



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ -
IFCE
CAMPUS FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES – PPGET**

FRANCISCO CLENILSON DO NASCIMENTO DE SOUZA

**SENSOR ÓPTICO DE CORRENTE ELÉTRICA E CAMPO MAGNÉTICO
ALTERNADOS UTILIZANDO INTERFERÔMETRO MACH-ZEHNDER COM
FIBRA REVESTIDA COM NANOPARTÍCULAS PARAMAGNÉTICAS**

FORTALEZA

2018

FRANCISCO CLENILSON DO NASCIMENTO DE SOUZA

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET/IFCE) como requisito final para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

FORTALEZA – CE

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SOUZA, FRANCISCO CLENILSON DO NASCIMENTO DE.

Sensor Óptico de Corrente Elétrica e Campo Magnético Alternados Utilizando Interferômetro Mach-Zehnder Com Fibra Revestida Com Nanopartículas Paramagnéticas / FRANCISCO CLENILSON DO NASCIMENTO DE SOUZA. - 2018.

52 f.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães.

1. Sensor óptico de corrente. 2. Interferômetro de Mach-Zehnder. 3. Nanopartículas paramagnéticas. I. Título.

CDD 621.382

Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o candidato foi aprovado pela Comissão Examinadora. Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. E, para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão.

Glendo de Freitas Guimarães
Orientador: Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães

Agilberto Melo Bastos
Prof. Dr. Agliberto Melo Bastos

Alisson da Conceição Ferreira
Prof. Dr. Alisson da Conceição Ferreira

Wilton Bezerra de Fraga
Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga

José Rubens Rodrigues de Sousa
Prof. Dr. José Rubens Rodrigues de Sousa

Considerações da Banca:

Francisco José Alves de Aquino
Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Telecomunicações do IFCE

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Coordenador do PPGT
IFCE - Campus Fortaleza

A minha querida e amada mãe, Francisca Das Chagas do Nascimento de Souza.

Dedico.

Agradecimentos

A minha mãe por guiar os meus passos rumo ao que hoje sou, que muitas vezes se doava e renunciou aos seus sonhos, para que eu pudesse realizar os meus. Quero dizer que essa conquista não é só minha, mas nossa. Tudo que consegui só foi possível graças ao seu amor, apoio e dedicação que você sempre teve por mim. Sempre me ensinou agir com respeito, simplicidade, dignidade, honestidade e amor ao próximo. E graças ao seu apoio, os obstáculos foram ultrapassados, vitórias foram conquistadas e alegrias divididas obrigado minha querida e amada mãe sou eternamente grato a você;

Ao meu irmão José Wilson do Nascimento de Souza que sempre me ajudou quando precisei, tenho orgulho de ser seu irmão esse grande ser humano obrigado por tudo, sou grato a você meu querido irmão;

A minha querida irmã Maria do Socorro do Nascimento de Souza que sempre com a doçura de suas palavras e atitudes me apoiou nos momentos nos momentos mais difíceis da minha vida;

A minha namorada Maria Sílvia Rocha, pelo apoio incondicional e constante incentivo, por todo amor, carinho, compreensão e apoio em tantos momentos difíceis desta caminhada. Obrigado por permanecer ao meu lado. Obrigado pelo presente de cada dia, pelo seu sorriso e por saber me fazer feliz;

Ao Amigo Ivan Nascimento que com sua grande sabedoria sempre foi fundamental nessa minha jornada, sempre me auxiliando com nobres conselhos e me incentivando ,obrigado;

Ao meu orientador Prof. Dr e amigo Glendo de Freitas Guimarães, por acreditar em mim, pela orientação, competência, profissionalismo e dedicação tão importantes. Tantas vezes que nos reunimos e, embora em algumas eu chegasse desestimulado, bastavam alguns minutos de conversa e umas poucas palavras de incentivo e lá estava eu, com o mesmo ânimo do primeiro dia de aula. Obrigado pelos grandes conselhos de sabedoria, pelos tantos elogios e incentivos. O meu reconhecimento pela oportunidade de realizar este trabalho ao lado de alguém que transpira sabedoria; meu respeito e admiração pela sua serenidade, inibindo sempre a vaidade em prol da simplicidade. Tenho certeza que não chegaria neste ponto sem o seu apoio. Você foi e está sendo muito mais que orientador, para mim será sempre meu amigo tenho eterna gratidão a você meu nobre amigo;

Ao amigo Prof. Dr. José Wally Mendonça, muito obrigado pela ajuda, ensinamentos, orientações e contribuições. e sempre estar me incentivando a acreditar que tudo daria certo. Realmente, deu certo, e você é parte essencial desse trabalho, obrigado por me ensinar a voar sobre o abismo dos meus próprios medos , por me ajudar nos momentos difíceis , esse ser humano que faz orgulho de conhecer e nos faz sempre querer ser uma pessoa melhor , obrigado meu amigo serei eternamente grato a você meu amigo;

Ao amigo e Prof. Dr. Wilton Bezerra de Fraga , que com sua amizade e sabedoria sempre me ajudou quando precisei sem medir esforços , sou privilegiado em ter você como amigo e sei da sua importância na minha vida , pois é um grande ser humano único, saiba que você foi importante para que esse trabalho fosse concluído, obrigado;

A minha amiga Luana Samara Paulino Maia, pela sua amizade, paciência, pelo esforço nas medidas realizadas durante toda essa pesquisa, a sua grande ajuda com a criação dos gráficos e tabelas, na formatação da minha dissertação e, principalmente, pela preocupação e apoio constantes. Seus conhecimentos e dedicação foram fundamentais para que este trabalho se tornasse realidade;

Ao amigo e Prof. Dr. Agliberto Melo Bastos, que, nos momentos difíceis e de dificuldades me ajudou extremamente, sempre se colocou solícito sem medir esforços obrigado meu amigo por me ajudar em todos os momentos , levarei você no meu coração com grande gratidão, pois sem o sua ajuda e gesto de humanidade esse trabalho não poderia ser concluído, obrigado;

Ao amigo e Prof. Dr. Alisson da Conceição Ferreira que sempre me auxiliou quando precisei obrigado;

Ao amigo Prof, Dr. Juscelino Chaves Sales, que sempre foi gentil em me oferecer tantas caronas ao ir para casa, obrigado;

Ao amigo Prof. Francisco Tadeu Belchior Carvalho Magalhães que muitas vezes me ajudou e me ofereceu caronas para ir para casa no interior, obrigado;

Ao amigo João Isaac Sílvia Miranda que sempre foi solícito e sempre me auxiliou com paciência e presteza , obrigado;

Ao amigo Guilherme Matias de Medeiros, que sempre me auxiliou durante este trabalho, sua ajuda foi muito importante para realização deste trabalho;

Ao amigo Daniel do Nascimento e Sá Cavalcante que sempre me auxiliou e se colocou prestativo quando precisei, sua ajuda foi muito importante para realização deste trabalho, obrigado;

Aos professores da banca julgadora;

Ao laboratório fotônica IFCE de Fortaleza que foi o espaço fundamental para que este trabalho fosse realizado;

A todos os colegas do laboratório Fotônica IFCE de Fortaleza;

Ao instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - Campus de Sobral e especialmente aos professores que com muita sabedoria souberam me conduzir;

Aos órgãos CAPES, CNPq e FUNCAP pelo apoio financeiro.

Quanto mais nos elevamos, menores parecemos
aos olhos daqueles que não sabem voar.

Friedrich Nietzsche

Resumo

Neste trabalho foi proposto um sensor de corrente elétrica e campo magnético utilizando o interferômetro Mach-Zehnder em fibras ópticas com nanopartículas paramagnéticas. Foi utilizado nanopartículas de ferrita de níquel (NiFe_2O_4), com tamanho médio de cristalito de $72 \text{ nm} \pm 13 \text{ nm}$, como elemento sensor no braço de desbalanceamento do interferômetro. Também foi apresentada uma modelagem matemática por aproximação para a análise de sensor. A transmissão do sensor é alterada pela vibração das nanopartículas na presença de campo magnético alternado, causando desequilíbrio entre os sinais ópticos dos braços do interferômetro. Foi observado aumento na saída do sinal do sensor com aumento das variações do campo magnético, atingindo aproximadamente 20 dB. Também foi analisado a redução do sinal óptico na saída do sensor com aumento da distância entre o sensor e o elemento gerador do campo magnético. O sensor apresentou sensibilidade de 38,5 dB / mT para campos magnéticos abaixo de 0,75 mT e 66,7 dB / mT para campos acima deste valor. Levando em consideração a estrutura do sensor, os resultados demonstram a possibilidade de utilização deste sensor de corrente alternada e campo magnético. O sensor destaca-se quanto ao seu aspecto estrutural, considerando que as nanopartículas são de baixo peso e tamanho pequeno, portanto o sensor pode ser utilizado em diversas aplicações.

Palavras-chave: Sensor óptico de corrente, interferômetro de Mach-Zehnder, nanopartículas paramagnéticas

Abstract

In this work, an electric current and magnetic field sensor was proposed by using a Mach-Zehnder interferometer in optical fibers with paramagnetic nanoparticles. Nanoparticles of nickel ferrite (NiFe_2O_4) with a average crystallite size of $72 \text{ nm} \pm 13 \text{ nm}$ were used as a sensing element in the unbalanced arm of the interferometer. An approximate mathematical model was also presented for the sensor analysis. The transmission of the sensor is altered by the vibration of the nanoparticles in the presence of alternating magnetic field, which causes imbalance between the optical signals of the interferometer arms. An increase in the output signal of the sensor was observed when the magnetic field variations increased, reaching approximately 20 dB. In addition, we also analyzed the reduction of the optical signal at the sensor output with increasing distance between the sensor and the magnetic field generating element. The sensor presented sensitivity of 38.5 dB / mT for magnetic fields below 0.75 mT and 66.7 dB / mT for fields above this value. Taking into account the structure of the sensor, the results demonstrate the possibility of using this alternating current sensor and magnetic field. The sensor stands out for its structural aspect, considering that the nanoparticles are light and small, therefore the sensor can be used in several applications.

Keywords: Optical current sensor, Mach-Zehnder interferometer, paramagnetic nanoparticles.

Lista de Símbolos

α	é a constante de atenuação
P_{out}	Potência de saída
L_T	comprimento da fibra
dB	Decibel
A_0	sinal óptico de entrada
ρ	razão de divisão do acoplador
β	são as constantes de propagação para os dois braços do MZI
γ	parâmetro de não-linearidade
L	comprimento do braço do MZI
ϕ_L	fases lineares
ϕ_{NL}	fases não-lineares

Lista de Figuras

- Figura 1: Estrutura de uma fibra óptica.
- Figura 2: Estrutura básica Interferômetro de Mach-Zehnder em fibra óptica.
- Figura 3: Sensor de fibra óptica à base de interferômetro Mach-Zehnder.
- Figura 4: Configuração do MZI óptico para sensoriamento de corrente e campo magnético alternados.
- Figura 5: Difratoograma da amostra de NiFe_2O_4 utilizada.
- Figura 6: A curva de magnetização com campo aplicado.
- Figura 7: Resposta do sensor no domínio do tempo e da frequência para uma corrente de 5 A.
- Figura 8: Resposta do sensor no domínio do tempo e da frequência para uma corrente 5 A e 5 cm
- Figura 9: Resposta do sensor óptico com relação da potência de saída (dBm) em função da corrente elétrica (A) para a distância de 9 cm.
- Figura 10: Resposta do sensor óptico com relação da potência de saída (dBm) em função da distância com corrente fixa em 1A
- Figura 11: Resposta do sensor óptico com relação da potência de saída (dBm) em função da distância com corrente fixa em 5A
- Figura 12: Sensibilidade como função do campo magnético aplicado.

