica. Para o sistema de teste ilustrativo, o comprimento de onda operacional é de 1550 nm, e o índice de vidro é de cerca de 1,47, resultando em uma distância mínima detectável de aproximadamente 10 nm. Se o raio for de 70 microns e o período do hélice for de 15 mm, então a equação (8) indica que a fibra de sensor de formato possui uma sensibilidade à torção de 0,3 grau. Se a fibra de percepção começar seu formato pela rotação imediata por 90 graus, de modo que o erro devido à torção seja maximizado, então o erro de posição resultante será de 0,5% do comprimento de fibra. Na maior parte das aplicações, dobras de 90 graus não ocorrem no começo da fibra, e, portanto, o erro será inferior a 0,5%.

#### Cálculo de Torção em uma Fibra de Quatro Núcleos

[00115] A sensibilidade da medição de torção é baseada na sensibilidade de um núcleo único, mas a percepção da torção ao longo do comprimento da fibra depende de todos os quatro núcleos. Se a diferença na mudança no comprimento entre a média dos núcleos externos e o núcleo central for conhecida, então a torção (em termos de número absoluto de graus) presente na fibra pode ser calculada.

[00116] A torção externa ao longo da fibra pode ser calculada utilizando-se procedimentos ilustrativos não limitadores destacados no fluxograma ilustrado na figura 19. Os sinais de fase para todos os quatro núcleos A-D são determinados, e os sinais para os núcleos externos B-D são medidos. O cálculo da torção extrínseca é realizado pela comparação da média dos sinais de fase de núcleo externos com o núcleo central. Se a fibra sofrer uma força de torção, todos os núcleos externos sofrem um alongamento ou compressão similar determinados pela orientação da força para a direção de rotação do hélice. O núcleo central não sofre uma mudança de comprimento como resultado de uma força de torção aplicada. No entanto, o núcleo

central é suscetível a mudanças de tensão e temperatura e serve como uma forma de medir diretamente os modos de tensão comuns. Dessa forma, se o sinal de fase de núcleo central for subtraído ou removido da média dos três núcleos externos, uma medição de mudança de fase como resultado da torção é obtida. Essa mudança de fase pode ser escalonada para uma medição de torção extrínseca, ou em outras palavras, a rotação da fibra. Dentro da região de uma torção aplicada através do comprimento da fibra menos que uma rotação total, um termo de segunda ordem deve ser preferivelmente considerado. Adicionalmente, a torção distribui de forma linear entre os pontos de união de modo que várias regiões de torção possam ser observadas ao longo do comprimento da fibra.

[00117] A figura 20 ilustra um conjunto de dados ilustrativo para um formato genérico que ilustra o algoritmo da figura 19 em maiores detalhes. O gráfico ilustra a distorção de fase como resultado de mudança local no comprimento do núcleo central (preto) e um núcleo externo (cinza) de uma fibra de percepção de formato para uma dobra geral. As duas curvas de fase ilustradas na figura 20 representam as mudanças locais em comprimento sofrido por dois dos núcleos na fibra de percepção de formato de múltiplos núcleos. As curvas para dois dos núcleos externos não são ilustradas em um esforço de se manter os gráficos claros, mas os valores desses outros dois núcleos são utilizados na determinação do formato final da fibra.

[00118] O sinal de fase de núcleo central não sofre de oscilações periódicas. As oscilações são um resultado de uma transição de núcleo externo entre os modos de compressão e tensão à medida que o hélice propaga através de uma determinada dobra. O núcleo central acumula a fase ao longo do comprimento da fibra de percepção de formato apesar de não ser suscetível à tensão induzida por dobra ou torção. O sinal de fase de núcleo central descreve a tensão de modo

comum sofrida por todos os núcleos da fibra. Os núcleos externos são medidos (cinza) e representados contra o núcleo central (preto) na figura 21.

[00119] Visto que os núcleos externos estão 120 graus fora de fase, a variação induzida por dobra nos sinais de fase é em média igual a zero. A figura 21, um desvio leve entre as curvas de duas fases é observado. A subtração da fase de núcleo central, uma medição direta da tensão de modo comum, deixa a fase acumulada como resultado das forças de torção. Com o escalonamento adequado, esse sinal pode ser escalonado para uma medição de cilindro de fibra designado como sinal de "torção"  $T(z)$  produzido a partir da figura 21, que é ilustrado na figura 22. A partir do sinal de torção,  $T(z)$ , a mudança na posição de rotação dos núcleos externos como resultado da torção ao longo do comprimento da fibra de percepção de formato pode ser determinada. Isso permite que um sinal de dobra seja mapeado para a direção de dobra correta.

[00120] O desejo de se compensar a torção no cálculo de formato é ilustrado pelo conjunto de dados ilustrado na figura 23. A ponta da fibra de percepção de formato foi translada em um único plano através de uma grade de cinco pontos formando um quadro de 250 nm com um ponto em seu centro com processamento de formato considerando a torção (preenchido). A correção para a torção externa não foi utilizada no processamento do conjunto de dados representado como pontos não preenchidos. Na representação, é impossível se distinguir o formato original traçado com a ponta da fibra se o cálculo de torção não for utilizado. Mesmo para translações de ponta de fibra pequenas, a torção significativa é acumulada ao longo do comprimento da fibra. Dessa forma, se essa torção não for acomodada no sensor de formato, então níveis significativos de precisão não poderão ser alcançados.

### Cálculo da Tensão Induzida por Dobra

[00121] Juntamente com a informação descrevendo a quantidade de torção aplicada à fibra de percepção de formato, uma fibra de múltiplos núcleos também permite a extração de informação de dobra em um sistema de coordenadas ortonormais. Os sinais de fase para quatro núcleos óticos da fibra de percepção de formato podem ser interpretados para fornecer duas medições de tensão diferencial ortogonal como descrito abaixo. Esses valores de tensão podem então ser utilizados para rastrear um vetor ao longo do comprimento da fibra, fornecendo, por fim, uma medida da posição e/ou formato de fibra.

[00122] Com a tensão de modo comum removida, os três sinais de fase de núcleo externo corrigidos são utilizados para extrair uma medição da dobra ao longo da fibra de percepção de formato. Devido à simetria, dois dos núcleos externos podem ser utilizados para reconstruir os sinais de tensão ao longo do comprimento da fibra. Primeiro, a derivação do sinal de fase para dois dos núcleos externos é realizada. Essa derivação é preferivelmente calculada de modo que o erro em toda a derivação não possa crescer, o quer se traduz em perda de precisão do sistema. Para operações de precisão dupla, essa não é uma preocupação. Mas, se as operações forem realizadas com uma precisão numérica limitada, então o arredondamento deve ser aplicado de modo que o valor de tudo não acumule erro (arredondamento convergente).

[00123] Considerando-se para essa explicação que a tensão possa ser projetada de forma linear. Dessa forma, a resposta de fase de um núcleo determinado é uma combinação de duas tensões ortogonais projetadas contra sua separação radial.

$$\frac{d\phi_n}{dz} = b_y(z) \sin(kz + \Delta_n) + b_x(z) \cos(kz + \Delta_n) \quad \text{Eq. 9}$$

[00124] Na equação acima,  $b_x$  e  $b_y$  são sinais de tensão ortogonal utilizados para calcular a dobra. A fase,  $\phi_n$ , representa a resposta de

fase de um núcleo,  $z$  é a distância axial ao longo da fibra,  $k$  é a taxa de rotação do hélice, e delta  $\Delta$  representa a posição radial do núcleo (120 graus de separação).

[00125] A resposta de fase de dois dos núcleos externos é:

$$\frac{d\phi_1}{dz} = b_y(z) \sin(kz + \Delta_1) + b_x(z) \cos(kz + \Delta_1) \quad \text{Eq. 10}$$

$$\frac{d\phi_2}{dz} = b_y(z) \sin(kz + \Delta_2) + b_x(z) \cos(kz + \Delta_2) \quad \text{Eq. 11}$$

[00126] Solucionando-se  $b_x$  e  $b_y$ :

$$b_y(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_1 - \Delta_2)} \left[ \frac{d\phi_1}{dz} \cos(kz + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \cos(kz + \Delta_1) \right] \quad \text{Eq. 12}$$

$$b_x(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_2 - \Delta_1)} \left[ \frac{d\phi_1}{dz} \sin(kz + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \sin(kz + \Delta_1) \right] \quad \text{Eq. 13}$$

[00127] Nas equações 12 e 13 acima,  $k$ , a taxa de rotação, é considerada constante ao longo do comprimento da fibra. A derivação acima permanece válida se os termos de correção forem adicionados à taxa de rotação. Especificamente, a oscilação medida  $W(z)$  e os sinais de torção  $T(z)$  são incluídos para compensar a variação de rotação dos núcleos externos ao longo do comprimento da fibra. As expressões (12) e (13) acima então se tornam o seguinte:

$$b_y(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_1 - \Delta_2)} \left[ \frac{d\phi_1}{dz} \cos(kz + T(z) + W(z) + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \cos(kz + T(z) + W(z) + \Delta_1) \right] \quad \text{Eq. 14}$$

$$b_x(z) = \frac{1}{\sin(\Delta_1 - \Delta_2)} \left[ \frac{d\phi_1}{dz} \sin(kz + T(z) + W(z) + \Delta_2) + \frac{d\phi_2}{dz} \sin(kz + T(z) + W(z) + \Delta_1) \right] \quad \text{Eq. 15}$$

### Cálculo do Formato a Partir de Sinais de Tensão Diferenciais Ortogonais

[00128] As equações (14) e (15) produzem dois sinais de tensão ortogonais diferenciais. A figura 24 apresenta as curvas de tensão ortogonais para uma fibra localizada em várias dobras que ocorrem todas no mesmo plano. Esses dois sinais de tensão ortogonais diferenciais são processados para realizar a integração final ao longo do comprimento da fibra de percepção de formato para produzir três

sinais Cartesianos representando a posição e/ou o formato da fibra.

[00129] A figura 25 ilustra um fluxograma descrevendo etapas ilustrativas não limitadoras para o cálculo de formato a partir de tensão. Os sinais de tensão ortonormais A e B são determinados de acordo com as equações 14 e 15.

[00130] Os dados adquiridos na rede de aquisição de dados são preferivelmente armazenados em conjuntos discretos na memória de computador. Para se fazer isso, uma mudança na representação a partir da representação contínua na equação 15 para uma representação discreta com base no índice é necessária nesse ponto. Adicionalmente, a dobra em cada ponto no conjunto pode ser convertida em uma rotação angular visto que o comprimento do segmento ( $\Delta z$ ) é fixado e finito utilizando-se a equação (1). O parâmetro,  $a$ , é determinado pela distância dos núcleos a partir do centro da fibra e o coeficiente de tensão ótica que é uma constante de proporcionalidade que relaciona a tensão à mudança no comprimento do caminho óptico.

$$\theta_{y,n} = a b_{y,n} \Delta z \quad \text{Eq. 16}$$

$$\theta_{x,n} = a b_{x,n} \Delta z \quad \text{Eq. 17}$$

[00131] Essas medições de rotação  $\theta$  devido à dobra local na fibra podem ser utilizadas para formar uma matriz de rotação nas três dimensões. Se se imaginar o começo com a fibra alinhada com o eixo geométrico  $z$ , os dois componentes de dobra giram o vetor representando o primeiro segmento da fibra por essas duas pequenas rotações. Matematicamente, isso é feito utilizando uma multiplicação de matriz. Para rotações pequenas, a matriz de rotação simplificada ilustrada na equação (18) abaixo pode ser utilizada.



$$\overline{\overline{R}}_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \theta_{x,n} \\ 0 & 1 & \theta_{y,n} \\ -\theta_{x,n} & \theta_{y,n} & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 18}$$

[00132] A matriz de rotação acima é válida se  $\theta_x \ll 1$ . Se a resolução do sistema for da ordem de micrometros, essa é uma condição que não é difícil de manter. Depois da rotação, o segmento de fibra terá um novo ponto final e uma nova direção. Todas as dobras adicionais são medidas a partir dessa nova direção. Portanto, a direção (ou vetor) em qualquer posição na fibra depende de todas as direções entre essa localização na fibra e a localização inicial. O vetor de direção em qualquer ponto da fibra pode ser solucionado em um processo iterativo rastreando o sistema de coordenadas rotativo ao longo do comprimento da fibra como observado na seguinte expressão:

$$\overline{\overline{C}}_{n+1} = \overline{\overline{C}}_n \overline{\overline{R}}_n \quad \text{Eq. 19}$$

[00133] Em outras palavras, cada segmento ao longo da fibra introduz uma pequena rotação proporcional ao tamanho e direção da dobra ao longo desse segmento. O cálculo iterativo pode ser escrito com anotação matemática abaixo:

$$\overline{\overline{C}}_p = \overline{\overline{C}}_0 \prod_{n=0}^p \overline{\overline{R}}_n \quad \text{Eq. 20}$$

[00134] Aqui novamente, para rotações pequenas e rotações quase planas, os ângulos são efetivamente somados, e pela manutenção de uma medição precisa de toda a tensão (a mudança de comprimento) por todo o comprimento da fibra de sensor de formato, uma melhor precisão é alcançada do que possível se utilizando a tensão apenas. A matriz calculada acima contém informação sobre a orientação local dos núcleos, o que permite que as rotações adequadas sejam aplicadas. Se o interesse primário estiver na determinação da posição

ao longo da fibra, então apenas o vetor local que descreve a direção da fibra nesse local é necessário. Esse vetor apontador pode ser encontrado por uma operação simples de produto pontual.

$$P = \bar{C} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Eq. 21}$$

[00135] Se cada um desses vetores for colocado de ponta a ponta, como ilustrado na figura 26, uma medição precisa do formato resulta. Dessa forma, a posição e/ou direção em qualquer ponto ao longo do comprimento de fibra pode ser encontrada pela soma de todos os vetores anteriores, escalonados para a resolução do sistema:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_p = \Delta d \sum_{p=0}^q \left\{ \left\{ \bar{C}_0 \prod_{n=0}^p \bar{R}_n \right\} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \quad \text{Eq. 22}$$

[00136] Um exemplo não limitador de um sistema de percepção de formato é descrito em conjunto com a figura 27. Outras implementações e/ou componentes podem ser utilizados. Ademais, nem todo componente ilustrado é necessariamente essencial. O Controlador de Sistema e processador de dados (A) inicia duas varreduras consecutivas de um laser ajustável (B) através de uma faixa de comprimento de onda definida e taxa de ajuste. A luz emitida a partir do laser ajustável é direcionada para duas redes óticas através de um acoplador ótico (C). A primeira dessas duas redes óticas é uma Rede de Monitor de Laser (E) enquanto a segunda é designada com uma Rede de Interrogador (D). Dentro da Rede de Monitor de Laser (E), a luz é dividida através de um acoplador ótico (F) e enviada para uma referência de célula de gás (por exemplo, Cianeto de Hidrogênio) (G) utilizada para a medição do comprimento de onda de Banda C. O espectro de célula a gás é adquirido por um detector de fotodiodo (L) conectado a uma Rede de Aquisição de Dados (U).