Lista de Abreviações

MZI	Interferômetro de Mach-Zehnder
FBG	Grade de Bragg da Fibra
MF	Fluido Magnético
MMI	Interferência Multimodo
SMS	Modo Único
RI	Índice de Refração
LED	Diodo Emissor de Luz
DVG	Dispersão de Velocidade de Grupo
dB	Decibel
dBm	Decibel miliwatt
LPG	Grades do Período Longo
nm	Nanômetros
FFT	Transformada Rápida de Fourier
Ms	Magnetização de Saturação
Mr	Magnetização Remanente
Hc	Campo Coercivo

Sumário

Resumo	10
Abstract.....	11
Lista de Símbolos	12
Lista de Figuras.....	13
Lista de Abreviações.....	14
Sumário.....	15
INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa	18
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.3 Produção Científica.....	19
CAPÍTULO 2.....	20
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 Revisão Bibliográfica	20
2.2 Fundamentação teórica	23
2.2.1. Fibra óptica	23
2.2.3 Dispersão	25
2.3 Interferômetro de Mach-Zehnder.....	25
2.3.1 Sensores de fibra óptica baseados no interferômetro de Mach-Zehnder	26
2.3.2 Classificação magnética dos materiais	27
2.3.3 Nanopartículas ferrita de níquel.....	28
CAPÍTULO 3.....	30
MATERIAIS E MÉTODOS	30

3.1 Produção e Caracterização das Nanopartículas	30
3.2 Descrição do Setup Experimental.....	31
4.1 Caracterização das Nanopartículas	32
4.2 Sensor MZI	35
4.3 Modelo matemático por aproximação e sensibilidade.....	40
CAPÍTULO 5.....	43
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	43
5.1 Conclusão	43
5.2 Perspectiva de Trabalhos Futuros	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sensores ópticos estão sendo cada vez mais utilizados para medir diversos parâmetros físicos associados a inúmeras aplicações, entre elas, podemos citar a medição temperatura, corrente elétrica e campo magnético. Tendo em vista que se apresentam como excelente solução nos quesitos relativos à interferência eletromagnética, podemos destacar que tais sensores podem trabalhar em ambientes que apresentem elevada radiação eletromagnética.

A medição precisa da energia elétrica é um aspecto fundamental no desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de energia sustentável. Nesse contexto, os sensores de corrente elétrica são ferramentas vitais hoje em dia, pois permitem uma medição precisa de consumo e identificação rápida de falhas em sistemas de energia (EL-KHOZONDAR *et al.*, 2011). Em ambiente de alta tensão os transformadores de corrente podem ser facilmente danificados pelo calor, curtos-circuitos ou descargas elétricas atmosféricas, e é essencial empregar circuitos de proteção e isolamento, que requer manutenção constante e monitoramento. No entanto, a corrente padrão de transformadores usados atualmente na indústria de energia elétrica para aplicações de medição e proteção tem muitas limitações associadas (RAHMATIAN, 2010). Por exemplo, devido à sua alta dimensão e peso, alguns desses dispositivos não podem ser suspensos na linha elétrica e implicam alto custo de instalação

A medição de corrente elétrica através de métodos ópticos é atraente para aplicações em sistemas de alta tensão, porque apresenta várias vantagens sobre os métodos tradicionais, como a alta largura de banda, alto isolamento elétrico, imunidade a interferência eletromagnética, capacidade de multiplexação, peso leve e compatibilidade com a tecnologia de comunicação de fibra óptica. A maioria dos sensores ópticos de corrente elétrica relatados utilizam, como princípio físico, o efeito Faraday, ou efeito magneto-óptico (NING *et al.*, 1995; JENKINS, 1953) que consiste em uma birrefringência circular induzida.

Dentre as classes de sensores ópticos, os sensores que utilizam a tecnologia de fibras ópticas se destacam por suas diversas vantagens (KLEMBBA *et al.*, 2005) Esses sensores podem possuir diferentes configurações de acordo com a aplicação de interesse, podendo ser empregados para medir vibração, deslocamentos, deformação mecânica, posição, pressão,

aceleração, rotação, radiação ionizante, campo elétrico e magnético, campo acústico, corrente elétrica, tensão elétrica, temperatura, dentre outras (LEE, 2003)

A disponibilidade de fibras de sílica com baixa perda de sinal conduziu a uma revolução não apenas no campo de fibras ópticas para comunicação, mas também no campo de sensores a fibras ópticas que podem ser utilizados adequadamente como uma ferramenta para medidas de precisão (GANGOPADHYAY et al., 2005)

Sensores de fibra óptica oferecem imunidade à interferência eletromagnética e inerente isolamento elétrica, o que representa vantagens sobre as soluções eletromecânicas, onde ruídos, alta voltagem e alta temperatura são problemas. Além da possibilidade de serem instalados em áreas previamente inacessíveis, devido ao seu tamanho reduzido e à flexibilidade da fibra. Assim, eles possuem grande potencial para uso em maquinário de alta rotação, biomedicina e aplicações que requerem sensoriamento remoto como em ambientes de alta temperatura ou radiativos (HASTINGS, CHIU & NIPPA, 1997).

Nesse contexto, sensores de fibra óptica se apresentam como interessante solução para aplicações em medições de correntes elétricas, e em diversos ambientes. Assim, destacamos que nenhum trabalho na literatura apresenta uma solução de medida de corrente elétrica por meio de interferômetros de fibras ópticas revestidas com nanopartículas. Esse trabalho, além de inovador, apresenta um forte apelo de desenvolvimento tecnológico utilizando nanotecnologia, o que permite o desenvolvimento da indústria nacional com relevante valor agregado a produtos e processos.

1.1 Justificativa

Atualmente, nanopartículas magnéticas têm sido utilizadas nas diversos contextos, como sensores de gás, materiais fotomagnéticos e tratamento de câncer com hipertermia no qual, neste último caso, sua capacidade de gerar calor através da aplicação de um campo magnético é explorada.

Medição de corrente elétrica é crítica em diversas aplicações, apresentando inúmeras dificuldades. Isto ocorre normalmente quando é necessário fazer uma derivação num determinado circuito. Algumas técnicas têm sido desenvolvidas para a aplicação, entretanto nenhuma solução óptica utilizando fibras ópticas e nanotecnologia foi apresentada. O diferencial desse trabalho é a aplicação da nanotecnologia, entre elas, técnicas de sensores utilizando tecnologia óptica.

Sensores de fibras ópticas apresentam grandes vantagens em relação a sensores convencionais, destacando sensores que utilizam interferometria, pois apresentam alta

sensibilidade e rápida resposta. Pode-se, assim, destacar que a aplicação de sensores em fibra óptica com as nanopartículas, esta apresentando baixo peso e tamanho reduzido, para medição de corrente elétrica e campo magnético além de ser aplicada uma tecnologia inovadora, agrega ao estudo pertinente dentro do estado da arte.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

É apresentado neste trabalho um sensor de corrente elétrica e campo magnético alternados utilizando fibras ópticas, em interferômetro de Mach-Zehnder com um dos braços do sensor revestido com nanopartículas paramagnéticas de ferrita de níquel.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar as características de magnetização das nanopartículas paramagnéticas de ferrita de níquel;
- Construir experimentalmente um sensor de corrente elétrica e campo magnético alternados utilizando MZI com um dos braços revestido com nanopartículas paramagnéticas;
- Analisar a potência de saída em função da corrente elétrica e em função do campo magnético;
- Analisar a sensibilidade da fibra óptica revestida com nanopartículas paramagnéticas de ferrita de níquel;
- Desenvolver um modelo matemático por aproximação para o sensor.

1.3 Produção Científica

Um artigo está em processo de revisão – IEEE Sensors Journal – 2.512 – A1 em Engenharias IV;

Trabalho foi apresentado no XII simpósio de lasers e suas aplicações – Recife

Foi depositada um pedido de patente;

Sensor óptico de corrente elétrica e campo magnético alternados utilizando interferômetro Mach-Zehnder com fibra revestida com nanopartículas paramagnéticas.

Número do Processo: BR 10 2018 010403 9

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será realizada a revisão bibliográfica e fundamentação teórica dos sensores e técnicas utilizadas para medição de corrente e campo magnético, onde são abordados fundamentos sobre sensores a fibra óptica.

2.1 Revisão Bibliográfica

O sensor é um elemento, dispositivo ou sistema que converte um mensurando físico, químico ou biológico de interesse em sinal óptico ou elétrico, de forma que possa ser transmitido ou processado (WERNECK, 1996).

Em geral, os sensores mais utilizados para medir os parâmetros elétricos de uma rede de tensão elevada, são baseados no efeito Hall, em que acopla-se um ímã em uma peça móvel possibilitando detectar seu movimento, medir sua rotação e verificar sua posição com a utilização de sensores magnéticos (ZU et al., 2012; HADHIPANAYS, 1991).

Alguns dos sensores de corrente utilizam o efeito magnético óptico de Faraday para medição. No trabalho apresentado por (NING *et al.*, 1995), a rotação de um feixe de luz polarizado, quando o mesmo é submetido a campos magnéticos, permite a medição da corrente elétrica.

Os sensores de corrente elétrica, baseados no efeito magneto-óptico de Faraday, têm como aplicação a indústria de distribuição de energia devido à sua imunidade tanto para altas tensões como para interferências eletromagnéticas (ROGERS, 1989; DAY, 1989; PAIS, 1992). Outra vantagem potencial, em comparação com a monitoração de corrente convencional, inclui a ausência de efeitos de saturação quando o sensor é submetido a altos campos magnéticos, tendo um grande potencial para a fabricação de dispositivos compactos e baixo custo.

A tecnologia e as aplicações das fibras ópticas têm progredido muito rapidamente nos últimos anos. A fibra óptica, é um meio físico. As vantagens dos sensores de fibra óptica são livres de ampla largura de banda, versatilidade geométrica e economia. Em geral, os sensores de fibra ópticas são caracterizados por alta sensibilidade quando comparado a outros tipos de sensores. Também é passivo em natureza devido à construção dielétrica. As fibras podem suportar altas temperaturas e outros ambientes. Em aplicações de telemetria e sensoriamento remoto é possível usar um segmento da fibra como um medidor de sensor

enquanto um longo comprimento da mesma ou outra fibra pode transmitir as informações detectadas para uma estação remota. A implantação de sensores distribuídos que cobrem extensas estruturas e locais geográficos também é viável. (GHOLAMZADEH, B; NABOVATI, H 2008)

Sensores ópticos que utilizam fibra óptica possuem características propícias à medições de grandezas elétricas de baixa e alta tensão pois, por serem dispositivos eletricamente passivos, são imunes a interferências eletromagnéticas. Além disso, são dispositivos dielétricos e possuem isolamento elétrico intrínseco ao componente e não possuem efeitos de saturação, quando são submetidos a campos magnéticos intensos (LANGENHORST *et al.*, 1996; MAYSTRE, 1989; NELLEN *et al.*, 2003; CAROME, 1993; LI, 2004). Dessa forma, o desenvolvimento de dispositivos de fibra óptica para medição de corrente e campo magnético são candidatos para utilização em redes de geração, transmissão e distribuição, tornando o produto viável para futura comercialização (MAYSTRE, BERTHOLDS, 1989).