[00137] A parte restante da luz dividida no acoplador ótico (F) é

direcionada para um interferômetro construído a partir de um acoplador ótico (H) fixado a dois Espelhos Rotativos Faraday (I, J). O primeiro Espelho Rotativo Faraday (FRMs) (I) serve como o braço de referência do interferômetro, enquanto o segundo Espelho Rotativo Faraday (J) é distanciado por um carretel de retardo (K) de fibra ótica. Esse interferômetro produz um sinal de monitor que é utilizado para corrigir a não linearidade do ajuste de laser e é adquirido pela Rede de Aquisição de Dados (U) através de um detector de fotodiodo (M).

[00138] A luz direcionada para a Rede de Interrogador (D) pelo acoplador ótico (C) entra no controlador de polarização (N) que gira a luz de laser para um estado ortogonal entre as duas digitalizações de laser sucessivas. Essa luz é então dividida através de uma série de acopladores óticos (O) de forma homogênea entre quatro interferômetros de aquisição (P, Q, R, S). Dentro do interferômetro de aquisição para o núcleo central, a luz é dividida entre um percurso de referência e um percurso de medição por um acoplador ótico (AA). A luz de laser de "sonda" do acoplador AA passa através de um circulador ótico (T) e entra em um núcleo central de uma fibra de percepção de formato (W) através de um fio de núcleo central de um fanout de múltiplos núcleos (V) para a fibra de sensor de formato (W). A fibra de sensor de formato (W) contém um núcleo ótico central concêntrico com três núcleos óticos externos helicoidalmente enrolados. A seção transversal da fibra (X) mostra que os núcleos externos (Z) são igualmente espaçados, concêntricos e separados por uma distância radial determinada a partir do núcleo central (Y). O espalhamento posterior Rayleigh resultante do núcleo ótico central (Y) como consequência de uma digitalização a laser passa através do circulador ótico (T) e interfere com a luz de percurso de referência do interferômetro de aquisição quando recombinada no acoplador ótico (BB).

[00139] O padrão de interferência passa através de um divisor de feixe de polarização ótica (DD) separando o sinal de interferência em dois estados de polarização principais ( $S_1, \dots$ ). Cada um dos dois estados de polarização é adquirido pela Rede de Aquisição de Dados (U) utilizando dois detectores de fotodiodo (EE, FF). Um rotator de polarização (CC) pode ser ajustado para equilibrar os sinais nos detectores de fotodiodo. Os núcleos óticos externos da fibra de percepção de formato são medidos de uma forma similar utilizando interferômetros de aquisição correspondentes (Q, R, S). O Controlador de Sistema e Processador de Dados (A) interpreta os sinais de quatro núcleos óticos individuais e produz uma medição de ambas a posição e orientação ao longo do comprimento da fibra de percepção de formato (W). Os dados são então exportados a partir do Controlador de Sistema (A) para exibição e/ou utilização (GG).

#### Correções de Birrefringência

[00140] Quando uma fibra ótica é dobrada, a simetria circular do núcleo é quebrada e um plano "vertical" ou "horizontal" preferencial é criado pela distinção entre as direções no plano da dobra e perpendicular ao plano da dobra. A luz que percorre descendentemente a fibra então sofre diferentes índices de refração dependendo de seu estado de polarização. Essa mudança no índice como uma função do estado de polarização é referida como birrefringência. Isso apresenta um problema significativo para a medição de formato visto que a mudança de fase medida depende do estado de polarização incidente, e esse estado incidente não pode ser controlado na fibra padrão.

[00141] Esse problema pode ser solucionado pela medição da resposta de núcleo ótico em dois estados de polarização ortogonais. Se a resposta desses dois estados for medida adequadamente, a variação na resposta medida como uma função da polarização pode

ser eliminada ou pelo menos substancialmente reduzida. O fluxograma na figura 28 destaca um processo ilustrativo não limitador para correção de birrefringência tal como uma birrefringência intrínseca, birrefringência induzida por dobra, etc., tanto em valores medidos e de referência. O exemplo não limitador abaixo se refere à birrefringência induzida por dobra, mas é mais geralmente aplicável a qualquer birrefringência.

[00142] A primeira etapa no processo é se medir a resposta do núcleo em dois estados de polarização ortogonais chamados "s" e "p". Uma resposta s e uma resposta p são medida em cada estado de polarização resultando em quatro conjuntos. Por motivos de simplicidade, as respostas ao primeiro estado de polarização são chamadas de a e b, e as respostas ao segundo estado de polarização são chamadas de c e d, onde a e c são respostas no detector s e b e d são respostas no detector p.

[00143] A segunda etapa é calcular os dois produtos de matriz a seguir:

$$x = ad^* \quad \text{Eq. 23}$$

$$y = bc^* \quad \text{Eq. 24}$$

[00144] Uma versão filtrada de passa baixa de cada um desses sinais é calculada e é escrita como {x} e {y}. A anotação de valor esperada é utilizada aqui para indicar uma operação de filtragem de passa baixa. As fases de funções de variação relativamente lenta são utilizadas para alinhar os sinais espalhados de frequência mais alta na fase de modo que possam ser adicionados:

$$p = a + de^{i\angle(x)} \quad \text{Eq. 25}$$

$$q = b + ce^{i\angle(y)} \quad \text{Eq. 26}$$

[00145] Esse processo é então repetido para produzir um valor escalar final:

$$u = p + qe^{i\angle(pq^*)} \quad \text{Eq. 27}$$

[00146] Agora, um vetor de variação lenta pode ser criado e representa a natureza de vetor da variação descendentemente pela fibra sem componentes de espalhamento Rayleigh de banda larga, visto que esses são todos incorporados em u:

$$\bar{v} = \left[ \langle a e^{i\angle u} \rangle, \langle b e^{i\angle u} \rangle, \langle c e^{i\angle u} \rangle, \langle d e^{i\angle u} \rangle \right] \quad \text{Eq. 28}$$

[00147] A correção decorrente dos efeitos de birrefringência é então calculada utilizando-se:

$$\phi_n = \angle(\bar{v}_n \cdot \bar{v}_0^*) \quad \text{Eq. 29}$$

[00148] em que  $\phi_n$  é a correção devido aos efeitos de birrefringência e n é o índice dentro do conjunto. Aqui o vetor é ilustrado comparado com o primeiro elemento (índice 0) no conjunto, mas pode ser tão facilmente comparado com qualquer elemento selecionado arbitrariamente no conjunto de vetor.

[00149] A correção de birrefringência compensa a birrefringência como resultado da assimetria de núcleo durante a fabricação e para raios de dobra acima de 100 mm. À medida que a fibra de percepção de formato é colocada em dobras justas quando os raios são inferiores a 100 mm, um efeito de birrefringência de segunda ordem se torna significativo.

[00150] Assumindo-se que níveis significativos de tensão se manifestem apenas na direção paralela ao núcleo central da fibra de percepção de formato de múltiplos núcleos, considera-se o diagrama na figura 29. À medida que a fibra é dobrada, a tensão é medida na região entre  $0 < X \leq r$  enquanto a tensão de compressão é medida na região  $-r \leq X < 0$ . A expansão da região de dobra externa exerce uma força lateral aumentando a pressão interna da fibra. À medida que a pressão interna da fibra aumenta, um termo de tensão de segunda ordem se torna significativa,  $\epsilon_x$ . Como ilustrado no segundo parágrafo,

esse termo de tensão de pressão é um máximo ao longo do eixo geométrico central da fibra e cai na direção das bordas externas da fibra como o quadrado da distância. Em dobras justas, esse termo de tensão de pressão pode modificar o índice de reação da fibra resultando em uma birrefringência mensurável. Adicionalmente, os núcleos helicoidais periféricos externos sofrem uma resposta sinusoidal a essa tensão induzida por pressão enquanto o núcleo central resposta ao máximo.

[00151] A figura 30 ilustra duas representações de fase produzidas a partir de um circuito de fibra de diâmetro de 40 mm. Oscilações nesses sinais são um resultado do conjunto de múltiplos núcleos estarem fora do centro da fibra. Em dobras mais justas, os sinais de tensão são altos o suficiente para validar uma resposta desse desvio sutil da concentricidade. A representação ilustra que a média dos núcleos externos helicoidais acumula significativamente menos fase na região da dobra quando comparado com o núcleo central. Essa deficiência de fase serve como evidencia para birrefringência induzida por dobra. Lembre-se que o cálculo de torção extrínseca é realizado encontrando-se a diferença de fase absoluta entre o núcleo central e a média dos três núcleos externos. O gráfico na figura 30 ilustra que um sinal de torção falso será medido na região da dobra.

[00152] A resposta de fase medida de um núcleo externo indica sua posição com relação ao perfil de tensão induzido por pressão,  $\epsilon_x$ . Portanto, o quadro de uma resposta de tensão de núcleo externo fornece uma medição de ambas a localização e magnitude com relação ao campo de pressão. Essa resposta pode ser escalonada e utilizada como uma correção dos núcleos externos para combinar o nível de  $\epsilon_x$  percebido pelo núcleo central, corrigindo, assim, a falsa torção.

$$\phi_{ncorr} = \phi_n - k \int \left[ \left( \frac{d\phi_n}{dz} - \frac{\sum_{i=0}^N \frac{d\phi_n}{dz}}{N} \right)^2 \right] dz \quad Eq. 30$$

[00153]  $\phi_n$  é a resposta de fase em um núcleo externo, N é o número de núcleos externos, e k serve como um fator de escalonamento. A figura 31 ilustra a resposta à tensão de um núcleo externo para um circuito de fibra de diâmetro de 400 mm, com a tensão de modo comum subtraída. A partir desse sinal de resposta à tensão uma correção para a birrefringência induzida por dobra pode ser aproximada como observado no gráfico ilustrado na figura 32.

[00154] A aplicação dessa correção possui um impacto significativo na torção medida na região da dobra como ilustrado na figura 33. Comparando o sinal de torção com e sem a correção de segunda ordem revela que um erro de 25 graus é acumulado na região de dobra sem a correção de birrefringência de segunda ordem nesse exemplo.

#### Aplicação de Correções de Birrefringência e Impacto na Precisão

[00155] A seguir são descritos os efeitos de polarização na precisão de um sistema de percepção de formato. Para se alcançar uma polarização de entrada variável entre as medições, um controlador de polarização de circuito é adicionado entre a fibra de percepção de formato e o sistema de percepção de formato como ilustrado na figura 34.

[00156] Para se ilustrar o impacto das correções descritas acima na precisão do sistema, considere-se o sinal no plano para um formato relativamente simples como ilustrado na figura 35, onde 1,4 metros de fibra de percepção de formato são direcionados através de uma única volta de 180 graus com um raio de dobra de 50 mm. A figura 36 ilustra medições fora do plano para três medições sucessivas. Entre cada medição, a polarização varia utilizando-se o controlador de polarização da figura 34.



[00157] Se a birrefringência não for considerada, uma perda significativa na precisão é observada. Uma resposta grande é observada no sinal fora do plano à medida que o estado de polarização varia. A fibra recolhe um erro angular apenas na região da dobra como resultado da medição do sistema de um sinal de torção errôneo. Dessa forma, quando saindo dessa dobra, existe um erro significativo na direção da fibra. A previsão da resposta de polarização da fibra é um problema difícil, e nem todo núcleo responde ao mesmo ponto a uma dobra determinada. A figura 37 ilustra esse ponto ilustrando as correções de birrefringência para os núcleos. No entanto, as mesmas duas medições para o núcleo central possuem uma variação significativa em suas respostas de fase como observado na figura 38. Duas medições sucessivas respondem diferentemente à polarização de entrada fornecendo evidência para a birrefringência na fibra de percepção de formato.

[00158] A ativação de uma correção para birrefringência aperfeiçoa a precisão do sistema como observado na figura 39. A variação entre as medições de formato à medida que o estado de polarização de entrada varia é minimizada o que aumenta em muito a precisão do sistema. No entanto, um erro significativo na precisão do sistema ainda é observado. Se a correção de segunda ordem com base na birrefringência induzida por dobra também for realizada, existe um aperfeiçoamento adicional do sistema como ilustrado na figura 40. A precisão do sinal fora de fase é drasticamente aperfeiçoada.

[00159] Apesar de várias modalidades terem sido ilustradas e descritas em detalhes, as reivindicações não estão limitadas a qualquer modalidade em particular ou exemplo. Nada apresentado na descrição acima deve ser lido como implicando que qualquer elemento em particular, etapa, faixa ou função seja, essencial de modo que deva ser incluído no escopo das reivindicações. O escopo da matéria

patenteada é definido apenas pelas reivindicações. A extensão da proteção legal é definida pelos termos recitados nas reivindicações permitidas e suas equivalências. Todas as equivalências estruturais e funcionais aos elementos da modalidade preferida descrita acima que são conhecidos dos versados na técnica são expressamente incorporadas aqui por referência e devem ser englobadas pelas presentes reivindicações. Ademais, não é necessário que um dispositivo ou método solucione todo e qualquer problema que busca solução pela presente invenção, para que seja englobado pelas presentes reivindicações. Nenhuma reivindicação deve invocar o parágrafo 6 de 35 U.S.C. § 112 a menos que os termos "meios para" ou "etapa para" sejam utilizados. Adicionalmente, nenhuma modalidade, característica, componente ou etapa nesse relatório deve ser dedicado ao público a menos que a modalidade, característica, componente ou etapa seja recitado nas reivindicações.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método de medição para uma fibra de múltiplos núcleos (1), **caracterizado pelo fato de que** compreende:

para cada núcleo de pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos núcleos (1), determinar uma mudança total no comprimento ótico até um ponto na fibra de múltiplos núcleos (1), a mudança total no comprimento ótico incluindo uma acumulação de todas as mudanças no comprimento ótico naquele núcleo (2, 3, 4, 5) até o ponto na fibra de múltiplos núcleos (1); e

determinar uma localização ou uma direção apontada no ponto na fibra de múltiplos núcleos (10) com base nas mudanças totais no comprimento ótico.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** determinar as mudanças totais em comprimento ótico inclui, para cada núcleo de pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5):

detectar uma resposta de fase de um sinal de luz refletido no núcleo (2, 3, 4, 5), em que a tensão na fibra de múltiplos núcleos (1) causa uma mudança na resposta de fase do sinal de luz refletido.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende, para cada núcleos dos pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5), monitorar a resposta de fase continuamente ao longo do comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos (1).

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende:

determinar um parâmetro de torção associado com a fibra de múltiplos núcleos (1) no ponto na fibra de múltiplos núcleos (1) com base nas mudanças totais no comprimento ótico para cada um dos pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) da fibra de múltiplos núcleos (1).

5. Método, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado**

**pelo fato de que** determinar a localização ou da direção de apontamento no ponto na fibra de múltiplos núcleos (1) é baseada no parâmetro de torção determinado.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a fibra de múltiplos núcleos (1) é enrolada helicoidalmente e é determinada por uma taxa de rotação nominal, o método ainda compreendendo:

determinar uma variação na taxa de rotação nominal no ponto ao longo da fibra de múltiplos núcleos (1); e

corrigir a variação na taxa de rotação nominal.

7. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** determinar a mudança total no comprimento ótico até um ponto na fibra de múltiplos núcleos (1) compreende:

transmitir luz com pelo menos dois estados de polarização que são nominalmente ortogonais ao longo da fibra de múltiplos núcleos (1) e medir reflexões da luz ao longo da fibra de múltiplos núcleos até o ponto, e em que

determinar a localização ou da direção de apontamento no ponto da fibra de múltiplos-núcleos (1) compreende: calcular mudanças independentes de polarização no comprimento ótico em cada núcleo dos pelos menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos núcleos (1) até o ponto na fibra de múltiplos núcleos (1).

8. Método, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo fato de que** compreende ainda:

determinar as mudanças de comprimento ótico induzidas por dobra ao longo da fibra de múltiplos núcleos (1); e

compensar as mudanças de comprimento ótico induzidas por dobra quando da determinação do parâmetro de torção.

9. Aparelho para a realização de medições de uma fibra de múltiplos núcleos (1), **caracterizado pelo fato de que** compreende:

uma rede de interrogador (D) para interferir na luz refletida em pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos-núcleos (1) com a luz passando através dos respectivos percursos de referência dos respectivos interferômetros (P, Q, R, S)

uma rede de aquisição de dados (U) compreendendo detectores (EE, FF) nas saídas dos interferômetros (P, Q, R, S) para medir, para cada núcleo de pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos núcleos (1), um sinal indicativo de uma mudança total no comprimento ótico até um ponto na fibra de múltiplos núcleos (1), a mudança total no comprimento ótico incluindo uma acumulação de todas as mudanças no comprimento ótico até o ponto na fibra de múltiplos núcleos (1); e

um controlador de sistema e um processador de dados (A) para interpretar os sinais de pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos núcleos para determinar uma localização ou uma direção apontada no ponto na fibra de múltiplos núcleos (1) com base nas mudanças totais no comprimento ótico.

10. Aparelho, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de que** para cada núcleo dos pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5), o sinal é indicativo de uma resposta de fase da luz refletida no núcleo (2, 3, 4, 5), a resposta de fase sendo indicativa da mudança total no comprimento ótico, em que a tensão na fibra de múltiplos núcleos (1) causa uma mudança na fase da luz refletida.

11. Aparelho, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de que** a rede de aquisição de dados (U) é configurada para em cada núcleo dentre os pelos menos dois núcleos (2, 3, 4, 5): monitorar a resposta de fase continuamente ao longo do comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos (1).

12. Aparelho, de acordo com a reivindicação 10,

**caracterizado pelo fato de que** a rede de aquisição de dados (U) é configurada para cada núcleo dos pelo menos dois núcleos (2, 3, 4, 5), detectar um padrão de espalhamento Rayleigh refletido na luz refletida, e em que o controlador de sistema e o processador de dados (A) são configurados para cada núcleo dos pelo menos dois núcleos (2, 3, ,4, 5), comparar o padrão de espalhamento Rayleigh refletido com um padrão de referência de espalhamento Rayleigh refletido e determinar a resposta de fase com base na comparação.

13. Aparelho, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende:

um laser configurado para transmitir luz com pelo menos dois estados de polarização ao longo da fibra de múltiplos núcleos (1);

em que o controlador de sistema e o processador de dados (A) são configurados para interpretar os sinais em pelo menos dois estados de polarização em combinação, na determinação da localização ou da direção apontada no ponto na fibra de múltiplos núcleos (1) com base nas mudanças totais no comprimento ótico.

14. Aparelho, de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de que** os dois estados de polarização incluem um primeiro estado de polarização e um segundo estado de polarização, os primeiro e segundo estado de polarização estando pelo menos nominalmente ortogonais, em que o aparelho compreende ainda um controlador de polarização configurado para transmitir um primeiro sinal de luz no primeiro estado de polarização ao longo da fibra de múltiplos núcleos (1) e transmitir um segundo sinal de luz no segundo estado de polarização ao longo da fibra de múltiplos núcleos (1), e em que o o controlador de sistema e o processador de dados (A) são configurados para calcular uma mudança independente de polarização no comprimento ótico em cada núcleos dos pelos menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos núcleos (1) até o ponto na

fibra de múltiplos núcleos (1) utilizando reflexos dos primeiro e segundo sinais de luz.

15. Aparelho, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o controlador de sistema e o processador de dados (A) são configurados para determinar ambas a localização e a direção apontada no ponto.

16. Aparelho, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que**

um parâmetro de torção associado com a fibra de múltiplos núcleos (1) no ponto da fibra de múltiplos núcleos (1) com base nas mudanças totais no comprimento ótico da fibra de múltiplos núcleos (1);

os pelos menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) incluem três núcleos periféricos (3, 4, 5) espaçados em torno de um quarto núcleo (2), o quarto núcleo (2) sendo sozinho um centro da fibra de múltiplos núcleos (1);

a rede de aquisição de dados (U) é configurada para cada um os núcleos dos três núcleos periféricos (3, 4, 5) e o quarto núcleo (2), determinar um sinal indicativo de uma resposta de fase do sinal de luz refletido naqueles núcleos (2, 3, 4, 5), tensão na fibra de múltiplos núcleos (1) causando uma mudança na resposta de fase do sinal de luz refletido em cada um dos quatro núcleos (2, 3, 4, 5); e

o controlador de sistema e o processador de dados (A) são configurados para calcular a média das respostas de fase para os três núcleos periféricos (3, 4, 5), combinar a resposta de fase média com a resposta de fase do quarto núcleos (2) para remover uma tensão de modo comum, e determinar um parâmetro de torção associado com a fibra de múltiplos núcleos (1) no ponto da fibra de múltiplos núcleos (1) para a resposta de fase combinada.

17. Aparelho, de acordo com a reivindicação 9,

**caracterizado pelo fato de que**

a fibra de múltiplos núcleos (1) é definida por uma taxa de rotação nominal e um sinal de oscilação, o sinal de oscilação correspondente a um distanciamento angular de uma posição rotacional de um núcleo externo dos pelo menos dois núcleos a partir de uma variação linear com distância ao longo da fibra conforme esperado da taxa de rotação nominal, e

o controlador de sistema e o processador de dados (A) são ainda configurados para determinar o sinal de oscilação para a fibra de múltiplos núcleos (1) pela restrição da fibra de múltiplos núcleos (1) para uma orientação curvada em um plano e corrigir o sinal de oscilação quando se determinar a localização no ponto da fibra de múltiplos núcleos com base nas mudanças totais no comprimento ótico.

18. Meio de armazenamento não transitório armazenando instruções de programa **caracterizado pelo fato de que** quando executadas em um dispositivo de medição computadorizado faz com que o dispositivo de medição computadorizado realize medições de uma fibra de múltiplos núcleos (1), pela realização das seguintes tarefas:

para cada núcleo dos pelos menos dois núcleos (2, 3, 4, 5) na fibra de múltiplos núcleos (1) determinar uma mudança total no comprimento ótico até um ponto na fibra de múltiplos núcleos (1), a mudança total no comprimento ótico incluindo uma acumulação de todas as mudanças no comprimento ótico naquele núcleo até o ponto na fibra de múltiplos núcleos (1); e

determinar uma localização ou uma direção apontada no ponto na fibra de múltiplos núcleos (1) com base nas mudanças totais no comprimento ótico.



1/18

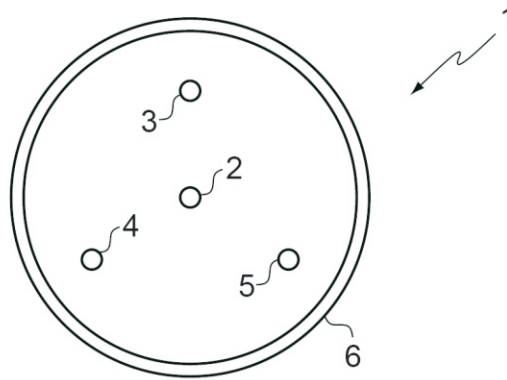


FIG. 1

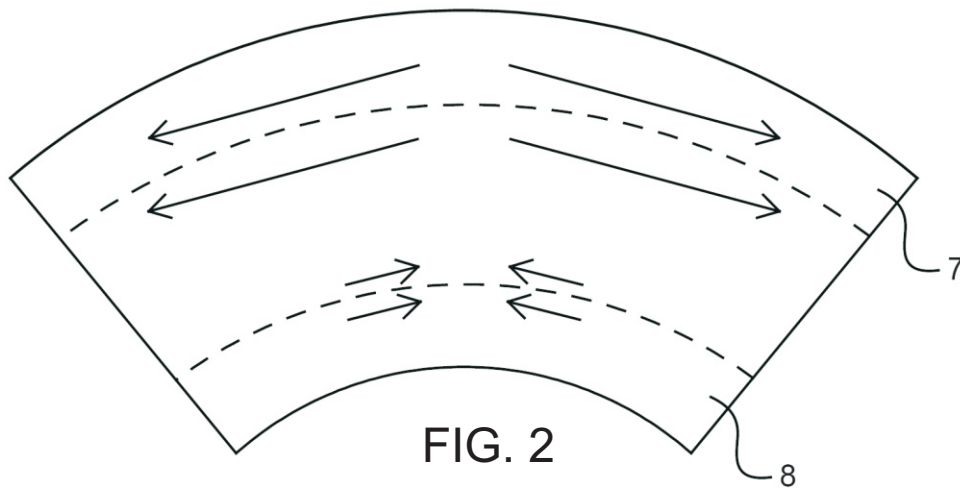


FIG. 2

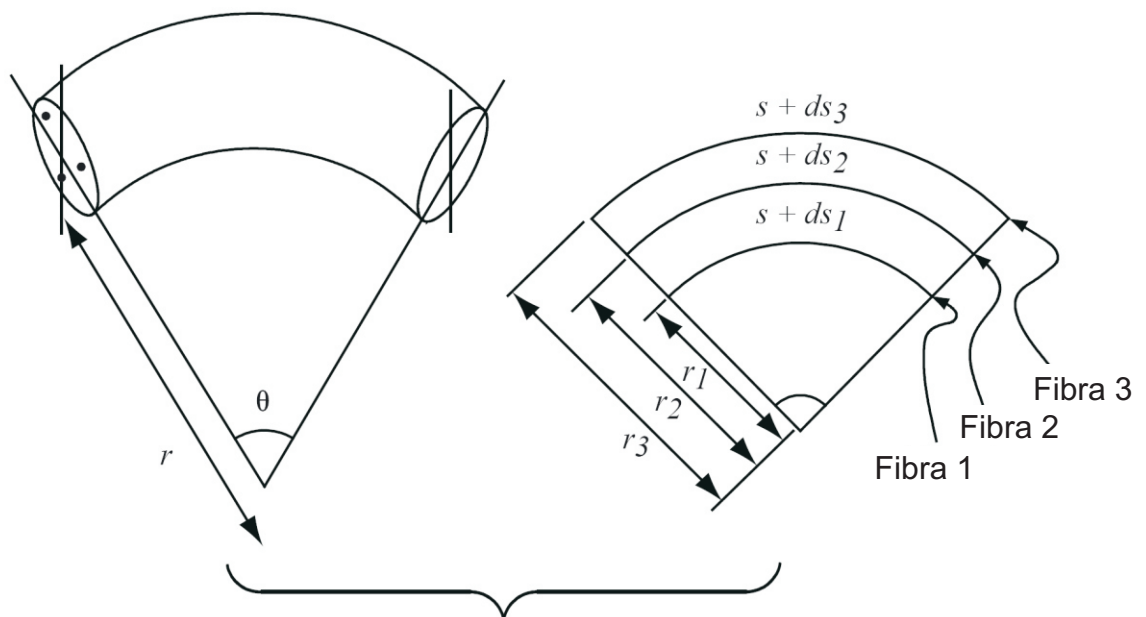
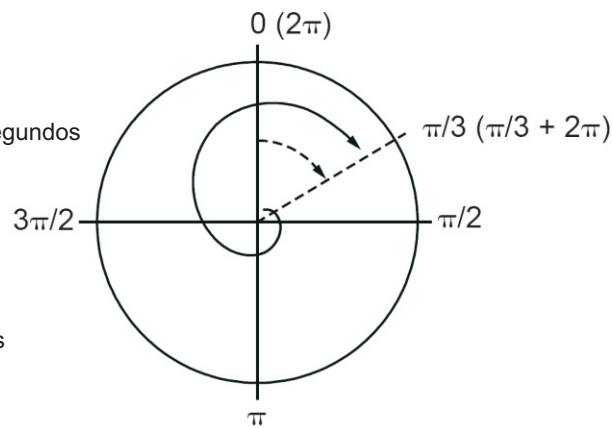
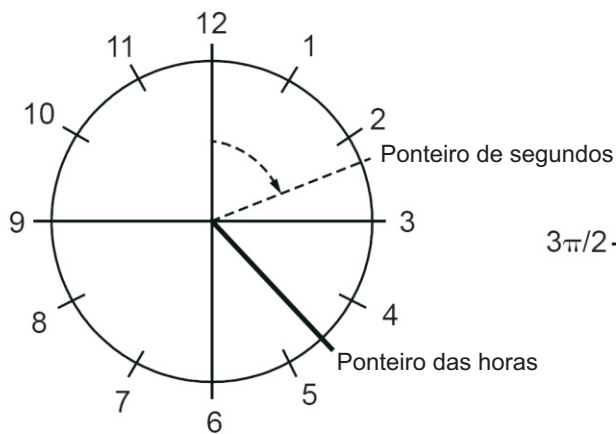
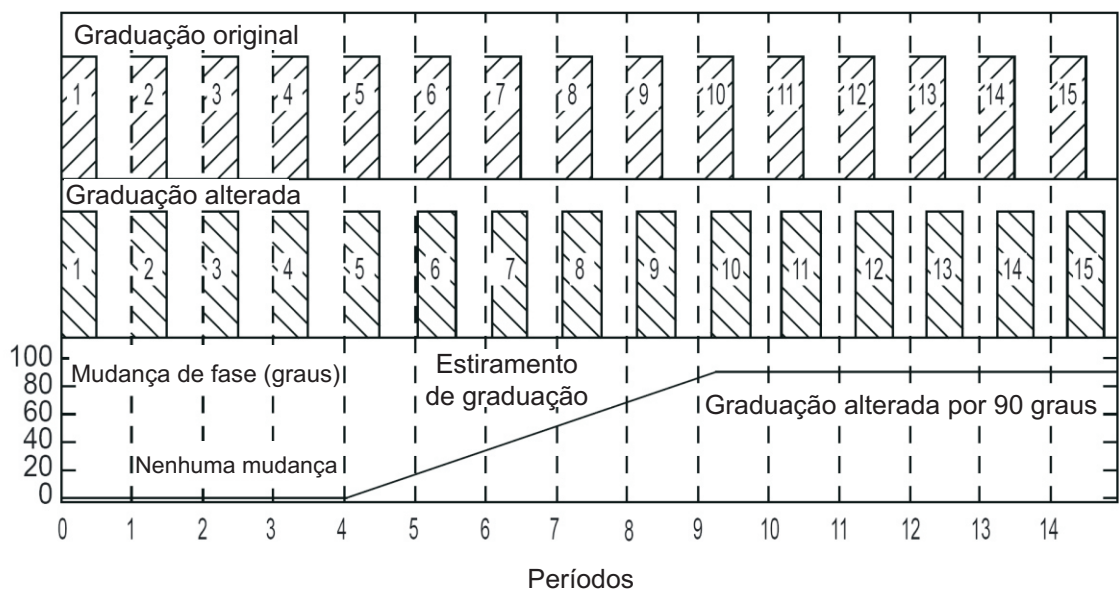
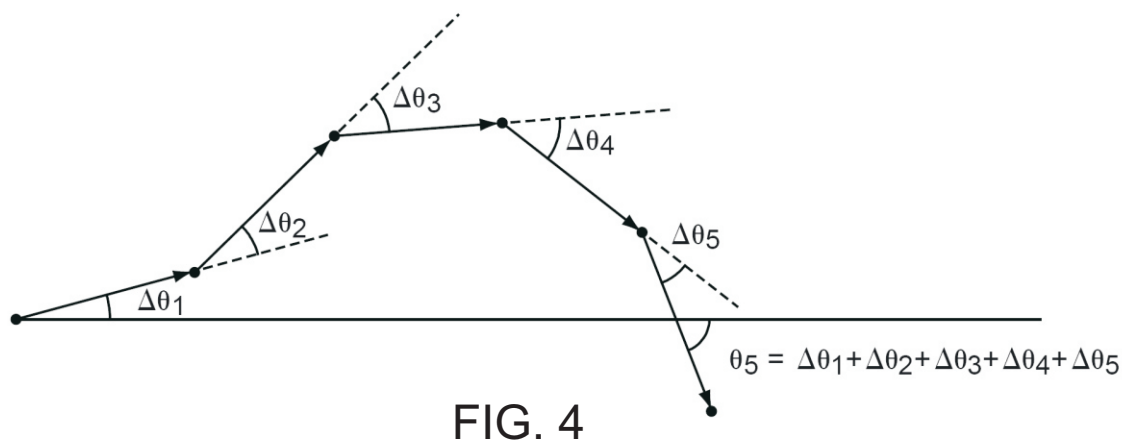