Bastos (2014) apresentou um sensor de corrente baseado num sistema híbrido optomecânico utilizando Interferômetro de Mach-Zehnder. O Interferômetro foi construído com fibra óptica monomodo operando com um sinal de laser com comprimento de onda de 1,55 μm , onde a detecção de corrente é obtida por uma perturbação mecânica na fibra em um dos braços do interferômetro. Para obter tal perturbação, a fibra foi fixada em uma placa de metal vibratória e, por fim, um pequeno ímã, cujo objetivo foi melhorar a perturbação imposta a fibra, foi posto sobre a placa de forma que o mesmo possa interagir com o campo magnético produzido pela corrente elétrica que passa por um fio situado a certa uma distância. Esta perturbação conduz a uma interferência óptica detectada na saída do interferômetro e é proporcional a intensidade da corrente no fio, medida pelo sensor. Entretanto a estrutura mecânica apresentada pode dificultar a aplicação do sensor em ambientes específicos.

Os sensores de fibra óptica atraíram muita atenção nas últimas décadas devido à suas características particulares, tais como anti-interferência, compactidade e alta sensibilidade. Recentemente Mescia et al (2013) apresentou um trabalho de revisão introduzindo abundantes estruturas de sensores de fibra, como grade de Bragg da fibra (FBG), grades do período longo (LPGs). Por outro lado, fluido magnético (MF) é um material atraente, que é um tipo de sistema coloidal estável consistindo em nanopartículas magnéticas revestidas num transportador líquido adequado. Possui as características de propriedade magnética de materiais magnéticos sólidos e fluidez de líquidos. Até agora, propriedades versáteis foram demonstradas (por exemplo, índice de refração sintonizável (IR) (JI, 2012; WANG, 2013)

Recentemente, como uma quantidade física fundamental, a intensidade do campo magnético tem sido profundamente investigada em muitos estudos científicos e aplicações industriais. A medida do campo magnético pode ser amplamente aplicado na indústria aeroespacial, armazenamento de informações, monitoramento ambiental, navegação e pesquisa de energia, etc. (YANG *et al.*, 2010)

Hoje em dia, interferômetros Mach-Zehnder (MZIs) têm sido utilizados em várias aplicações de detecção. Por exemplo, altamente sensível sensores de índice de refração e sensor de umidade de fibra óptica (JI *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2013).

Sensores de campo magnético confiáveis e altamente sensíveis são importantes para monitorar a variação do campo magnético força da infra-estrutura civil, como usina de energia. Isto é também é bem conhecido que o sensor de campo magnético de fibra óptica tem vantagens de bom isolamento de interferência eletromagnética. A interferência multimodo (MMI) na estrutura de modo único é sensível a parâmetros externos, como índice de refração e temperatura. Várias fibras ópticas dispositivos que usam a estrutura de fibra foram propostos e demonstrados, como sensores de temperatura (TRIPATHI *et al.*, 2009) refratômetros (LIU *et al.*, 2014; WU, 2011; ZHANG *et al.*, 2017), filtros de banda (MOHAMMED, 2006; ANTONIO-LOPEZ, 2010), sintonizáveis laser de fibra (CASTILLO-GUZMAN *et al.*, 2010) e detector de gás químico (LAN *et al.*, 2012).

A medição de campo magnético é um dos requisitos críticos em áreas de atuação, como gerenciamento de energia, monitoramento de alta tensão e navegação. A detecção de um campo magnético é tradicionalmente realizada por um magnetômetro acionado por corrente (LENZ, 1990).

No entanto, esses sensores apresentam algumas desvantagens inerentes em termos de sensibilidade eletromagnética (facilmente perturbada por outro campo magnético), tamanho grande e capacidade de multiplexação deficiente. Uma solução alternativa envolve meios ópticos para detecção de campo magnético. Entre esses diversos dispositivos ópticos, os sensores ópticos têm demonstrado excelente desempenho e facilitado uma infinidade de oportunidades para detecção de campo magnético de ponto único em espaços de difícil acesso, com sensibilidade cruzada controlável e tamanho muito compacto. para medição embutida. Até o momento, há dois tipos de sensores de campo magnético-ópticos que dependem de diferentes materiais magnéticos como por exemplo, fluidos magnéticos (MFs) (SHI *et al.*, 2006; LIN *et al.*, 2013)

Em comparação, os sensores baseados em MF apresentam maior sensibilidade utilizando a mudança do índice de refração (RI) nos modos de revestimento. O interferômetro

de Mach-Zehnder (MZI) é um exemplo típico. Os modos de revestimento acoplados transmitem para o revestimento do sensor. Eles são facilmente afetados pela mudança de RI circundante e transferidos para os modos de perda de radiação, de modo que os interferentes correspondentes, combinados com o MF, são capazes de detectar um campo magnético. Para medição de campo magnético fraco, o ponto chave é melhorar a sensibilidade do RI do MZ (YAO et al, 2014).

2.2 Fundamentação teórica

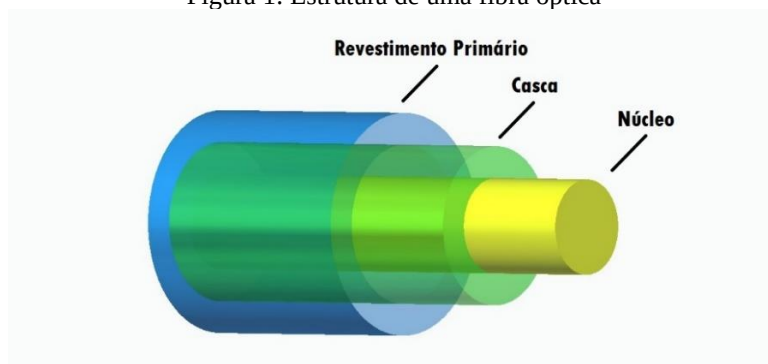
2.2.1. Fibra óptica

A fibra óptica é um meio por onde radiações luminosas são guiadas e transmitidas até um destino. Seu desenvolvimento teve início nos anos 1960, visando aplicações em endoscópios e avançou brutalmente até os dias atuais, em que é possível aplicá-las nos mais variados projetos inclusive em sistemas de transmissão de dados em longas distâncias sem perdas significativas de sinal. (GRATTAN & SUN, 2000).

Segundo GAMBLING (1976) uma fibra óptica consiste em um núcleo cilíndrico envolvido por uma casca com índice de refração menor, e são usadas para transmitir sinais de luz principalmente a longas distâncias.

Uma fibra típica é constituída de três regiões, a saber: revestimento primário, casca e núcleo. Conforme é apresentado na figura 1.

Figura 1: Estrutura de uma fibra óptica



Fonte: Adaptado por Bertoloto (2012)

As fibras ópticas podem ser classificadas, considerando os números de modos guiados, como monomodo e multimodo:

Monomodo: possuem um núcleo bastante pequeno, de fato, a maioria das fibras aplicadas telecomunicações são projetadas para terem um diâmetro em torno de 4 μm . Permitem a

transmissão de um único modo, e transmitem luz proveniente do uso de laser em diferentes comprimentos de onda. (AGRAWAL, 2002)

Multimodo: núcleo maior em comparação com as fibras monomodo, de tal forma que a luz tem vários modos de propagação, ou seja, a luz percorre o interior da fibra óptica por diversos caminhos e são, geralmente, alimentadas por LED's (Diodo Emissor de Luz).

A teoria eletromagnética estabelece que, quando uma onda eletromagnética incide na fronteira de separação do núcleo com a casca parte da energia pode retornar ao núcleo, e parte pode ser transferida para a casca, constituindo uma onda refratada.

Em uma fibra óptica o índice de refração do núcleo é maior que o da casca, existindo um ângulo de incidência limite (ângulo crítico) em relação à normal no qual faz com que um feixe de luz seja completamente refletido, não havendo transferência de potência para a casca (RIBEIRO, J., 1999)

2.2.2 Atenuação

Um dos mais importantes efeitos que ocorrem na propagação de luz em fibras ópticas, para o projeto de sistemas de comunicação, é a atenuação. A atenuação quantifica a perda de energia do sinal óptico durante a propagação. Considerando a potência óptica de entrada como sendo P_0 , a potência óptica de saída P_S , após propagar em uma fibra de comprimento L_T , (AGRAWAL, 1995). Pode ser escrita como:

$$P_S = P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot L_T) \quad (1)$$

Onde α é a constante de atenuação. Pela expressão (1) pode-se verificar que o decaimento da potência óptica segue uma lei exponencial. É usual que as perdas da fibra serem quantificadas em dB/km.

As perdas da fibra são dependentes de diversos fatores, nomeadamente da absorção, espalhamento nas fibras o campo óptico estende-se desde o núcleo até ao revestimento, sendo as perdas uma média verificadas em cada uma das camadas da fibra.

As perdas por absorção, podem ter origem nos seguintes fenómenos: a absorção intrínseca, a absorção extrínseca e a absorção por defeitos atômicos. A absorção intrínseca é uma característica do material utilizado, neste caso a sílica. A absorção intrínseca da sílica é inferior a 0.03 dB/km para comprimentos de onda entre os 1300 e os 1600 nm, e representa um limite fundamental (AGRAWAL, 1995).

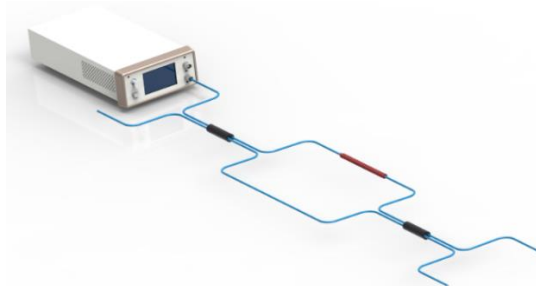
2.2.3 Dispersão

Um dos principais fatores que caracteriza o desempenho da transmissão por fibra ótica é a dispersão. A dispersão é responsável pelo alargamento dos sinais óticos que são transmitidos através da fibra ótica, e se os sinais viajarem uma grande distância é possível que exista interferência entre os diversos sinais, tornando a percepção dos sinais recebidos mais difícil, o que conduz a perdas de informação. A este fenómeno é comum designar-se por interferência intersimbólica. Em regime monomodal elimina-se a principal causa de dispersão em fibras óticas, a dispersão intermodal. Contudo, continua a subsistir uma fonte de dispersão intitulada dispersão cromática, intermodal ou usualmente dispersão de velocidade de grupo (DVG). Apesar de mais fraca que a dispersão intermodal, a DVG continua a causar grandes problemas nos sistemas de comunicação ótica. Esta dispersão resulta do facto dos diferentes componentes espectrais do sinal, que são transmitidos na fibra ótica, se propagarem com velocidades de grupo diferentes devido à variação do índice de refração do núcleo e da bainha com a frequência (PIRES, 2003).