FIG. 3



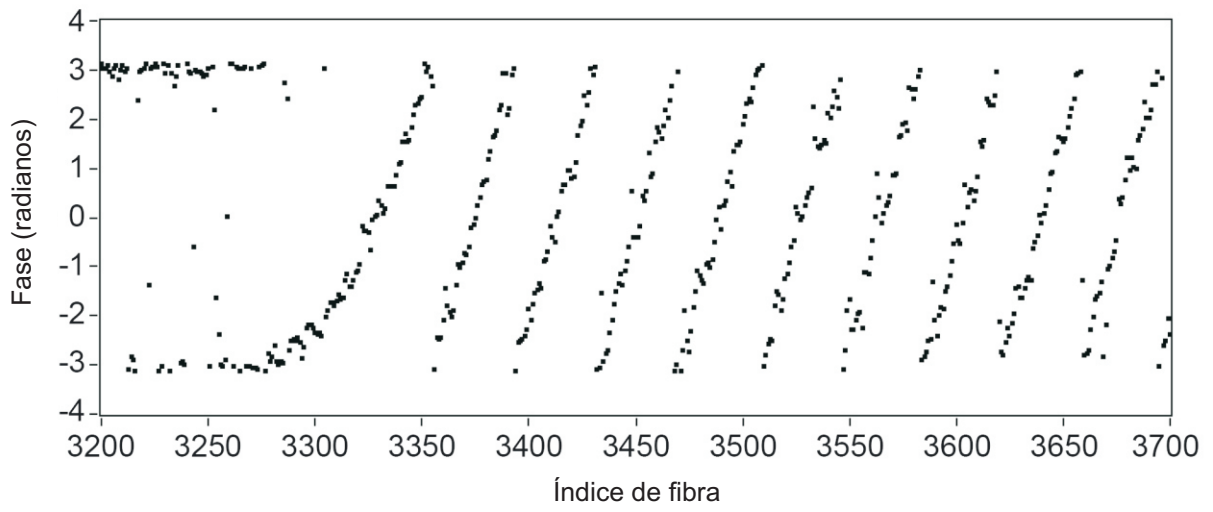


FIG. 8

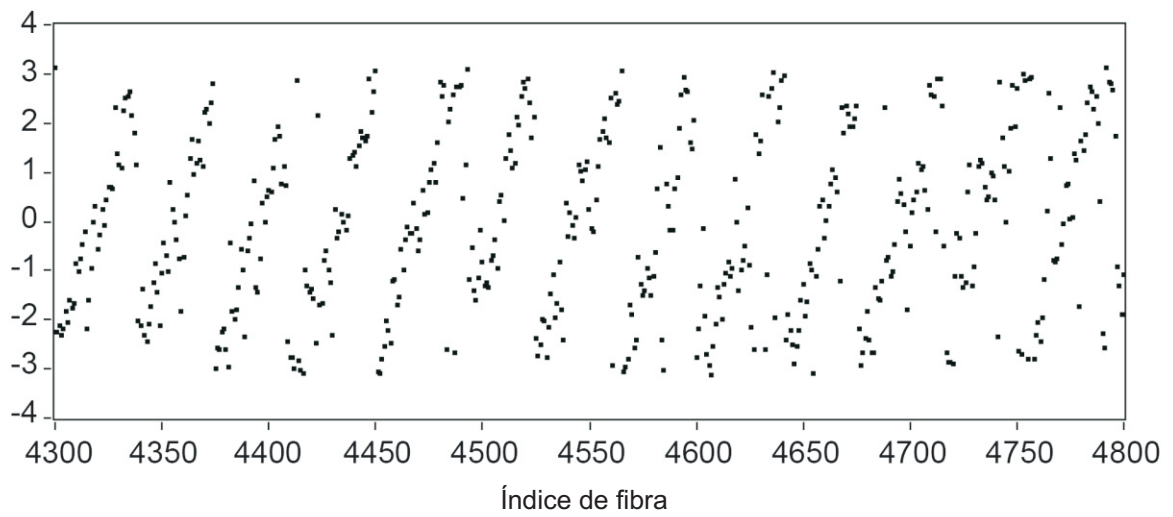


FIG. 9

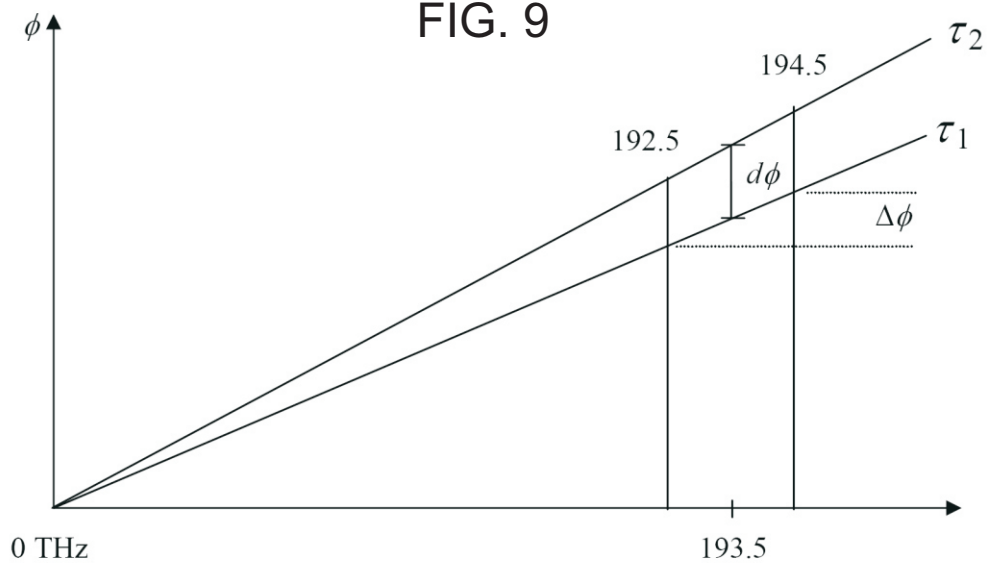


FIG. 10

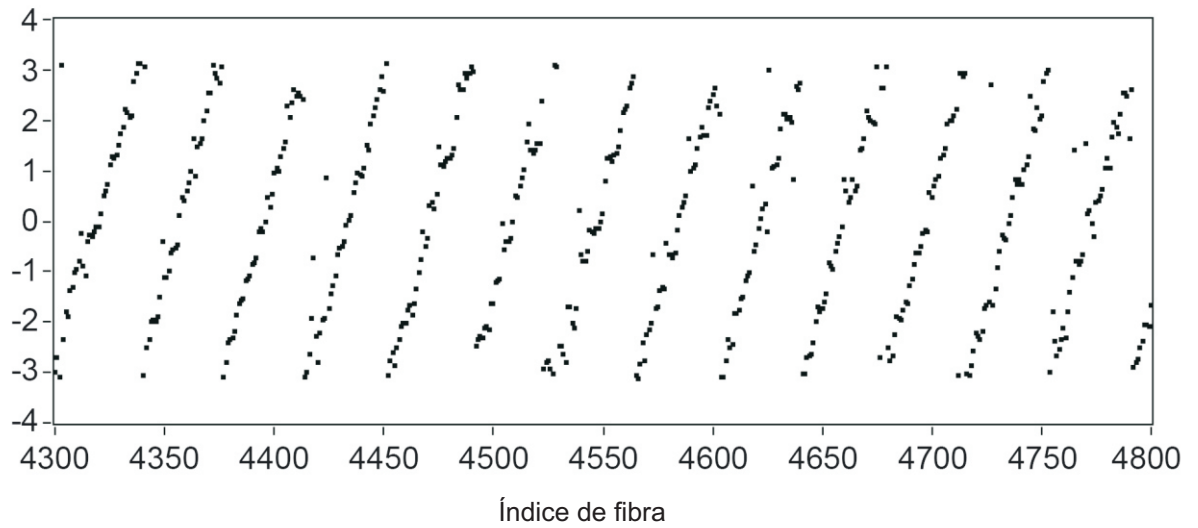


FIG. 11

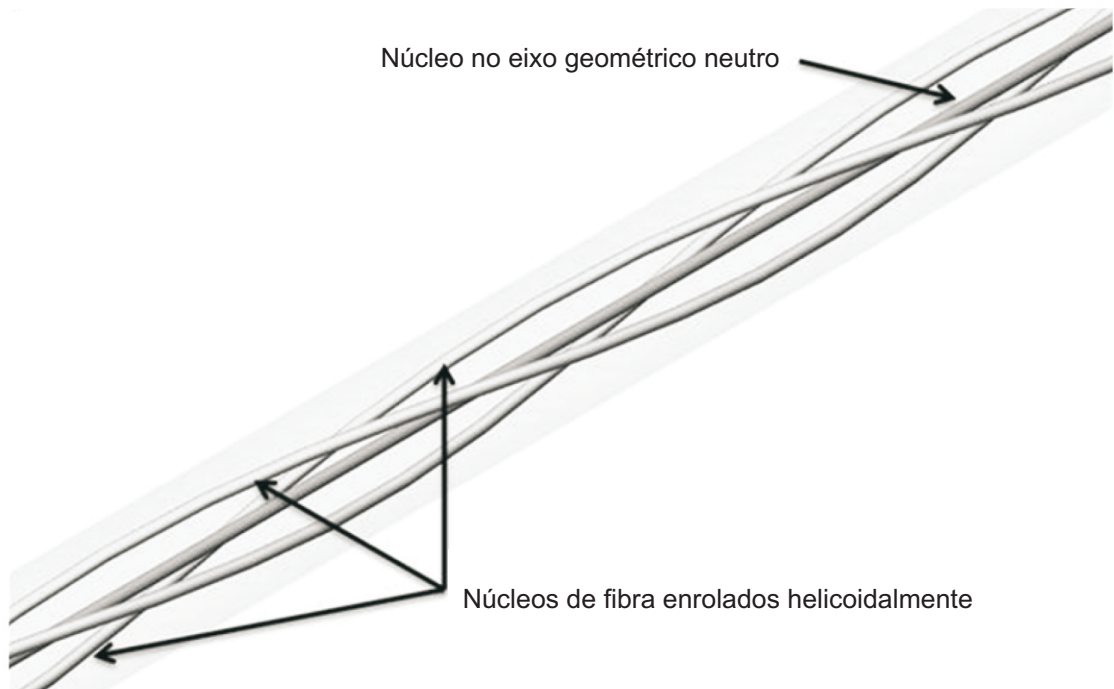


FIG. 12

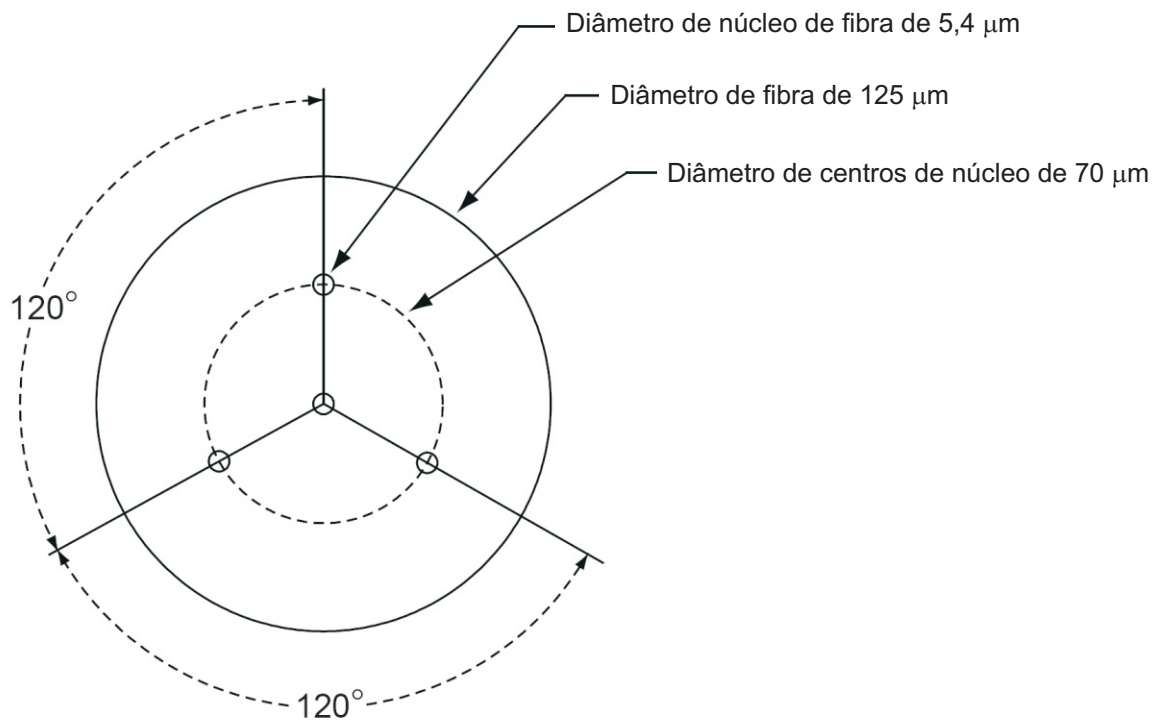


FIG. 13

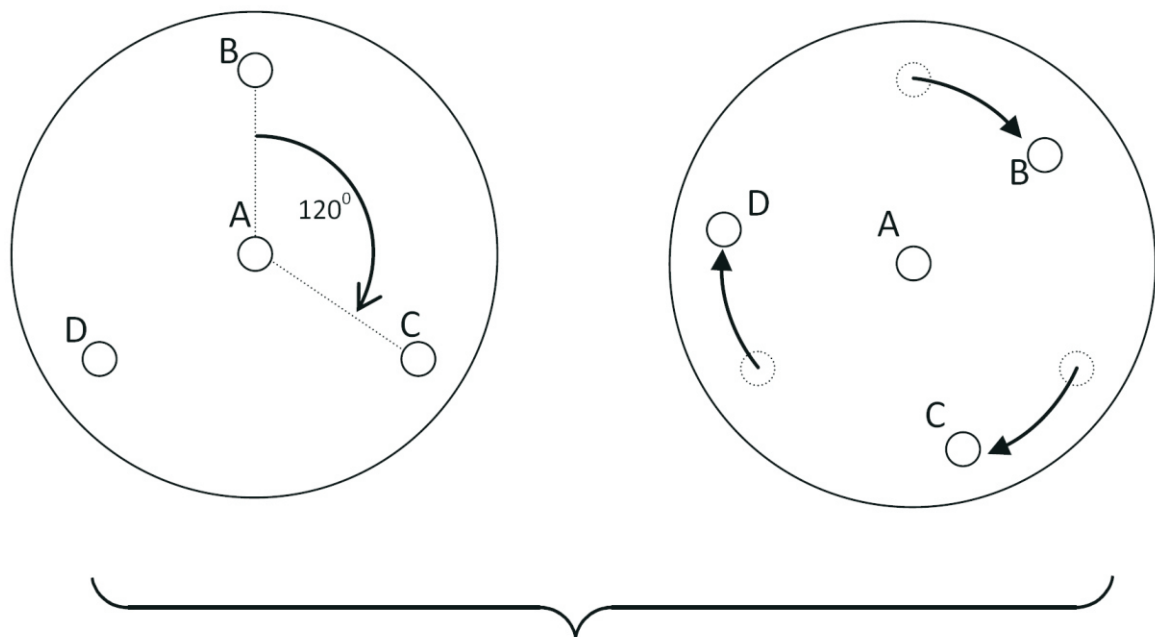


FIG. 14

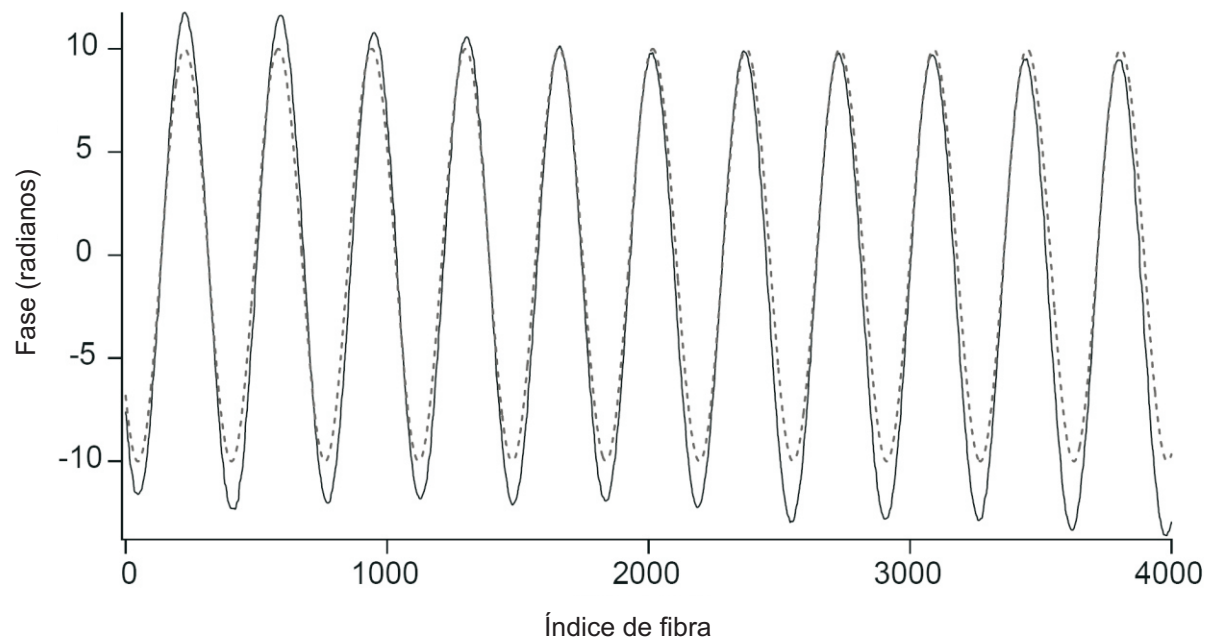


FIG. 15

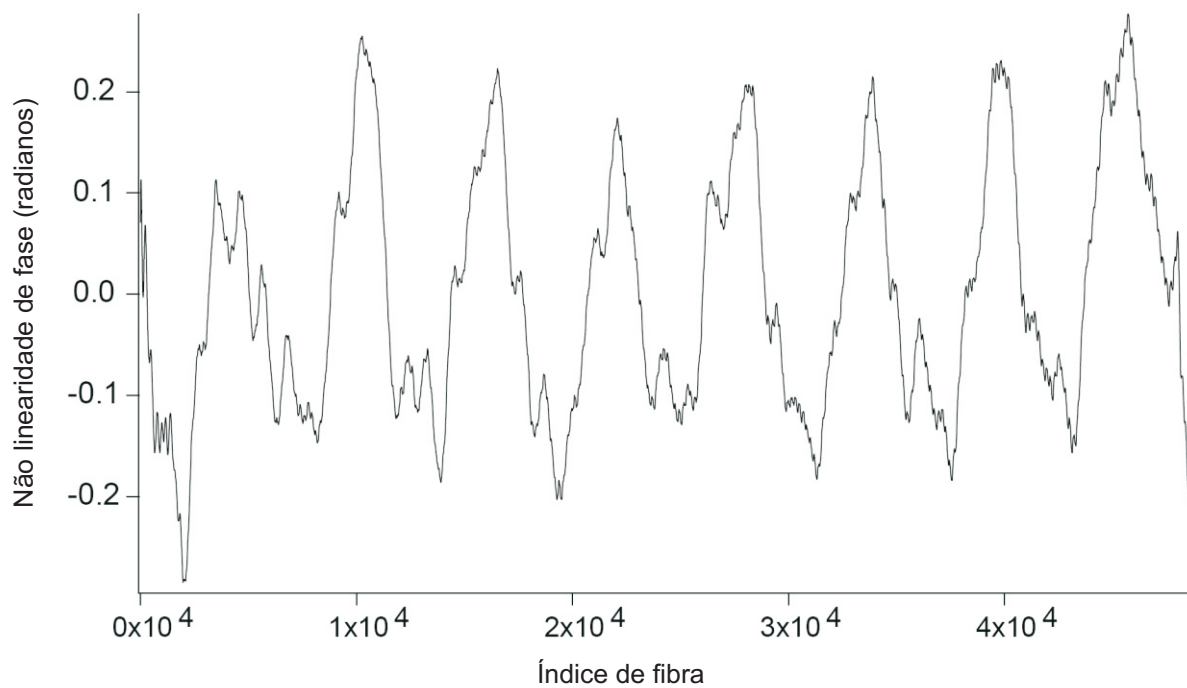


FIG. 16

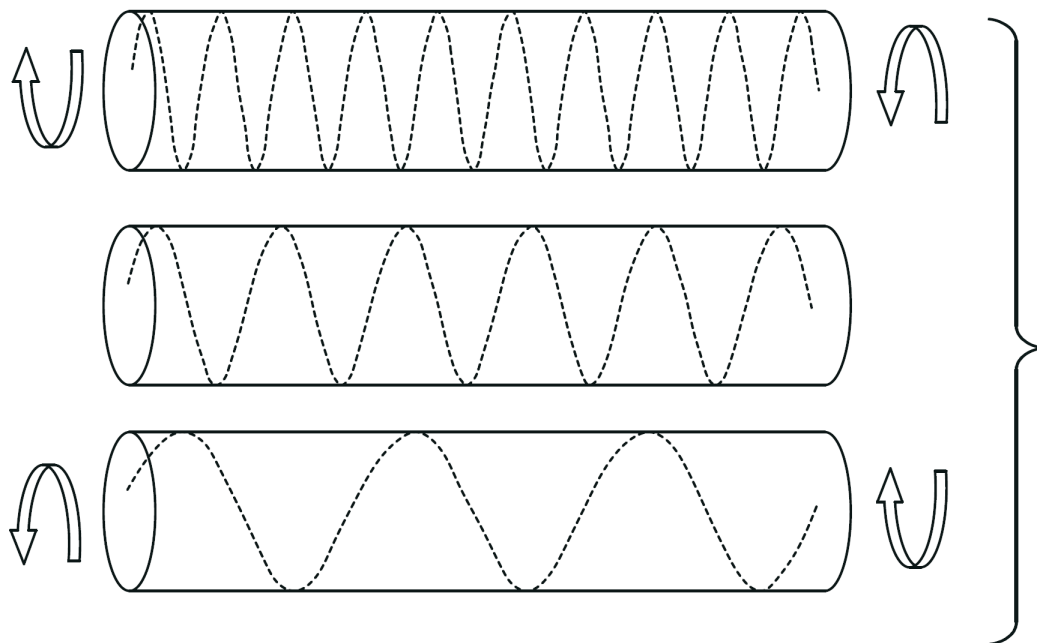


FIG. 17

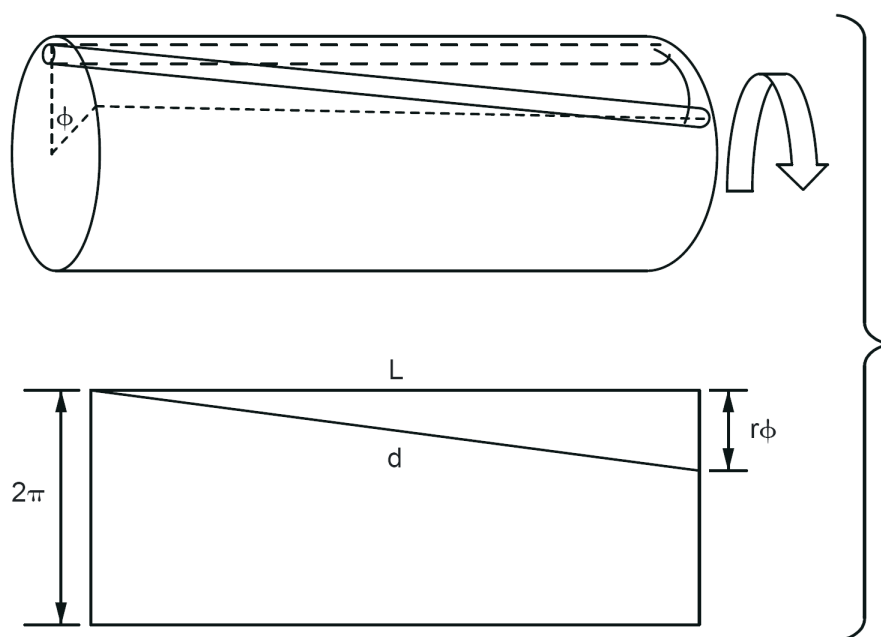