2.3 Interferômetro de Mach-Zehnder

Observando a figura 2 abaixo é mostrada uma configuração de um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI – *Mach-Zehnder Interferometer*). Um feixe laser é dividido usando um acoplador a fibra ótica de 3 dB, isto é, metade da luz é injetada na fibra ótica sensora e metade na fibra ótica de referência. Os feixes de luz são recombinados utilizando um segundo acoplador a fibra ótica de 3 dB. O feixe combinado é detectado e, então, o deslocamento da fase é medido.

Figura 2: Estrutura básica Interferômetro de Mach-Zehnder em fibra ótica



Fonte: do próprio autor

O MZI descrito na figura 2, pode ser analisado analiticamente considerando um sinal óptico de entrada A_0 que é dividido no primeiro acoplador (componente 2 – acoplador 3 dB),

este é descrito matematicamente por meio da equação 2. Os dois sinais divididos A_{10} e A_{20} propagam-se por ambos os braços do MZI e podem ser descritos no final dos braços como apresentados nas equações (3) e (4), respectivamente sendo considerados os efeitos lineares e não-lineares (AGRAWAL, 2001).

$$\begin{pmatrix} A_{10} \\ A_{20} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\rho_1} & i\sqrt{1-\rho_1} \\ i\sqrt{1-\rho_1} & \sqrt{\rho_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$A_1 = \sqrt{\rho_1} A_0 \exp(i\beta_1 L_1 + i\rho_1 \gamma |A_0|^2 L_1) \quad (3)$$

$$A_2 = i\sqrt{1-\rho_1} A_0 \exp[i\beta_2 L_2 + i(1-\rho_1)\gamma |A_0|^2 L_2] \quad (4)$$

Onde L_1 é o comprimento do braço do MZI com o elemento sensor (nanopartículas), L_2 é o comprimento do outro braço, ρ_1 é a razão de divisão do acoplador e γ é o parâmetro de não-linearidade da fibra óptica. β_1 e β_2 são as constantes de propagação para os dois braços do MZI, e γ é o parâmetro de não linearidade da fibra ótica (AGRAWAL, 2001).

Considerando o segundo acoplador com razão de divisão sendo ρ_2 , a transmissividade do MZI é descrita pela equação

$$T_s = \rho_1 \rho_2 + (1 - \rho_1)(1 - \rho_2) - 2[\rho_1 \rho_2 (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)]^{\frac{1}{2}} \cos(\phi_L + \phi_{NL}) \quad (5)$$

$$\text{Com } \phi_L = \beta_1 L_1 - \beta_2 L_2, \quad \phi_{NL} = \gamma P_0 [\rho_1 L_1 - (1 - \rho_1) L_2],$$

Onde ϕ_L e ϕ_{NL} são fases lineares e não lineares, e P_0 é a potência da fonte de luz. Para os acopladores consideramos $\rho_1 = \rho_2 = 0,5$ e $\phi_{NL} = 0$. A não-linearidade pode ser desprezada pois além da baixa potência óptica (0.5 mW), parâmetro de não-linearidade pequeno, da ordem $3W^{-1}km^{-1}$, o dispositivo tem tamanho reduzido. Assim, a partir de (5) e com as considerações acima elencadas a transmissividade do MZI pode ser descrita na equação (6).

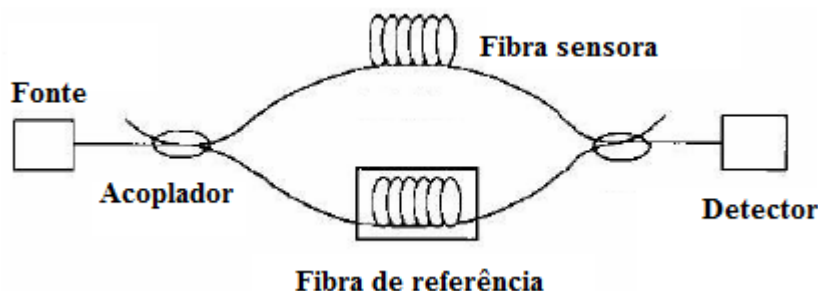
$$T_s = \sin^2\left(\frac{\phi_L}{2}\right) \quad (6)$$

2.3.1 Sensores de fibra óptica baseados no interferômetro de Mach-Zehnder

A figura 3 mostra um tipo de fibra utilizada Mach-Zehnder sensor de fibra óptica baseado em interferômetro. O interferômetro consiste em dois braços: o braço de detecção e o

braço de referência. A luz que vem proveniente de uma fonte de luz coerente é dividida em dois feixes de intensidade igual por uma Acoplador direcional fibra óptica de 3dB. A parte é enviada através do braço de fibra sensível, e o restante é enviado através do braço de referência. Depois de passar através da bobina de fibra sensora e de referência, a saída dessas duas fibras é recombinada pela segunda fibra. Assim, um sinal de interferência entre os dois feixes é então formado e detectado pela foto detector (YU & YIN, 2002).

Figura 3. Sensor de fibra óptica à base de interferômetro Mach-Zehnder



Fonte: adaptada por Gholamzadeh e Nabovati a (2008)

É importante observar que os sensores de fibras interferométricas são geralmente construídos usando fibras ópticas monomodo convencionais. Como a fibra de modo único convencional pode suportar dois modos e efeitos de polarização ortogonal, como curvatura pode ocorrer, a fibra torna-se birrefringente. Esse efeito pode resultar na alteração da visibilidade da interferência. Portanto, a relação sinal-ruído do sinal de detecção pode ser influenciada por birrefringência. (DAVIS, *et al* 2008.)

2.3.2 Classificação magnética dos materiais

O fenômeno de magnetismo resulta do movimento de cargas. No entanto, partículas elementares (elétrons) também têm um momento magnético intrínseco (*spin*), que determina o seu estado quântico. As propriedades magnéticas dos materiais surgem sobretudo do movimento orbital e do movimento de rotação de seus elétrons, outras contribuições como efeitos magnéticos nucleares, são minimizadas quando comparadas com o efeito eletrônico (SCHMID, 2010, p. 271).

Apesar das propriedades magnéticas serem associadas aos materiais metálicos (principalmente o ferro) todas as substâncias as possuem, porém em escala variável. Considerando esta análise, existem 5 classificações possíveis (FARIA e LIMA, 2005):

A) Materiais ferromagnéticos: Possuem campos magnéticos de origem atômica que se alinham paralelamente ao campo aplicado externamente, criando um campo magnético

total dentro do material muito maior do que o aplicado. Acima de uma temperatura crítica conhecida como temperatura de Curie o material se torna paramagnético. Exemplos são o ferro, cobalto e níquel.

B) Materiais ferrimagnéticos: Os materiais ferrimagnéticos possuem dois tipos diferentes de íons magnéticos que se orientam antiparalelamente, mas, como existem dois tipos de íons com momentos magnéticos bem distintos, a magnetização resultante não é nula. A resultante magnética é naturalmente inferior à do ferromagnetismo, mas ainda assim, encontram-se aplicações práticas para estes materiais chamados de ferrites. Um outro exemplo de material ferrimagnético é a magnetita.

C) Materiais antiferromagnéticos: Nos materiais antiferromagnéticos, existe uma interação de troca entre átomos vizinhos que força os momentos magnéticos a assumir orientações antiparalelas e, portanto, as substâncias com este comportamento apresentam um magnetismo externo muito pequeno ou mesmo nulo. Exemplos são o óxido de manganês e óxido de ferro (FeO).

D) Materiais Diamagnéticos: Materiais diamagnéticos não apresentam um momento magnético externamente, ou seja, pólos magnéticos como um ímã permanente, mas, quando submetidos a um campo externo, sempre respondem com uma tendência de se afastarem da região em que este campo é mais forte e, por este motivo, diz-se que possuem magnetismo negativo. Quando na presença deste campo produzem seu próprio campo magnético, mas sempre com uma polaridade oposta. Neste aspecto diferem completamente dos ímãs permanentes que além de possuírem um campo magnético próprio mesmo na ausência de um campo externo, podem ser atraídos ou repelidos pelo campo magnético, de acordo com sua polaridade magnética. Exemplos de materiais diamagnéticos são o cobre e o hélio.

E) Materiais Paramagnéticos: Estes materiais se tornam magnetizados na mesma direção do campo magnético aplicado e a quantidade de magnetização é proporcional ao campo magnético aplicado. Os efeitos são difíceis de serem medidos exceto em situações de temperaturas extremamente baixas ou campos magnéticos de alta intensidade. Exemplos são o alumínio e o sódio.

2.3.3 Nanopartículas ferrita de níquel

A ferrita de níquel (NiFe_2O_4) é um dos mais importantes materiais magnéticos mole, com estrutura espinélio inverso, apresenta ferromagnetismo devido a rotação antiparalela dos íons Fe^{3+} do sítio tetraédrico e dos íons Ni^{2+} dos sítios octaédricos (PATANGE, 2010, p. 722). A

distribuição dos íons metálicos nos sítios influencia nas propriedades magnéticas, elétricas, ópticas do material. Essa distribuição é determinada pela relação tamanho dos interstícios e raio atômico dos íons, configuração eletrônica, energia eletrostática do sistema, que por sua vez depende do método de síntese, da temperatura de calcinação, do tamanho de cristalito ou grão (ARELARO, 2008, p. 13).

Nanopartículas magnéticas apresentam grande potencial de aplicação na área biomédica, por exemplo na busca por diagnósticos mais precisos onde nanopartículas estão sendo investigadas para aplicação como agente de contraste em exame de ressonância magnética (PANKHURST, 2003; FENG *et al.*, 2008)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Produção e Caracterização das Nanopartículas

As nanopartículas utilizadas neste trabalho foram as de ferrita de níquel (NiFe_2O_4), caracterizadas utilizando difratômetro de pó da Panalytical, modelo Xpert Pro MPD, usando radiação CoK ($\lambda = 1,7891\text{\AA}$) e operando com 40 kV e 40 mA. A geometria usada foi de feixe paralelo, composta por um espelho focalizante, um monocromador *channel-cut* de Ge e uma fenda de $1/8^\circ$. O porta amostra foi montado em um *spinner* para melhorar a estatística dos cristalitos e a geometria do feixe difratado consiste de uma fenda *soller* de 0.02° . O intervalo em 2θ foi de 10° a 110° com passo de $0,013^\circ$ e contando 197 segundos por ponto.

O tamanho do cristalito foi calculado usando a Equação de Scherrer (1918) descrita na equação (7).

$$D = \frac{K\lambda}{\Gamma \cos \theta} \quad (7)$$

Em que D é o tamanho do cristalito, K é um parâmetro que depende da orientação relativa do vetor de espalhamento para a forma externa do cristalito Γ é a largura total a metade do máximo do pico de difração e θ é o ângulo de Bragg (JAMES, 1962; LANGFORD, 1978)

A contribuição do aparato experimental para a largura do pico de difração foi obtida a partir do padrão de difração da amostra padrão SRM660b (LaB_6), fornecida pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST). A diferença entre o Γ do NiFe_2O_4 e LaB_6 foi usada na equação de Scherrer para obter o tamanho do cristalito (HOLZWARTH, 2011; JAMES, 1962).