FIG. 18

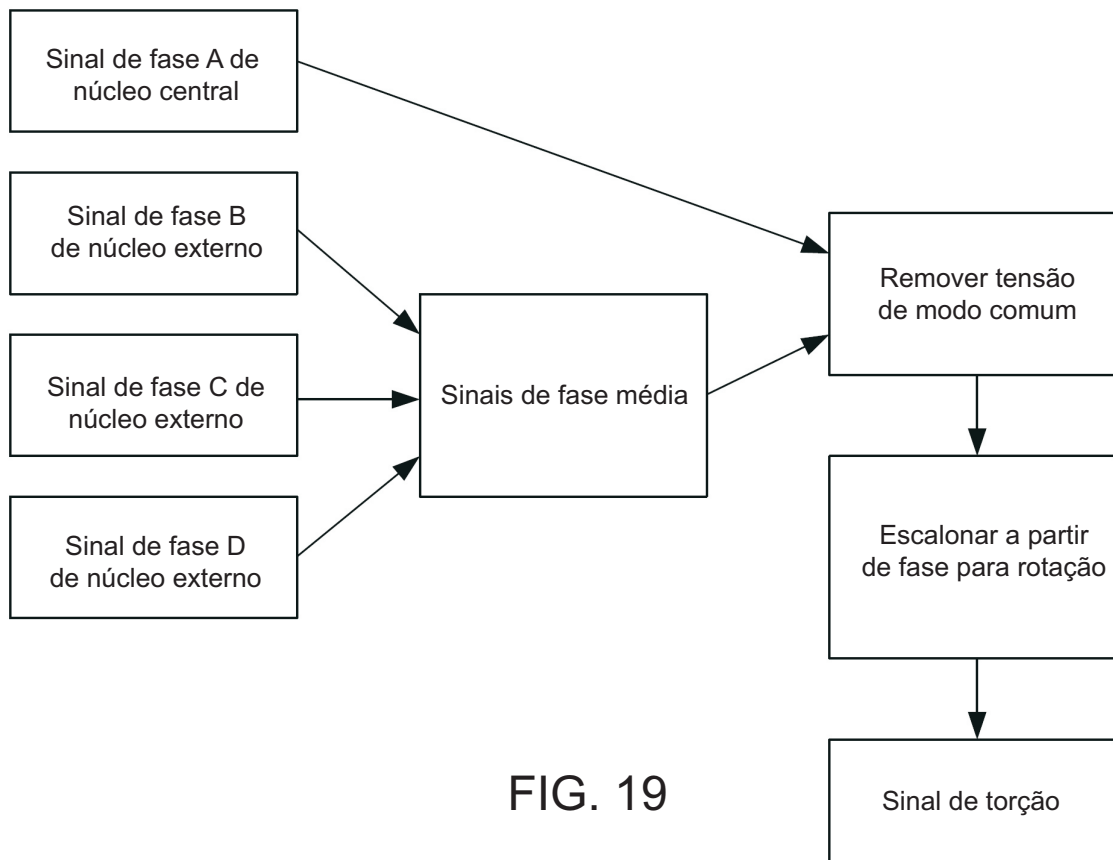


FIG. 19

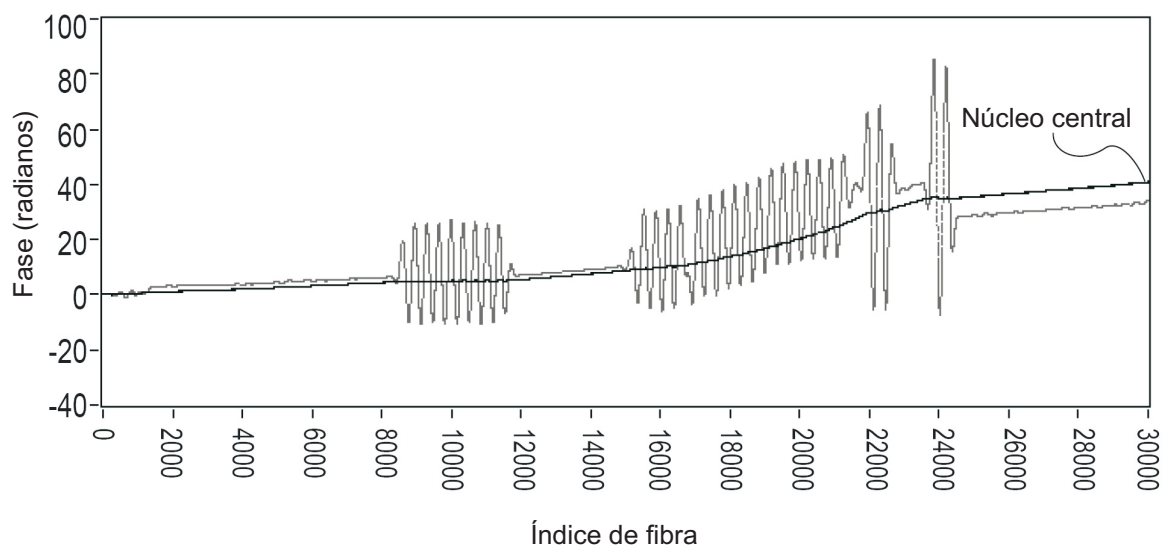


FIG. 20



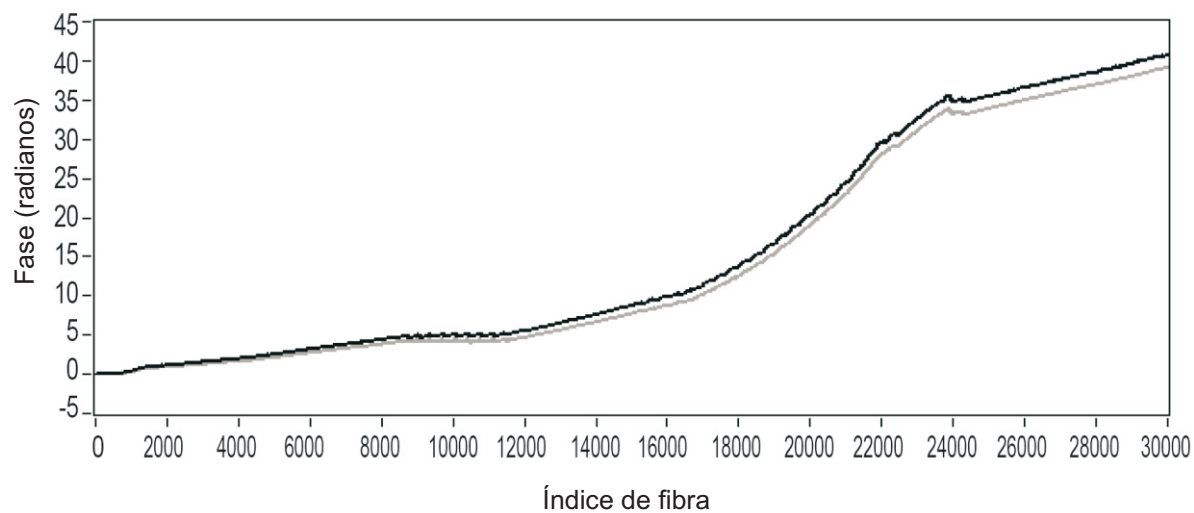


FIG. 21

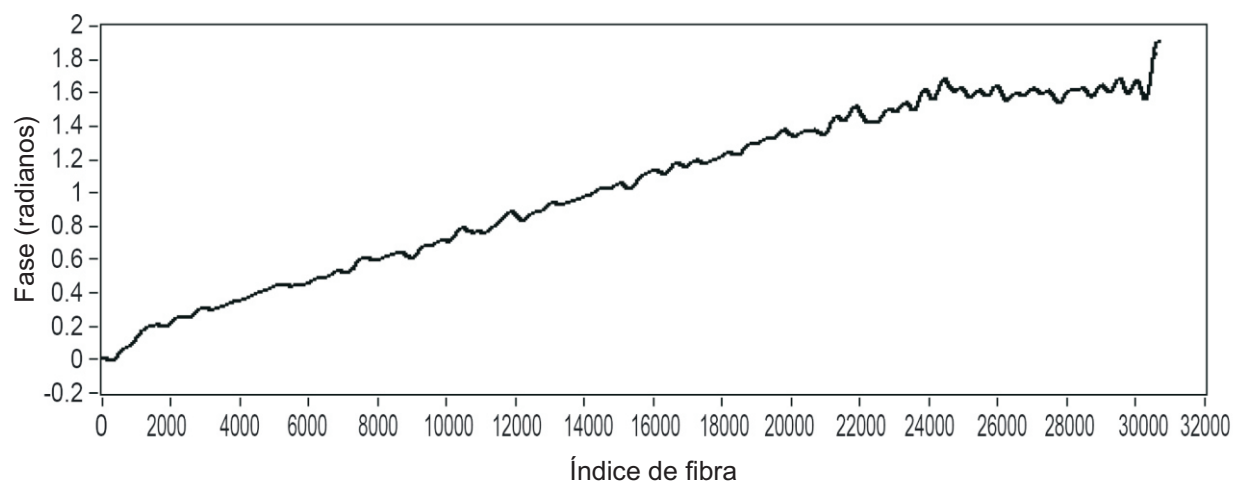


FIG. 22

10/18

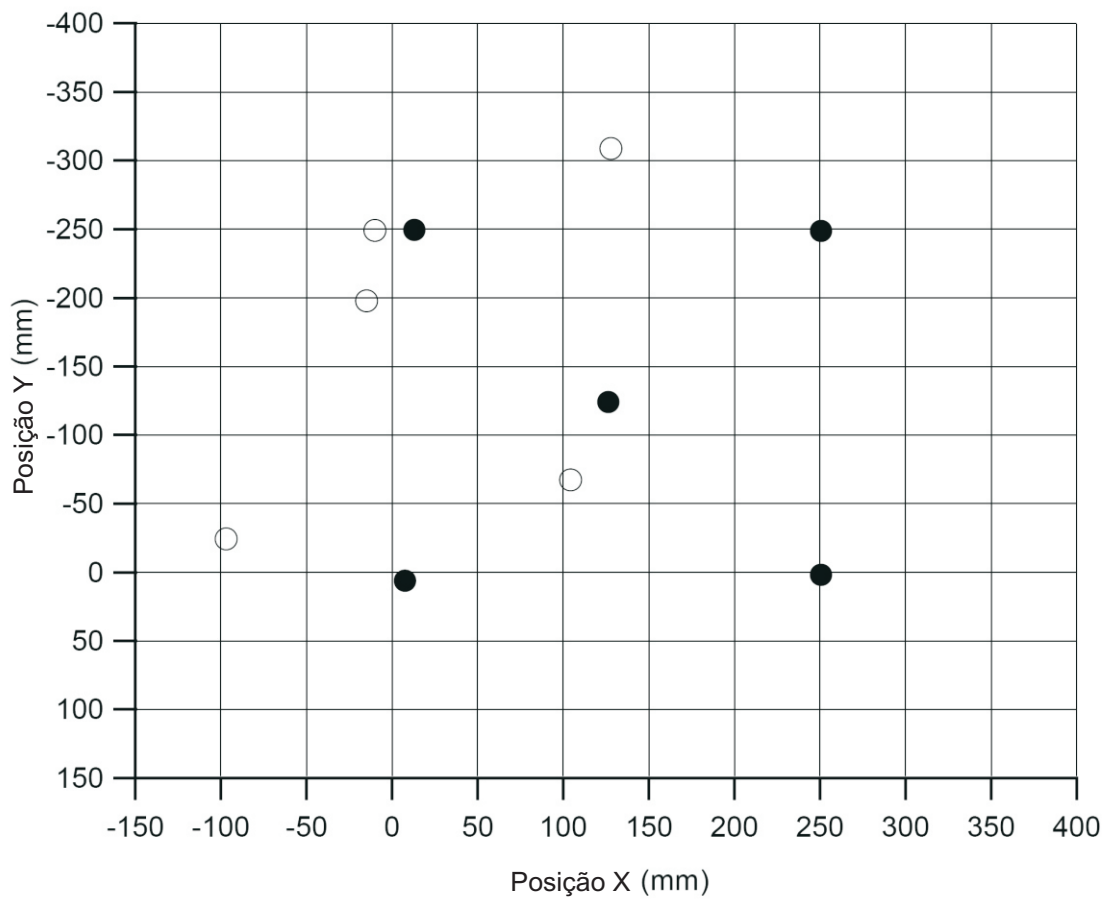


FIG. 23

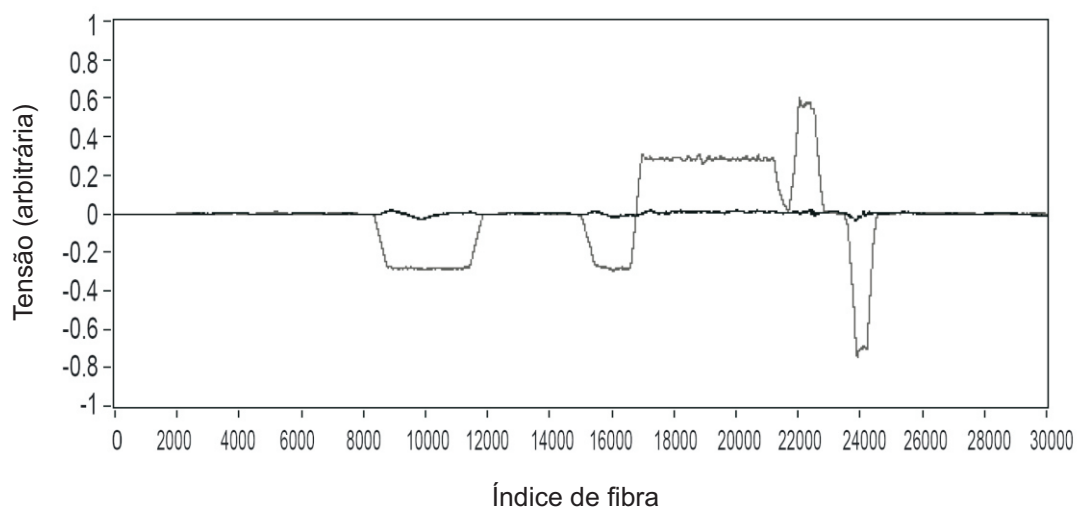


FIG. 24

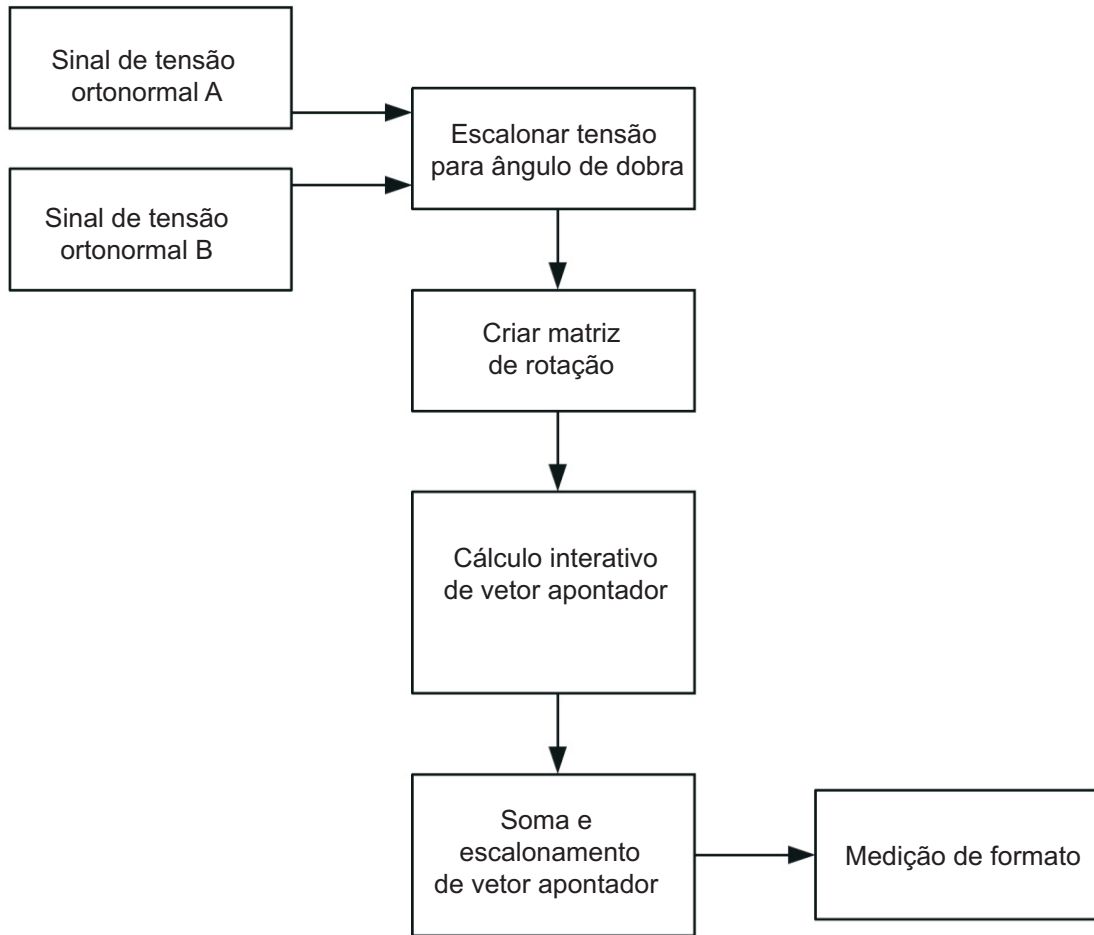


FIG. 25

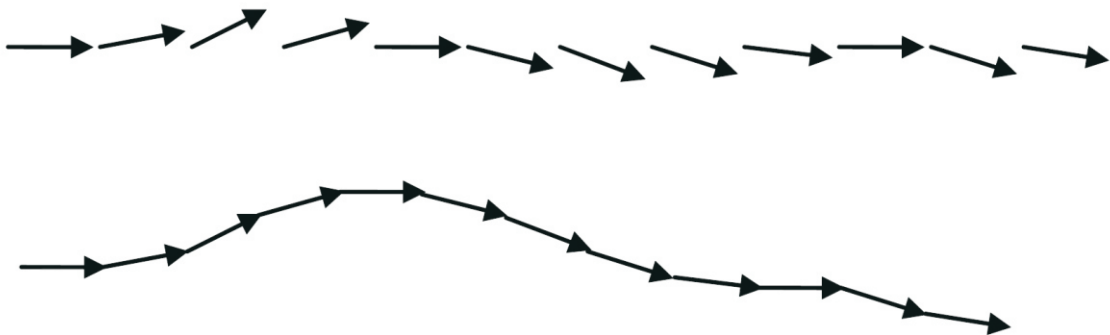


FIG. 26

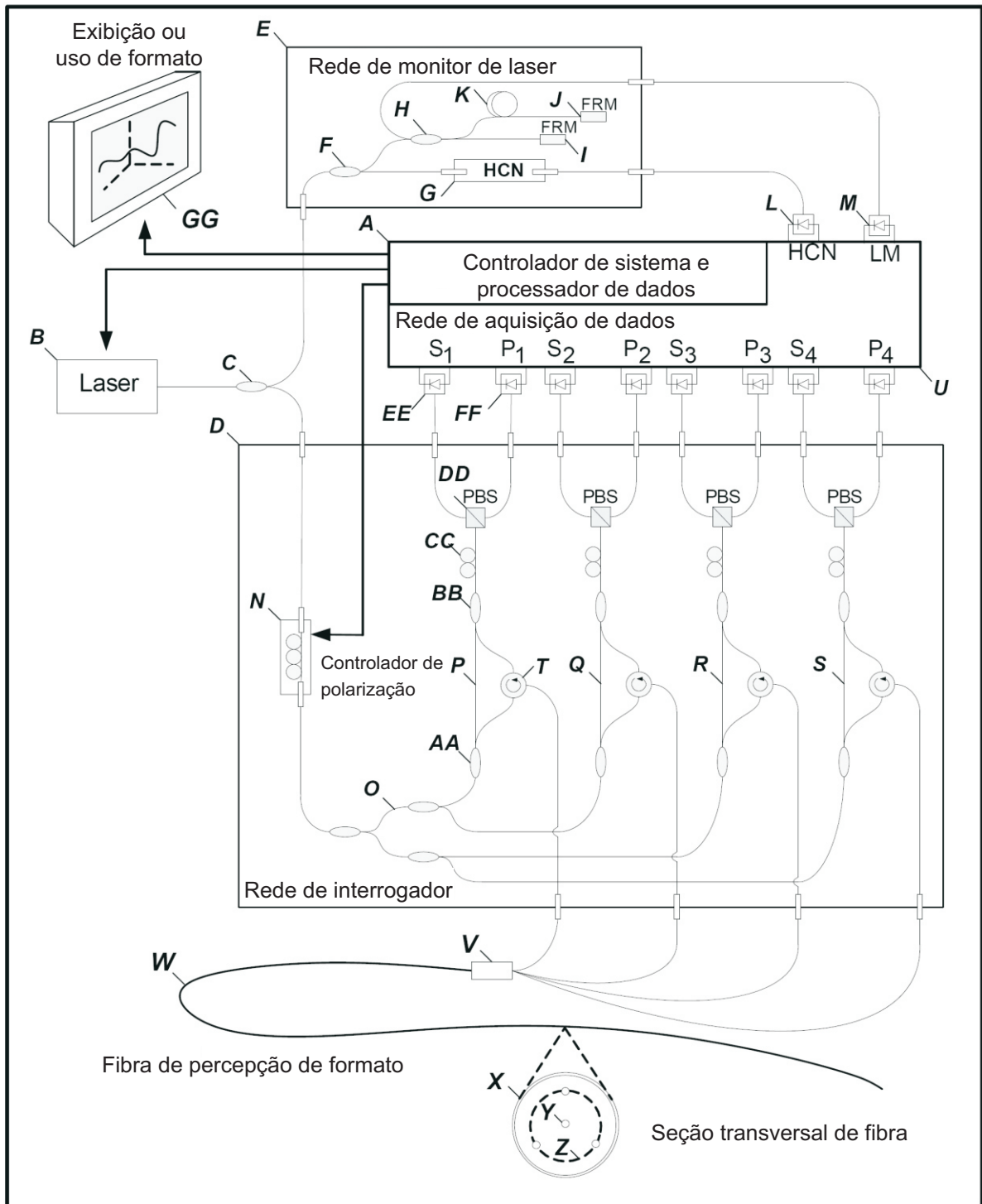
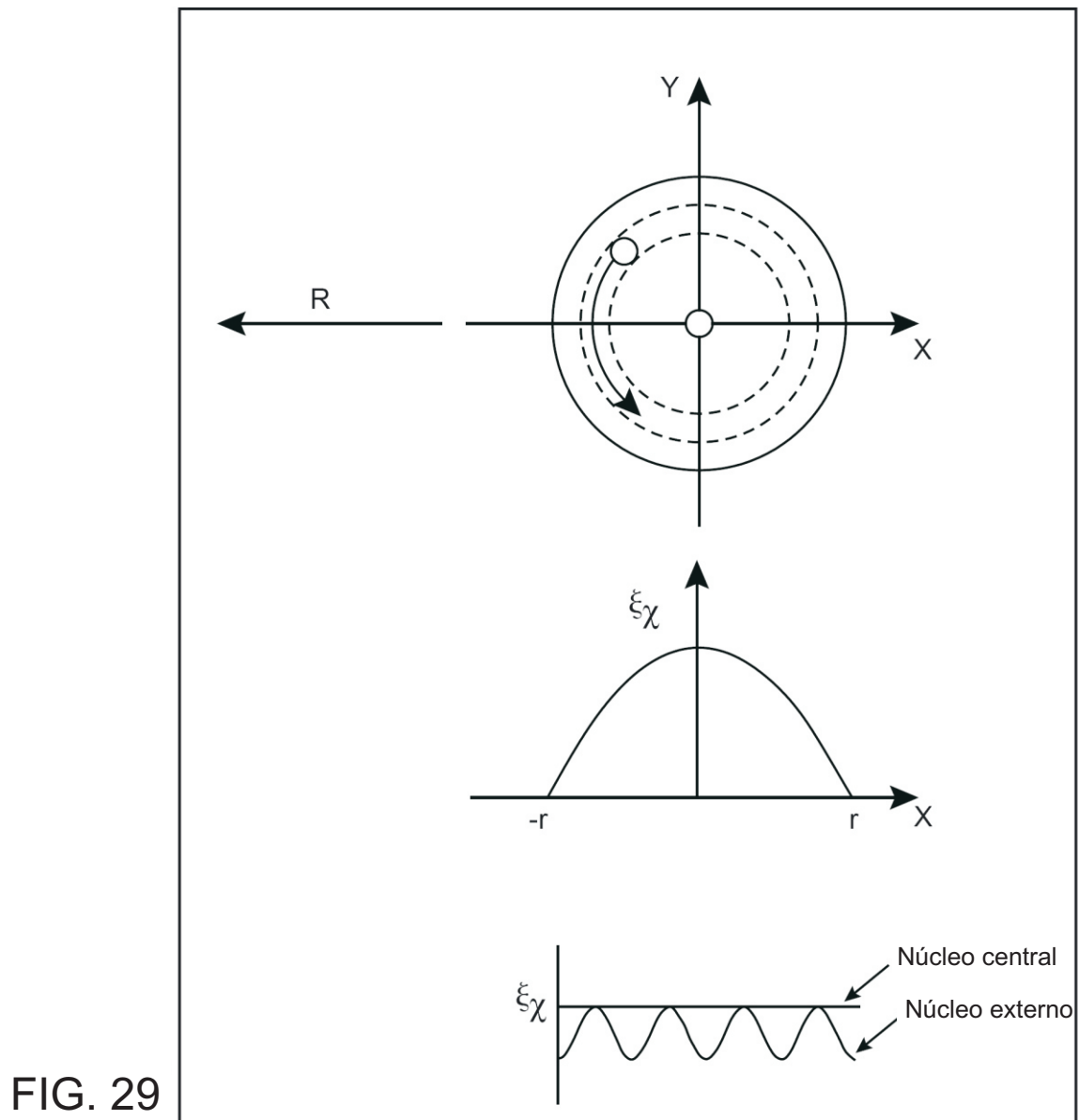
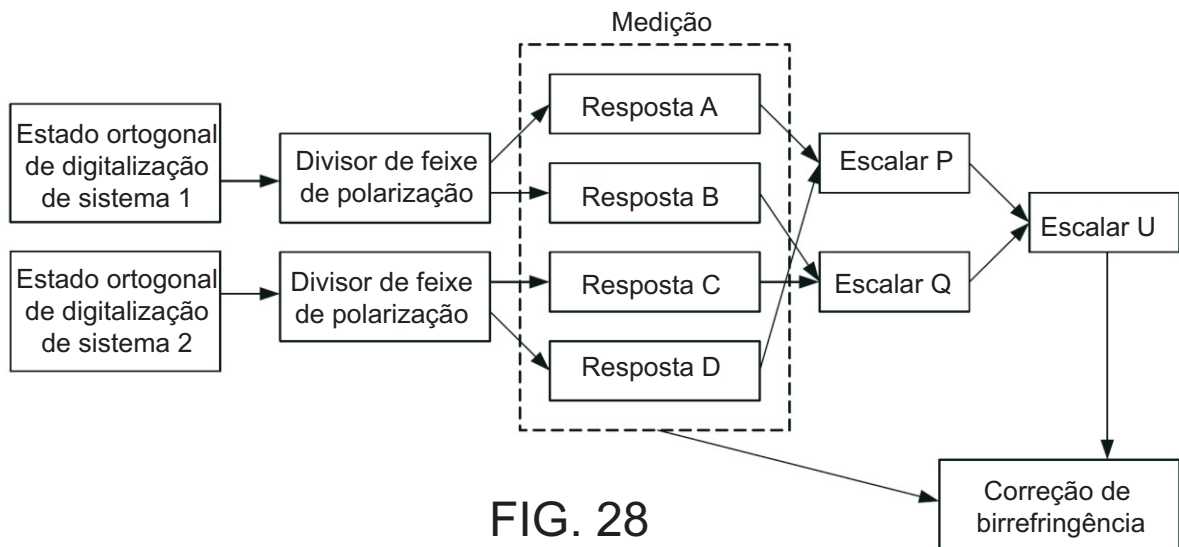