A largura total no meio máximo foi obtida ajustando os picos de difração com uma função pseudo-Voight (THOMPSON, 1987).

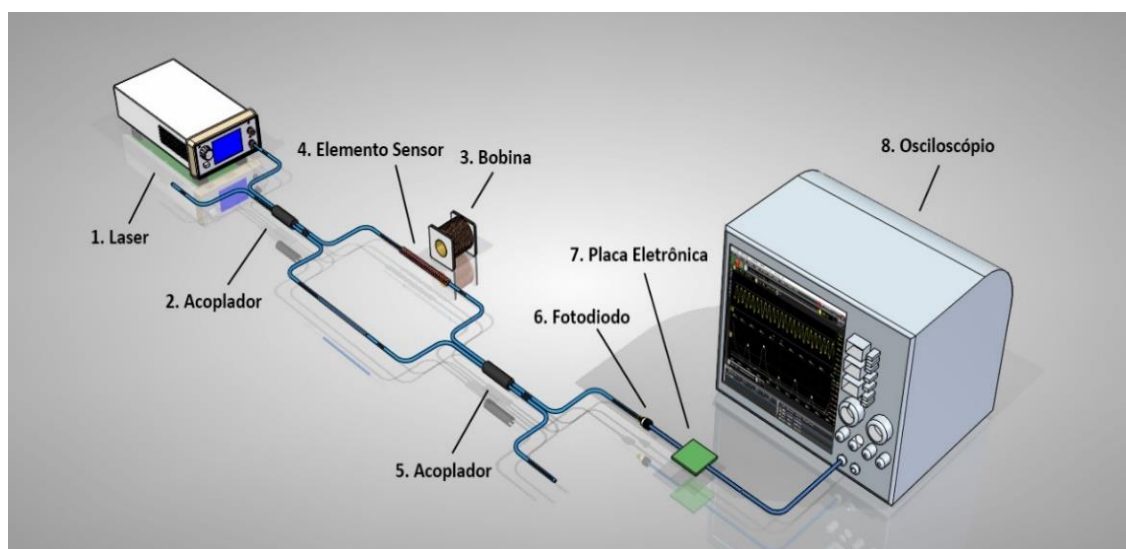
$$I(\Delta 2\theta) = I_0 \left\{ \frac{2\eta}{\pi\Gamma} \left[1 + 4 \left(\frac{\Delta 2\theta}{\Gamma} \right)^2 \right]^{-1} + \frac{1}{(1-\eta)(2/\Gamma)(\ln 2/\pi)^{1/2} \times \exp[-4 \ln 2 (\Delta 2\theta/\Gamma)^2]} \right\} \quad (8)$$

Em que I é a intensidade, I_0 é a intensidade integrada, $\Delta 2\theta = 2\theta - 2\theta_B$, θ é o ângulo de incidência, θ_B é o ângulo de Bragg e η é um parâmetro de mistura.

3.2 Descrição do Setup Experimental

O sensor é composto por um interferômetro de Mach-Zehnder, como apresentado na figura 4. A fonte LASER (componente 1), apresentada na figura, possui comprimento de onda de 1550 nm e potência óptica de 0.5 mW. O sinal óptico é dividido por um acoplador 1 (componente 2) de 3 dB. Os sinais provenientes do acoplador 1 propagam-se nos dois braços de fibra óptica, sendo o braço 1 constituído pelo elemento sensor, este sendo um pedaço de fibra envolta por nanopartículas e, o braço 2 sendo uma fibra óptica convencional. Os sinais provenientes de ambos os braços são acoplados no acoplador 2 (componente 5) e analisados na saída do interferômetro. O sinal detectado no fotodiodo (componente 6) é tratado na placa eletrônica com um circuito específico elaborado para o tratamento do sinal, e analisado no osciloscópio (componente 8). O campo magnético é gerado através da passagem da corrente elétrica variável em uma bobina (componente 3), a componente 3 faz com que o elemento sensor (componente 4) module seu sinal através do campo magnético.

Figura 4. Configuração do MZI óptico para sensoriamento de corrente e campo magnético variável.



Fonte : do próprio autor

Para análise do sinal foram estabelecidas as seguintes especificações no osciloscópio: tensão 1V/div, tempo de 20 ms, FFT de 10 dB e -5 dBm.

Na execução do experimento proposto foram realizados os seguintes procedimentos: (1) Para uma distância fixa entre a bobina e o elemento sensor, foi variada a corrente de 1.0 a 5.0 A num passo de 0.5 A; (2) O experimento foi repetido para várias distâncias num intervalo de 5.0 a 9.0 cm num passo de 1.0 cm. O sinal obtido no osciloscópio foi analisado no regime do tempo e da frequência.

CAPÍTULO 4

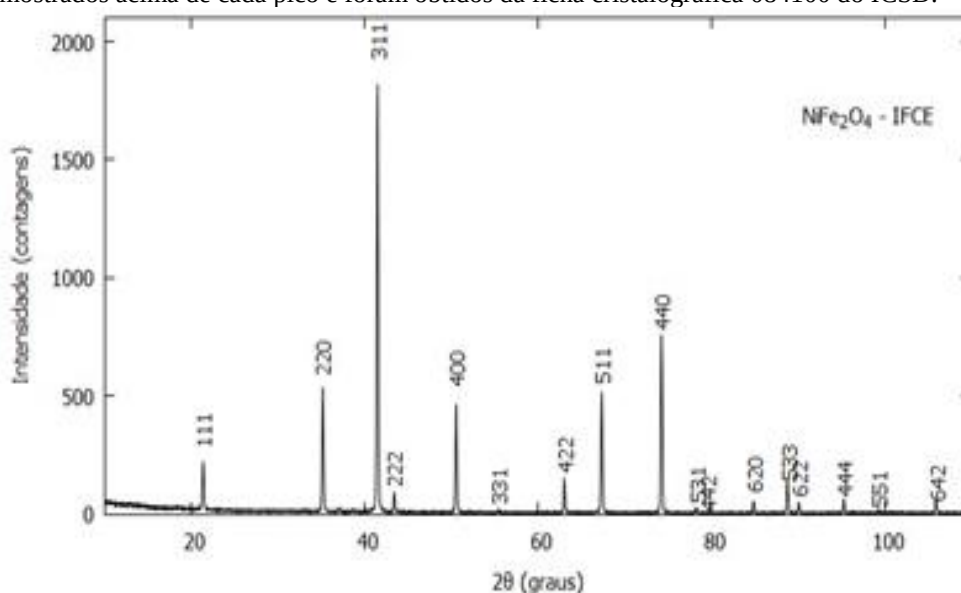
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo é apresentado e discutido os principais resultados referentes as medições de corrente elétrica e campo magnético alternados

4.1 Caracterização das Nanopartículas

Inicialmente, as nanopartículas de produzidas foram caracterizadas por meio da difração de raios-X. Através da realização do difratograma da amostra das nanopartículas, e analisando os picos de difração apresentados na figura 5, foi revelado apenas uma fase cristalina, o NiFe_2O_4 , ICSD-084100.

Figura 5: Difratograma da amostra de NiFe_2O_4 utilizada. Os índices de Miller são mostrados acima de cada pico e foram obtidos da ficha cristalográfica 084100 do ICSD.



Fonte : do próprio autor

O tamanho de cristalito, calculado pela equação de Scherrer (equação 7), revelou que o tamanho médio de cristalito foi de $72 \text{ nm} \pm 13 \text{ nm}$. Esse resultado foi obtido ajustando-se individualmente cada pico de difração com uma função pseudo-Voigt simétrica (equação 8). O valor da largura determinado pelo ajuste foi corrigido pela subtração da largura instrumental obtida com o padrão SRM660b (LaB6) do NIST 1 e inserida na equação de Scherrer (HOLZWARTH, 2011; JAMES, 1962). Os dados obtidos do ajuste de curva e os tamanhos de cristalitos individuais estão listados na Tabela 1.

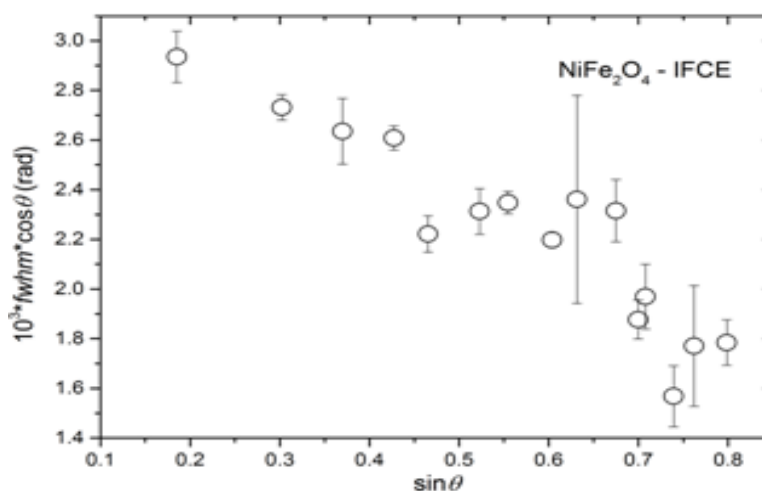
Tabela 1: Dados utilizados no cálculo do tamanho de cristalito, D, usando a equação de Scherrer. β é a largura a meia altura do pico de difração e está em graus.

2 θ (graus)	β_{Amostra}	β_{LaB6}	$\beta_{\text{Corrigido}}$	D (nm)
21,346	0,192	0,08709	0,17111	5,364,295
35,173	0,186	0,08745	0,16416	5,764,238
43,149	0,185	0,08839	0,16252	5,974,075
50,564	0,188	0,08963	0,16526	6,036,318
55,46	0,17	0,09068	0,14379	7,087,001
63,057	0,181	0,09266	0,15548	6,806,196
67,37	0,187	0,09396	0,16168	6,704,865
742,765	0,185	0,09631	0,15796	7,163,452
78,301	0,2	0,09782	0,17445	6,667,665
84,901	0,206	0,10052	0,17981	6,798,757
88,811	0,182	0,10226	0,15055	8,386,441
90,12	0,19	0,10287	0,15974	799,391
95,325	0,17	0,10539	0,13339	10,040,743
99,275	0,19	0,10745	0,1567	8,888,324
105,96	0,203	0,11121	0,16982	882,168

Fonte : do próprio autor

Na análise por Williamson-Hall, o gráfico de Williamson-Hall (WILLIAMSON, 1953; HALL, 1949) mostrado na Figura 6 não pode ser ajustado por uma reta com inclinação positiva, logo não foi possível obter informações de microdeformação com esse método (MANIAMMA, 2017; ZHAO & ZHANG, 2008

Figura 6: Gráfico de Williamson-Hall para a amostra de NiFe₂O₄ utilizada.



Fonte : do próprio autor

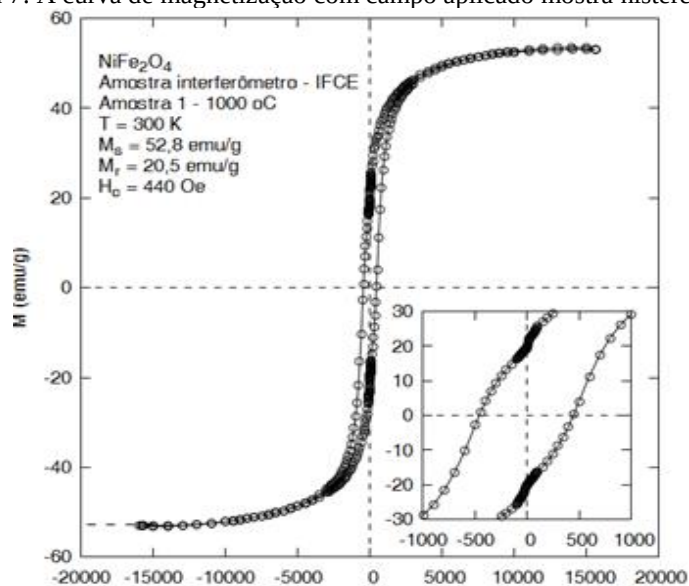
A curva de magnetização em função do campo aplicado, apresentada na figura 7, onde M_s - magnetização de saturação, M_r - magnetização remanente, H_c - campo coercivo, H - campo aplicado e M - magnetização, da amostra de NiFe_2O_4 , apresenta histerese, dessa forma, as nanopartículas obtidas não são amostras superparamagnéticas. Por outro lado, a sua magnetização de saturação foi muito próxima a do *bulk*, este sendo o tamanho padrão para designar a magnetização de saturação. Na tabela 2, são apresentados as características de nanopartículas de NiFe_2O_4 obtidas em outros trabalhos e as nanopartículas deste trabalho. A magnetização de saturação foi de 52,8 emu/g, próxima ao valor da magnetização de saturação do *bulk* que é de 50,0 emu/g.

Tabela 2: Comparação das propriedades magnéticas da ferrita de níquel desse trabalho com a literatura. O valor da magnetização de saturação (M_s) é muito próxima a do *bulk*.

T (° C)	D (nm)	M_s	H_s	Ref	Autoria
1000	72	52,8	550	Sol-gel protéico	Esse trabalho
1000	69,5	40	110	Sol-gel protéico	NOGUEIRA, 2013
550	51	29,05	51	Tratamento térmico	NASERI, 2011
800	48	35	144	Combustão	PHATADARE, 2012
700	107	42,5	32	Sol-gel eggwhite	MAENSIRI, 2007
-	Bulk	50	-	-	CULLITY, 2009

Fonte : do próprio autor

Figura 7: A curva de magnetização com campo aplicado mostra histerese



Fonte : do próprio autor

Para análise do campo magnético e correlação com a resposta do sensor, foi utilizado um equipamento Gaussímetro para medir campo magnético gerado pela corrente. A tabela 3 apresenta os valores dos campos magnéticos em função da corrente na bobina e a distância do elemento sensor à fonte de campo magnético. Observa-se que o intervalo de valores para o campo magnético foi de 463,17 μT a 1370,4 μT .

Tabela 3: Campo magnético em função da corrente elétrica

Campo Magnético [μT]					
	5 cm	6 cm	7 cm	8 cm	9 cm
1A	745,29	661,01	586,263	519,97	461,17
2A	1462,3	1284	1127,47	990,03	869,34
3A	1465,4	1325,93	1199,75	1085,6	982,27
4A	2123,2	1902,01	1703,89	1526,4	1367,4
5A	2144,9	1917,63	1714,44	1532,8	1370,4

Fonte : do próprio autor

4.2 Sensor MZI

Na figura 8, é apresentado o sinal na saída do sensor no tempo a partir do *setup* experimental para uma corrente de 5A. Na ausência da corrente elétrica na bobina e, consequentemente ausência de campo magnético, o sinal de saída não apresenta modulação, entretanto, com a presença de corrente elétrica alternada na bobina o campo magnético gerado modula o sinal óptico. A modulação é alcançada pela interferência entre os dois campos ópticos, o sinal óptico que atravessa o braço sensor e o sinal óptico que se propaga pelo braço de referência. A fibra do braço sensor contém nanopartículas paramagnéticas, estas vibram na presença do campo magnético e, consequentemente, faz com que a fibra óptica oscile também. A vibração faz da fibra óptica faz com que o sinal óptico no braço sensor percorra caminhos ópticos adicionais em relação ao sinal óptico no braço de referência, modificando o perfil de transmissão do interferômetro de Mach-Zehnder. O sinal modulado tem o comportamento de um sinal retificado com frequência com dobro da frequência da corrente elétrica, sendo neste caso 120 e 60 Hz, respectivamente. No entanto aparecem outras frequências devido a estrutura mecânica experimental que gera harmônicos em outras frequências. Na figura 8, é apresentado na parte superior o sinal modulado no domínio do tempo, onde tem-se a duração temporal sinal de aproximadamente 8,3 ms. Na parte inferior da

figura é apresentado o sinal no domínio da frequência, onde observa-se o pico do sinal na frequência de 120 Hz.

Na figura 8 é apresentado o gráfico em relação a saída do sensor para a corrente injetada na bobina de 5 A com a distância de 5 cm da bobina como descrito na figura 4.

Figura 8: Resposta do sensor no domínio do tempo e da frequência para uma corrente de 5 A e 5 cm.

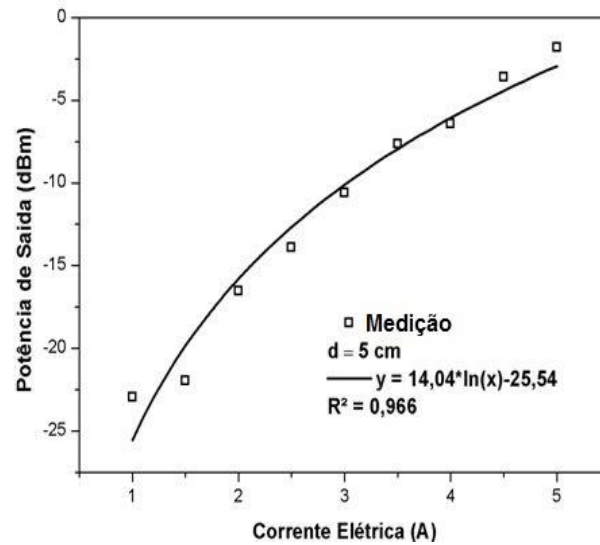


Fonte : do próprio autor

Os gráficos da resposta do sensor, relativo a intensidade óptica de saída em função da corrente foram obtidos considerando as distâncias de 5, 6, 7, 8 e 9 cm, sendo estas a distância entre o braço sensor (com nanopartículas) e a bobina, com uma variação de corrente alternada injetada na bobina de 1 a 5 A, com passo de 0,5 A. As análises foram realizadas considerando a frequência de 120 Hz, pois nesta frequência o sensor apresenta melhor sensibilidade, isto se deve ao fato da vibração do braço sensor (com adição das nanopartículas paramagnéticas) modular o sinal óptico. O campo magnético é gerado pela corrente elétrica alternada da rede, cuja frequência é de 60 Hz. Entretanto, como a fibra óptica é sempre atraída pelo campo magnético devido a presença da nanopartícula, assim, o sinal óptico obtido tem dobro da frequência da rede elétrica, ou seja, 120 Hz.

Na figura 9 é apresentada a resposta do sensor, a partir da potência de saída em dBm, em função da corrente elétrica de 1 a 5 A para uma distância fixa de 5 cm. Nesta distância, o sensor apresentou uma variação potência de 21,143 dB, considerando a menor (1 A) e a maior corrente (5 A), demonstrando a precisão na medida do sensor. Foi levantada uma curva de regressão, onde foi obtido $R^2 = 0.966$ com curva resposta representada por $y = 14,4 \cdot \ln(x) - 25,54$.

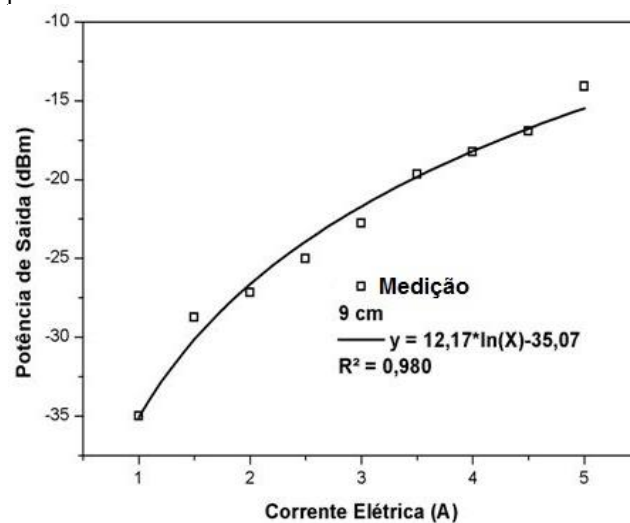
Figura 9: Resposta do sensor óptico com relação a potência de saída [dBm] em função da corrente (A) para a distância de 5 cm.



Fonte: do próprio autor

Na figura 10 é apresentada a resposta do sensor óptico em função da corrente para a distância máxima analisada de 9 cm. Foi possível perceber uma redução da potência em relação ao gráfico representado na figura 6 (5 cm), pois o aumento da distância reduz a intensidade do campo magnético. Quando considera-se, por exemplo, o resultado para a corrente de 5 A (-14,098 dBm), é obtido uma diferença de 12,296 dB em comparação com a mesma corrente quando a distância é de 5 cm (-1.802 dBm). A curva de regressão levantada forneceu $R^2 = 0,980$, com variação da tensão no fotodiodo de 20,891 dB, considerando a menor e maior corrente, e curva de resposta apresentada de $y = 12,17 \cdot \ln(x) - 35,07$.

Figura 10: Resposta do sensor óptico com relação da potência de saída [dBm] em função da corrente elétrica (A) para a distância de 9 cm.



Fonte : do próprio autor

A fibra óptica foi fixada em duas hastes com espaçamento de 5 cm entre elas. Com esta configuração foram obtidos os melhores resultados em relação a outras distâncias de separação. Com a diminuição do espaçamento entre as hastes, a fibra ficava cada vez mais fixa o que ocasionava mais rigidez à mesma, reduzindo de forma perceptível sua flexibilidade para vibrar com a presença do campo magnético gerado pela bobina.

Na tabela 4 são apresentados os resultados para as diferentes distâncias entre o elemento sensor e a bobina. São apresentadas as variações das potências no fotodiodo quando aplicadas a menor e a maior corrente (ΔV), a função de regressão e o coeficiente de correlação (R^2). É possível perceber que as diferenças das potências para as cinco distâncias fixadas entre o elemento sensor e a bobina permanecem praticamente inalterada, entretanto as intensidades dos sinais ópticos variam consideravelmente.