FIG. 27



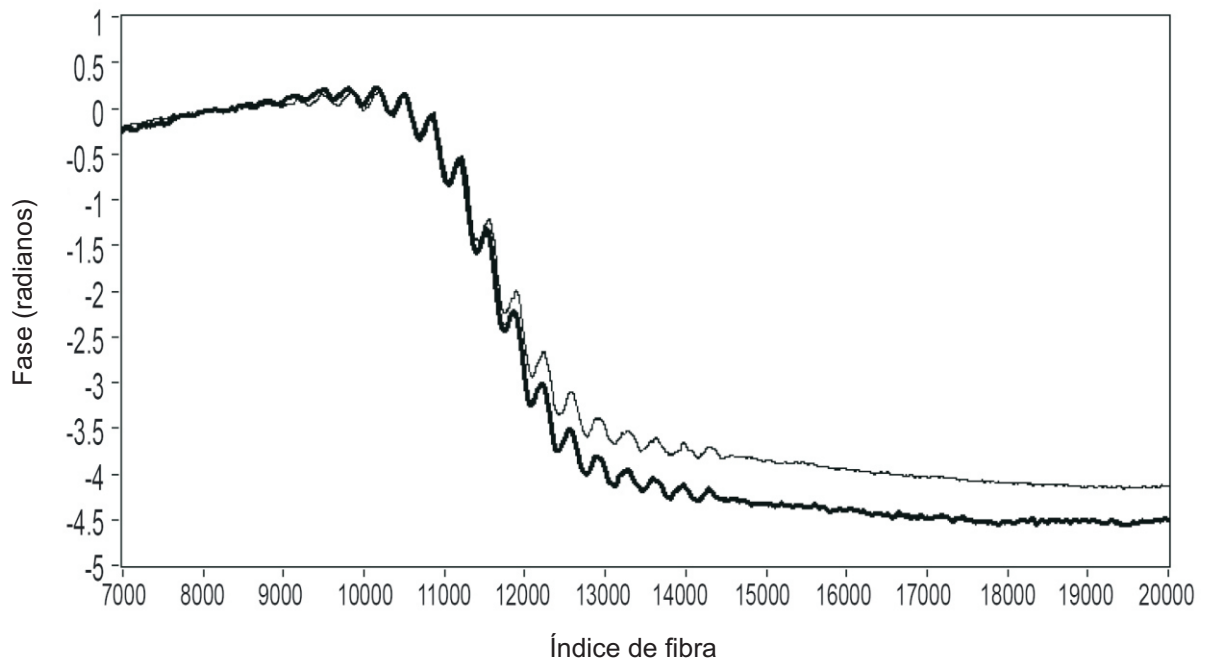


FIG. 30

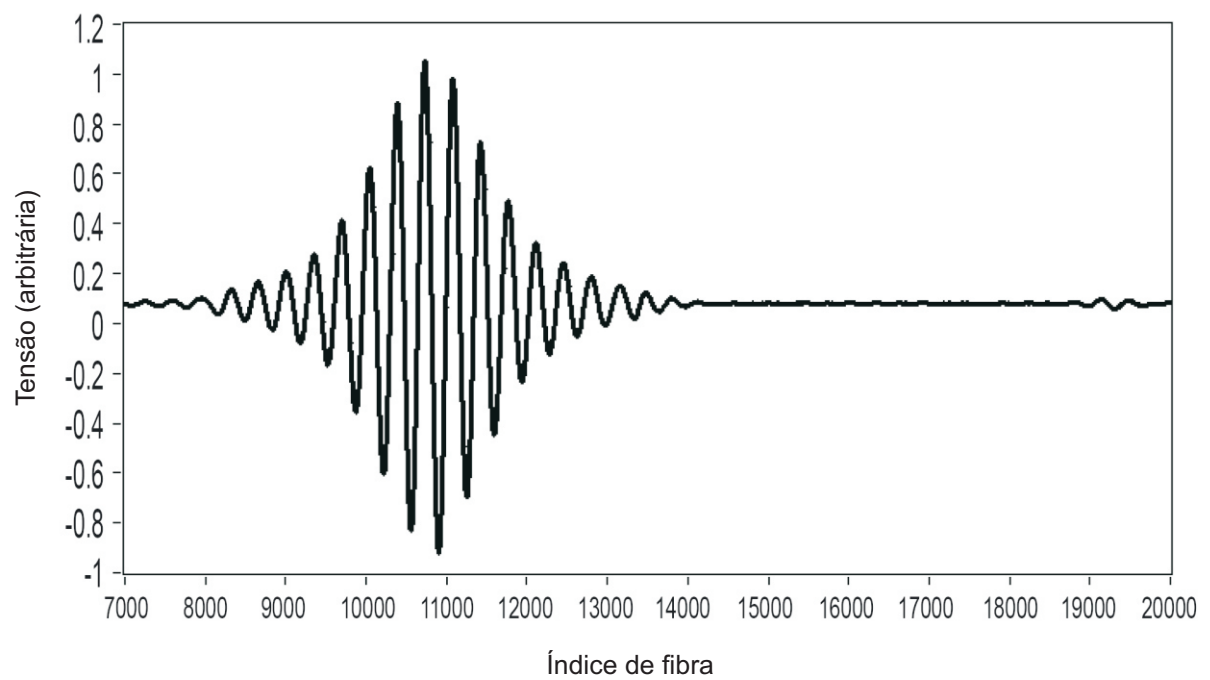


FIG. 31

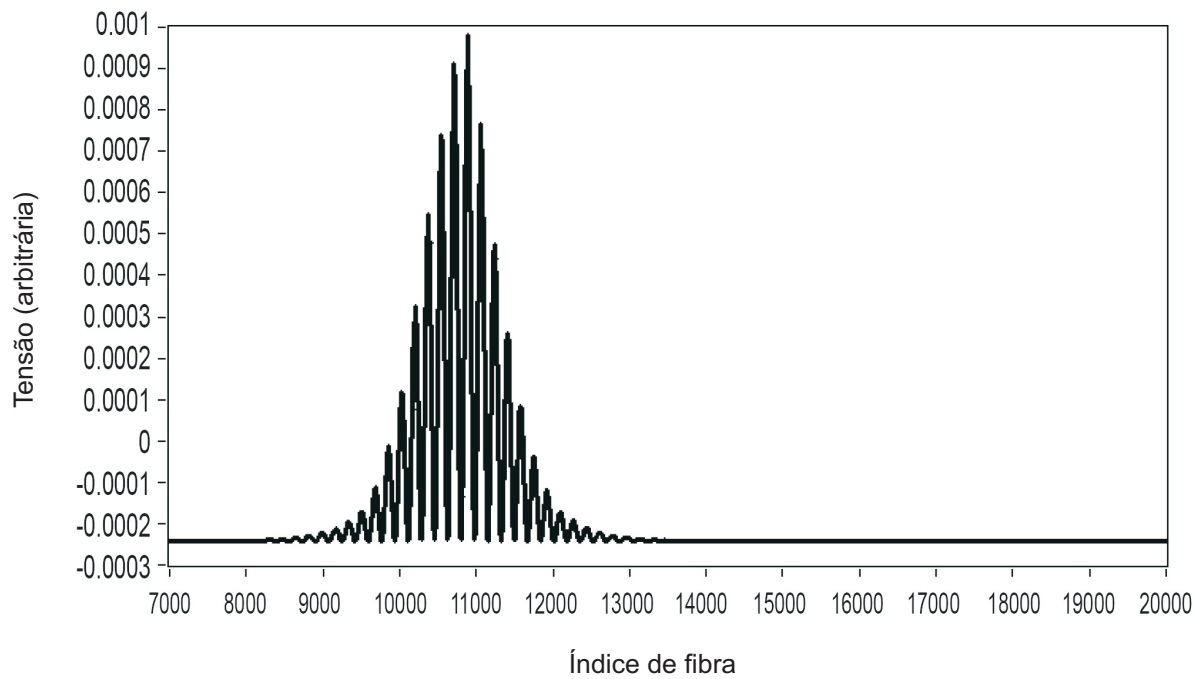


FIG. 32

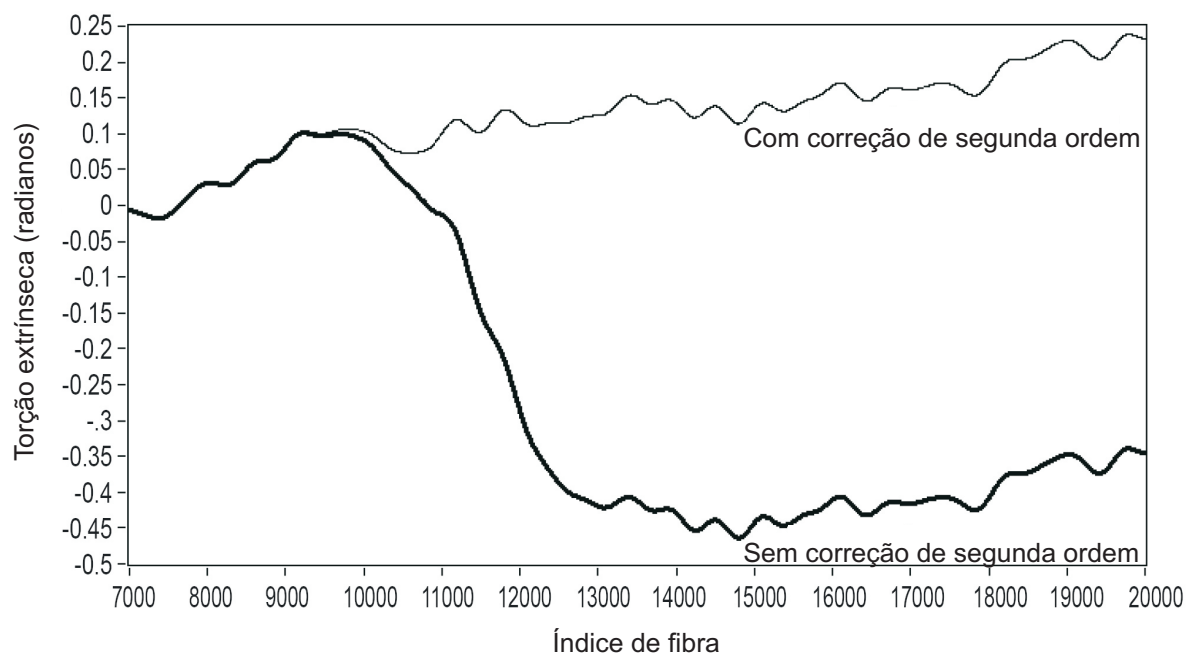


FIG. 33

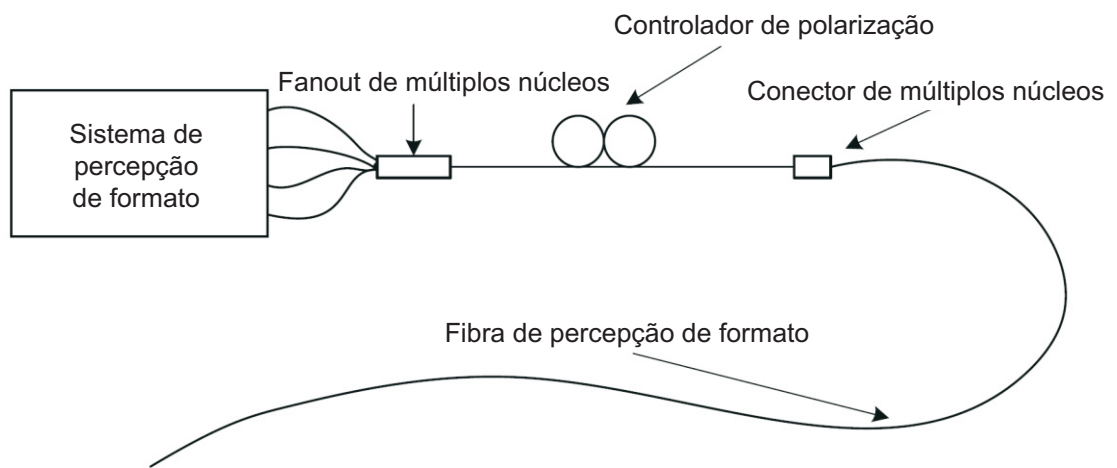


FIG. 34

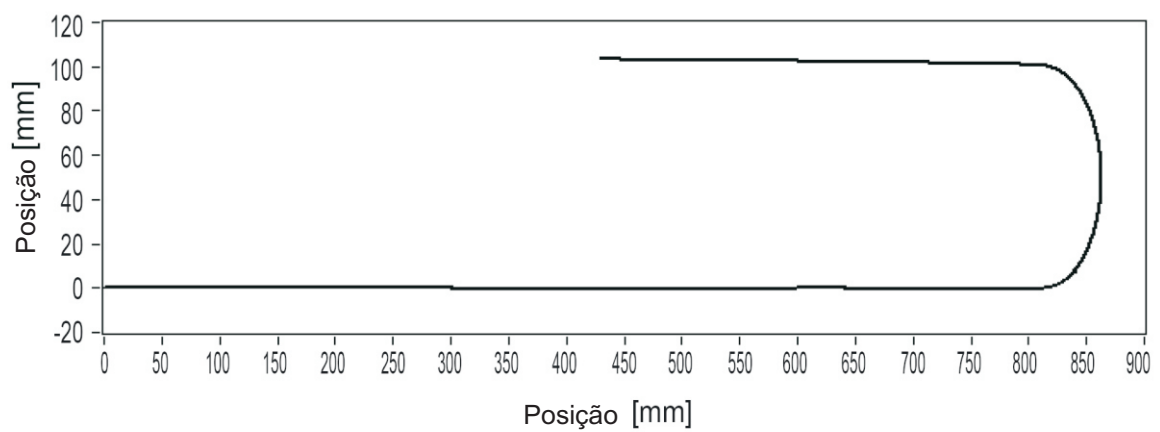


FIG. 35



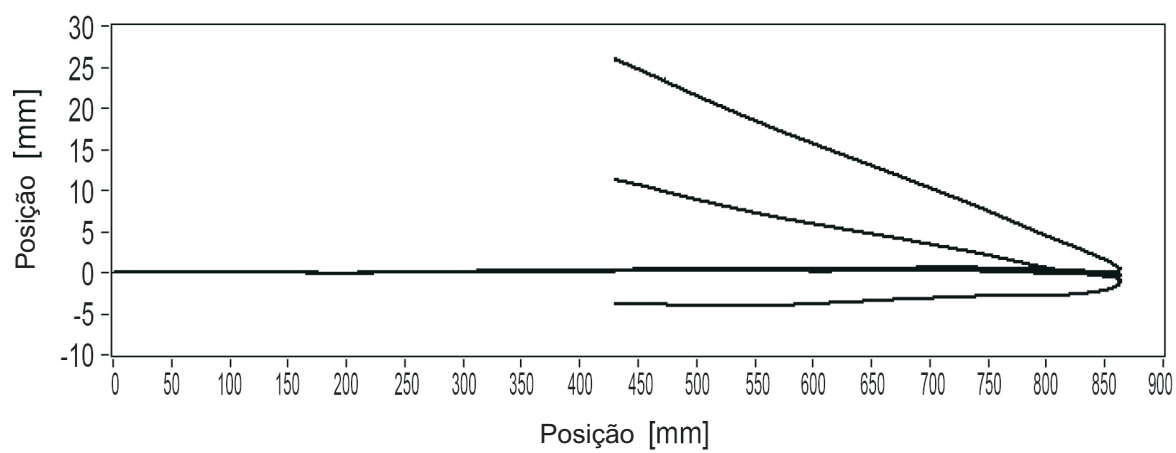


FIG. 36

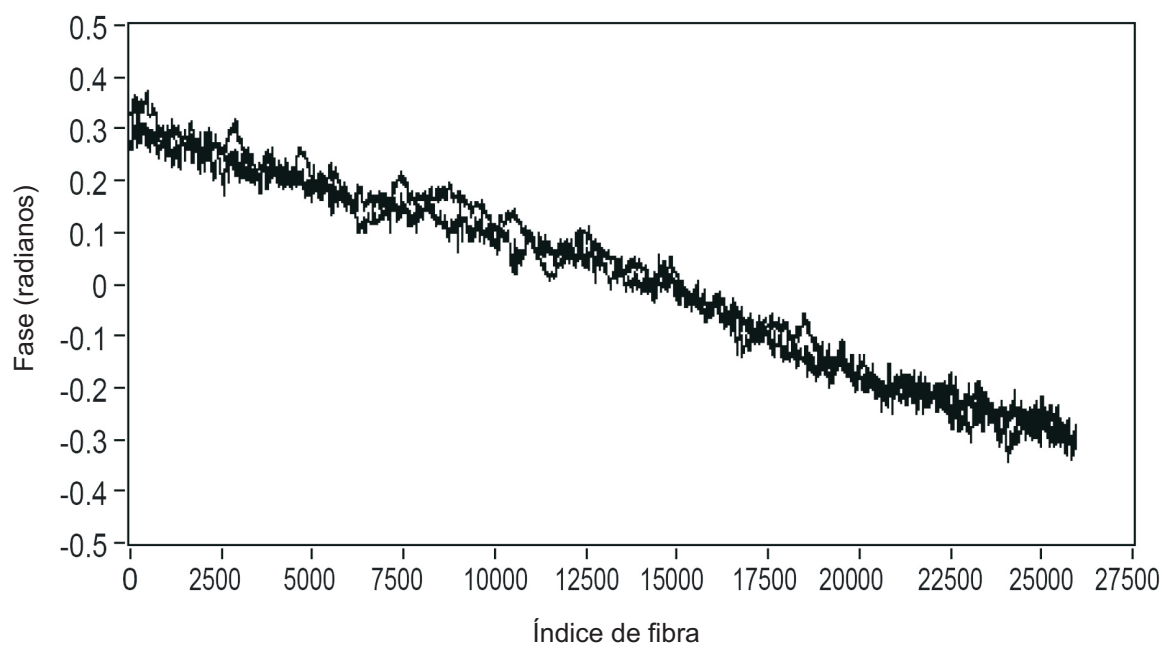


FIG. 37



FIG. 38

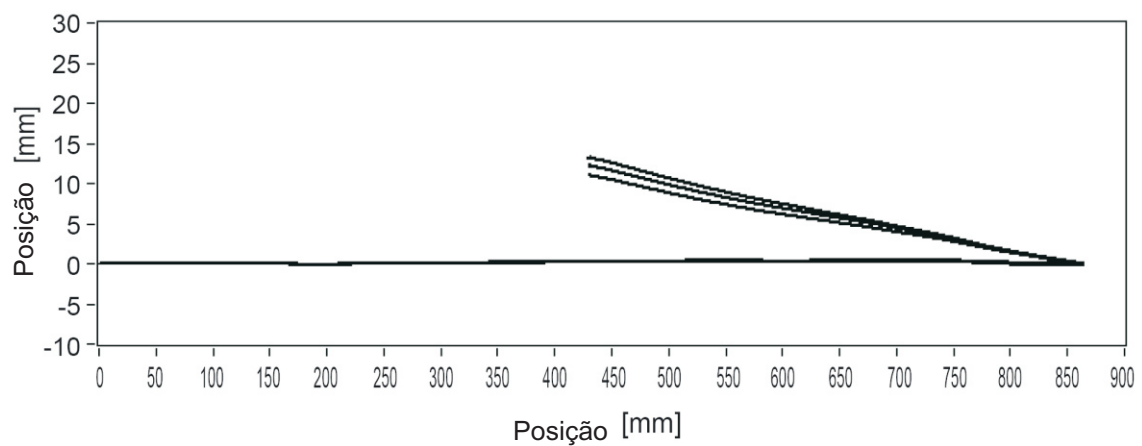


FIG. 39

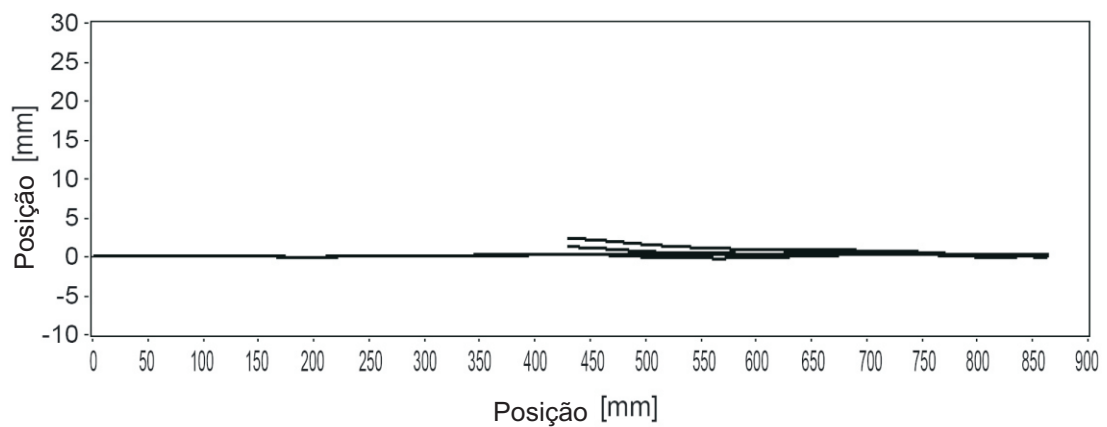


FIG. 40