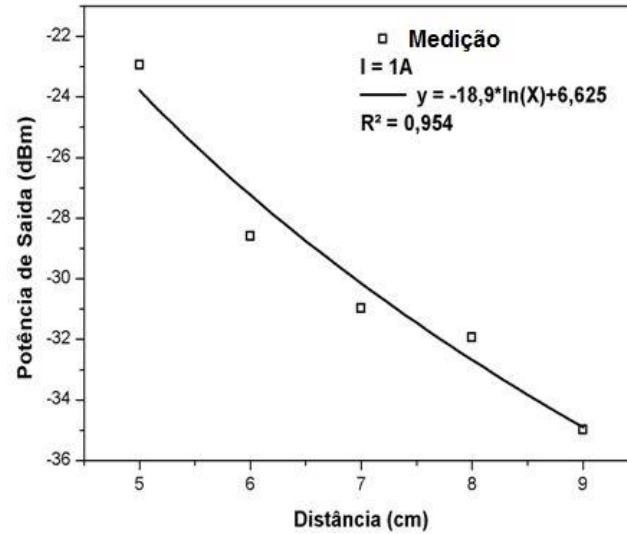
Tabela 4: Resultados do sensor para as medidas realizadas em função da distância.

Distância [cm]	ΔV [dB]	Função logarítmica	R^2
5 cm	21,143	$y = 14,04\ln(x) - 25,54$	0,966
6 cm	22,873	$y = 15,59\ln(x) - 30,96$	0,975
7 cm	21,953	$y = 13,26\ln(x) - 31,25$	0,989
8 cm	20,614	$y = 12,67\ln(x) - 33,44$	0,969
9 cm	20,891	$y = 12,17\ln(x) - 35,07$	0,980

Fonte : do próprio autor

Na figura 11 é apresentado o gráfico da potência de saída em função da distância, onde a corrente elétrica foi fixada em 1 A. A distância entre a fibra com elemento sensor e bobina foi variada de 5 a 9 cm em um passo de 1,0 cm. É observado o decaimento da intensidade do sinal óptico em função da distância, com diferença de potência obtida de -12,044dB entre a mínima e máxima distância. É importante ressaltar que a curva de regressão traçada cuja equação corresponde a $y = -18,9\ln(x) + 6,625$ obtendo um coeficiente de correlação de $R^2 = 0,954$.

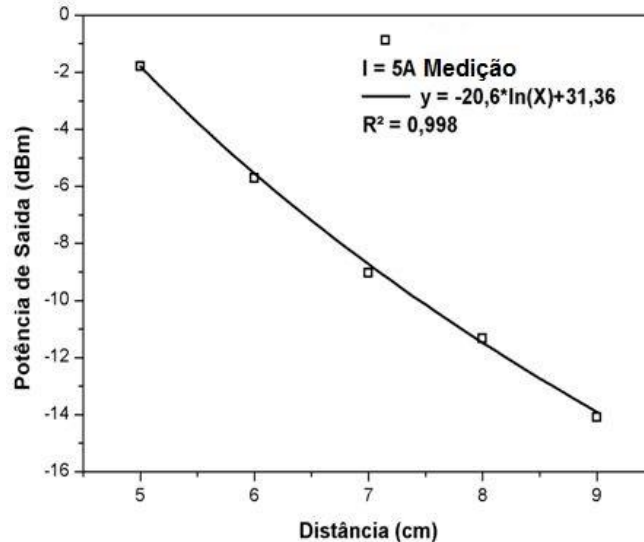
Figura 11: Resposta do sensor óptico em função da distância com corrente fixa em 1A.



Fonte : do próprio autor

Na figura 12, a corrente foi fixada em 5 A e a distância foi alterada de 5 cm para 9 cm. Ao analisar o gráfico, foi verificado uma diferença de potência de 12,296 dB entre as distâncias de 5 e 9 cm. Uma equação dada por $y = -20,6 \ln(x) + 31,36$ para a curva de regressão com $R^2 = 0,998$ foi obtida.

Figura 12: Resposta do sensor óptico em função da distância com corrente fixa em 5A.



Fonte: do próprio autor

Na tabela 5 estão representadas as medidas para todas as correntes consideradas. São apresentadas as variações das potências quando aplicadas a menor e a maior distância (ΔV), a função de regressão e o coeficiente de correlação (R^2).

Tabela 5: Resultados relativos a sensibilidade do sensor da potência de saída em função da distância.

Corrente [A]	ΔV [dB]	Função logarítmica	R^2
1,0	-12,044	$y = -18,9\ln(x) + 6,625$	0,954
1,5	-6,777	$y = -18,0\ln(x) + 11,79$	0,952
2,0	-10,650	$y = -18,0\ln(x) + 11,79$	0,952
2,5	-11,125	$y = -19,2\ln(x) + 17,57$	0,945
3,0	-12,193	$y = -20,6\ln(x) + 23,01$	0,992
3,5	-11,999	$y = -20,2\ln(x) + 24,77$	0,969
4,0	-11,838	$y = -21,1\ln(x) + 28,16$	0,988
4,5	-13,355	$y = -23,6\ln(x) + 34,70$	0,998
5,0	-12,296	$y = -20,6\ln(x) + 31,36$	0,998

Fonte : do próprio autor

Valores dos campos magnéticos em função da corrente na bobina e da distância do sensor.

4.3 Modelo matemático por aproximação e sensibilidade

Foi construído um modelo matemático por aproximação para analisar os resultados obtidos experimentalmente. O programa para fazer o ajuste de curvas para o modelo matemático foi o gnuplot, sendo ele um programa de linha de comando que pode plotar os gráficos de funções matemáticas em duas ou três dimensões, e outros conjuntos de dados. O programa pode ser executado na grande maioria dos computadores e sistemas operacionais (Linux, UNIX, Windows).

A potência de saída do sensor é formada por uma parte contínua (sinal DC) e uma parte alternada (sinal AC), sendo a parte AC com intensidade proporcional a corrente elétrica/campo magnético na bobina. A potência medida na saída do MZI é referente apenas ao sinal AC, e pode ser escrita como:

$$\Delta P = P - P_0 \quad (9)$$

Onde $P = P_{\max} \sin^2(\frac{\varphi_0}{2})$ é a potência total de saída (AC + DC) e $P_0 = P_{\max} \sin^2(\varphi_0/2)$ é apenas a componente DC, obtida quando $B = 0$. A potência máxima (AC + DC), obtida quando a interferência é completamente construtiva, é dada por $P_{\max}$.

Logo,

$$\Delta P = P_{max} \left\{ \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) - \sin^2 \left(\frac{\varphi_0}{2} \right) \right\} \quad (10)$$

A equação 10 é em função de φ , todavia os experimentos são em função de B , logo é preciso achar uma função do tipo $\varphi = f(B)$.

Supondo a seguinte função:

$$\varphi = 2p \cdot B^n + 2q \quad (11)$$

Podemos escrever a Equação 10 como:

$$\Delta P = P_{MAX} \left\{ \sin^2(p \cdot B^n + q) - \sin^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) \right\} \quad (12)$$

Como para $B = 0$ não há potência de AC na saída ($\Delta P = 0$), temos que $q = \frac{\varphi_0}{2}$.

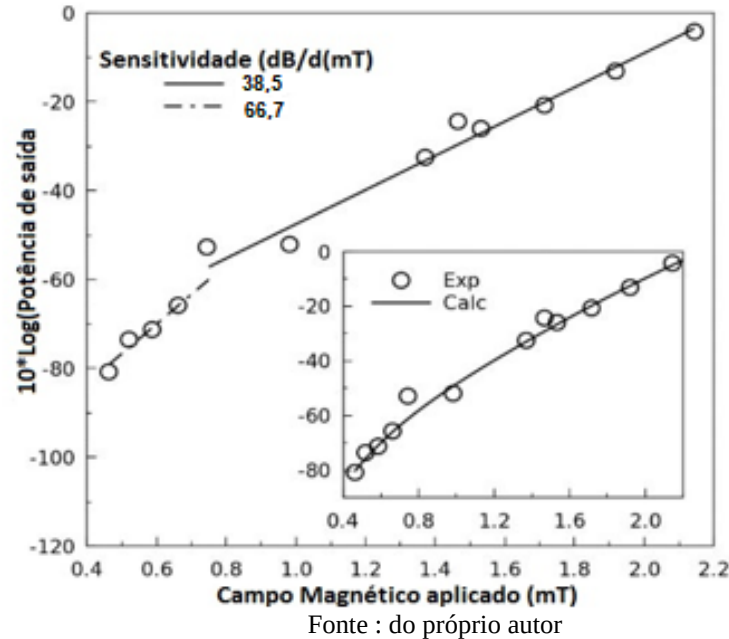
Consequentemente podemos reescrever a Equação 10 como:

$$\Delta P = P_{MAX} \left\{ \sin^2 \left(p \cdot B^n + \frac{\varphi_0}{2} \right) - \sin^2 \left(\frac{\varphi_0}{2} \right) \right\} \quad (13)$$

Para testar esse modelo basta aplicar a equação 11 aos dados experimentais, onde os parâmetros de ajuste são P_{max} , p , n e φ_0 . Para várias combinações de A , p e φ , o valor de n sempre atinge cerca de 3,9. Portanto, como os valores numéricos de A , p e φ_0 não têm significado físico, o expoente n indica que a variação da fase com o campo é $\varphi \propto B^{3.9}$.

A figura 13 mostra a variação da potência de saída em função do campo magnético aplicado. Este gráfico revela duas regiões lineares. A inclinação desse gráfico pode ser considerada uma medida da sensibilidade do sensor, pois fornece a variação na saída por variação na entrada.

Figura 13: Sensibilidade como função do campo magnético aplicado. Em destaque o gráfico apresenta uma sensibilidade medida (experimento) e calculada.



Também foi calculado a sensibilidade teórica, a partir do modelo teórico descrito pela equação 5. O gráfico maior descreve a sensibilidade obtida experimentalmente, onde 38,5 e 66,7 dB / mT representam a sensibilidade para campos menores e maiores, respectivamente. O gráfico menor apresenta os valores para a sensibilidade obtida experimentalmente e a sensibilidade calculada, onde observa-se que o modelo teórico está de acordo com os resultados obtidos experimentalmente. Ainda destaca-se que o sensor proposto neste trabalho é mais sensível ao campo magnético aplicado para campos com menor intensidade, especificamente para campos menores que 0,75 mT.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Utilizando o interferômetro de fibra óptica Mach-Zehnder e nanopartículas paramagnéticas de ferrita de níquel (NiFe_2O_4), foi demonstrado um sensor de corrente elétrica alternada e campo magnético. As curvas de resposta do sensor apresentaram bons coeficientes de correlação considerando a função de regressão logarítmica, tanto em relação à variação de corrente e campo magnético quanto à variação da distância.

Quanto à variação do sinal de saída do sensor, foi obtido variações de aproximadamente 20 dB de potência com o aumento do campo magnético.

Também foi analisado a redução da intensidade do sinal óptico na saída do sensor, aumentando a distância entre o sensor e o elemento gerador do campo magnético (bobina).

O sensor apresenta sensibilidade de 38,5 dB / mT para campos magnéticos abaixo de 0,75 mT e 66,7 dB / mT para campos acima deste valor. Um modelo matemático teórico por aproximação foi desenvolvido para modelagem dos dados experimentais, onde verificou-se que o modelo para a resposta em função do campo magnético como $B^{3.9}$ está de acordo com os resultados experimentais.

O sensor destaca-se quanto aos aspectos estruturais, considerando que as nanopartículas são de baixo peso e tamanho pequeno. Portanto, podemos aplicá-lo em diversas aplicações, representando assim uma forte alternativa para a detecção de campos magnéticos e correntes alternadas em muitos campos.

5.2 Perspectiva de Trabalhos Futuros

Como perspectivas para trabalhos futuros, apresentamos as seguintes propostas:

Aperfeiçoar o sensor quanto sua estrutura mecânica com base na experiência e nos resultados já obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONIO-LOPEZ, J. E. et al. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter. **Optics Letters**, [s.l.], v. 35, n. 3, p.324-326, 25 jan. 2010. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.35.000324>.

ANTONIO-LOPEZ, J. E. et al. Fiber-optic sensor for liquid level measurement. **Optics Letters**, [s.l.], v. 36, n. 17, p.3425-3427, 29 ago. 2011. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.36.003425>

AGRAWAL, G. P. **Nonlinear fiber optics**, Academic Press, San Diego, EUA, 1995.

AGRAWAL, G.P. **Applications of Nonlinear Fiber Optics**. [S.l.: s.n.], 2001.

AGRAWAL, Govind P. **Fiber-optic Communication Systems**, 3 ed. 2002

ARELARO, A. D., **Síntese e caracterização de nanopartículas magnéticas de ferritas**. Dissertação (Mestrado) – Depto. de Física dos Materiais e Mecânica. p. 89, USP, São Paulo, 2008.

BASTOS, A. M. et al. **Hybrid Opto-Mechanical Current Sensor Based on a Mach-Zehnder Fiber Interferometer**. Ieee Sensors Journal, [s.l.], v. 14, n. 4, p.1056-1060, abr. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jsen.2013.2293180>.

CULLITY, B. D.; Stock, S. R. Introduction to Magnetic Materials. 2. ed. New Jersey: John Wiley& Sons, Inc, 2009.

CAROME, E.F.; FISCHER, G.; KUBULINS, V. **Fiber-optic sensor system for hydrocarbon vapors**, Sensors and Actuators B: Chemical 13, 1-3 (1993) pp. 305- 308.

CASTILLO-GUZMAN, A. et al. Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect. **Optics Express**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.591-597, 4 jan. 2010. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/oe.18.000591>.

DAVIS C.M.; CAROME E.F.; WEIK M.H.; EZEKIEL S.; .EINZIG R.E. **Fiber optic sensors technology handbook**. Optical Technologies- A Division of Dynamic System INC. 2008

DAY, G.W. Recent advances in Faraday effect sensors, in *Optical Fiber Sensors*, Springer, Berlin, 1989, p. 250.

DONG, Shaohua; PU, Shengli; HUANG, Juan. Magnetic field sensing based on magneto-volume variation of magnetic fluids investigated by air-gap Fabry-Pérot fiber interferometers. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 103, n. 11, p.111907-111910, 9 set. 2013. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4821104>.

EL-KHOZONDAR, H.J.; MULLER, M.S.; EL-KHOZONDAR, R.J.; KOCH, A.W. **Magnetic field inhomogeneity induced on the magneto-optical current sensors**, Information Photonics 2011 ICO International Conference, Ottawa Convention Center, Canada, May 18–20, pp. 1–2, 2011.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais**. SãoPaulo, S.P., Editora Livraria da Física, 2005.

GAMBLING, W. A. *et al.* Special issue paper. Optical fibers based on phosphosilicate glass. **Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers**, [s.l.], v. 123, n. 6, p.570-576, 1976. Institution of Engineering and Technology (IET). <http://dx.doi.org/10.1049/piee.1976.0129>.

GANGOPADHYAY, T. K.; CHAKRAVORTI, S.; BHATTACHARYA,K.; CHATTERJEE, S. Wave let analysis of optical signal extracted from a non- contact fibre-optic vibration sensor using an extrinsic Fabry–Perot interferometer. **Meas. Sci. Technol.** v. 16, p. 1075–1082, 2005.

GRATTAN, K.T.V., SUN, T. Fiberoptic sensor technology: anoverview. **SensorsandActuators**. v. 82, p. 40–61, 2000.

GHOLAMZADEH, B; NABOVATI, H. **Fiber Optic Sensors**. World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 42, p. 297-298, 2008.

HADHIPANAYS, G.C.; PRIZE, G.A. **Science and Technology of Nanostructured Magnetic Materials**. 1. ed. New York: Springer US, 1991. 720p.

HASTINGS, M. C.; CHIU, B.; NIPPA, D. W. Engineering the development of Optical Fiber Sensors for adverse environments. **Nuclear Engineeringand Design**. v. 167, p. 239-249,1997.

HALL, W. H. **X-Ray line broadening in metals. Proceedings of the Physical Society.** Section A, v. 62, n. 11, p. 741–743, 1949. ISSN 0370-1298.

HOLZWARTH, U.; GIBSON, N. **The Scherrer equation versus the 'Debye-Scherrer equation'.** *Nature nanotechnology*, v. 6, n. 9, p. 534, 2011. ISSN 1748-3387.

HONG, Chin-yih et al. Evidence of multiple states of ordered structures and a phase transition in magnetic fluid films under perpendicular magnetic fields. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 75, n. 15, p.2196-2198, 11 out. 1999. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.124962>.

JAMES, R. W. **The optical principles of the diffraction of x-rays.** London: G Bell and Sons Ltda, 1962. II. (The Crystalline State, II).

JENKINS, A.F.; WHITE, E.H. **Fundamental of optics**, New York: McGraw-Hill Book Company, 1953, pp. 597–598.

Jl, H. et al., “Magnetic field sensing based on capillary filled with magnetic fluids,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 27, pp. 6528–6538, Sep. 2012.

Jl W B, LIU H H, TJIN S C, CHOW K K and LIM A 2012 Ultrahigh sensitivity refractive index sensor based on optical microfiber *IEEE Photonics Technol. Lett.* 24 1872

KLEMB, F.; KAMIKAWACHI, R. C.; ROSADO, R.; KULLER, F.; MÜLLER, M.; FABRIS, J. L. Sensores A Fibra Ótica Para Detecção De Hidrocarbonetos E Monitoração Da Temperatura Em Polidutos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., Salvador. **Anais** v. 1. p. 1-9.2005.

LAN, X. et al. Fiber ring laser interrogated zeolite-coated singlemode-multimode-singlemode structure for trace chemical detection. **Optics Letters**, [s.l.], v. 37, n. 11, p.1998-2000, 30 maio 2012. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.37.001998>.

LANGFORD, J. I. & WILSON, J. C. SCHERRER after Sixty Years: A Survey and Some New Results in the Determination of Crystallite Size. 11, 102-113. 1978.

LANGENHORST, R., EISELT, M.; PIEPER, W., GROSSKOPF, G., LUDWIG, R.; KULLER, L.; et al. **Fiber loop optical buffer**, *J. Lightw. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 324–335, Mar. 1996.

LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. **Optical Fiber Technology**. v.9, p. 57–79, 2003.

LENZ J. A review of magnetic sensors. *Proc IEEE* 1990;78:973–89.

LI, G.; KONG, M. **Sensitivity improvement of anoptical current sensor with enhance Faraday rotation**, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 12, pp.2246–2252, 1997.

LI, H-N.; LI, D-S.; S., G-B. **Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in engineering**, *Engineering Structures* 26, 11 (2004) pp. 1647-1657

LIM, K.S.; HARUN, S.W.; DAMANHURI, S.S.A.; JASIM, A.A.; TIO, C.K.; AHMAD, H. **Current sensor based on microfibre knot resonator**, *Sens. Actuators A, Phys.*, 2011, 167, (1), pp. 60–62

LIN, Wei et al. Fiber-optic in-line magnetic field sensor based on the magnetic fluid and multimode interference effects. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 103, n. 15, p.151101-151105, 7 out. 2013. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4824470>.

LIN, Wei; MIAO, Yinping; ZHANG, Hao. Two-Dimensional Magnetic Field Vector Sensor Based on Tilted Fiber Bragg Grating and Magnetic Fluid. **Journal Of Lightwave Technology**, [s.l.], v. 31, n. 15, p.2599-2605, ago. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jlt.2013.2271635>.

LIU, Zhi-bo et al. Refractive index sensing characterization of a singlemode–claddingless–singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser. **Optics Express**, [s.l.], v. 22, n. 5, p.5037-5042, 25 fev. 2014. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/oe.22.005037>.

LOEFFLER, F.J. **A Faraday rotation experiment for undergraduate physics laboratory**, *American Journal of Physics*, vol. 51, no. 7, pp. 661–663, 1983.

MAENSIRI, S. et al. A simple routeto synthesize nickel ferrite (nife2o4) nanoparticles using egg white. *ScriptaMaterialia*, v. 56, n. 9, p. 797–800, 2007.ISSN 13596462.

MANIAMMA, K.; MADHU, G.; BIU, V. **X-ray diffraction line profile analysis of nanostructured nickel oxide: Shape factor and convolution of crystallite size and microstrain contributions**.*Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, Elsevier, v. 85, p. 214–222, 2017. ISSN 13869477.

MAYSTRE, F.; BERTHOLDS, A. **Magneto-optic current sensor using a helical-fiber Fabry-Pérot resonator**, Opt. Lett., vol. 14, no. 11, pp. 587–589, Jun. 1989.

MESCIA, L. & PRUDENZANO F. “Advances on optical fiber sensors,” *Fibers*, vol. 2, no. 1, pp. 1–23, Dec. 2013

MOHAMMED, Waleed S.; SMITH, Peter W. E.; GU, Xijia. All-fiber multimode interference bandpass filter. **Optics Letters**, [s.l.], v. 31, n. 17, p.2547-2549, 9 ago. 2006. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.31.002547>.

NASERI, M. G. et al. Simple preparation and characterization of nickel ferrite nanocrystals by a thermal treatment method. *Powder Technology*, Elsevier B.V., v. 212, n. 1, p. 80–88, 2011. ISSN 00325910.

NELLEN, PH. M.; MAURON, P.; FRANK, A.; SENNHAUSER, U.; BOHNERT, K.; PEQUIGNOT, P.; BODOR, P.; BRÄNDLE, H. **Realiability of fiber Bragg based sensors for downhole applications**, *Sensors and actuators: A* 103 (2003) pp. 364-376.

NI, X.J.; HUANG M. **Faraday effect optical current/magnetic field sensors based on cerium-substituted yttrium iron garnet single crystal**, in *Proc. IEEE APPEEC*, Mar. 2010, pp. 1–4

NING, Y.N.; WANG, Z.P.; PALMER, A.W.; GRATTAN, K.T.V.; JACKSON, D.A. **Recent progress in optical current sensing techniques**, *Review Scientific Instrumets*, vol. 66, no. 5, pp. 3097–3111, 1995.

NOGUEIRA, N. A. S. Síntese, caracterização e aplicação de nanopartículas de NiFe₂O₄ produzidas via método sol-gel protéico. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2013.

PAIS.T., C.M.J. Luo and G.X. Zhang, Magneto-optical current sensors constructed with ZF glass, *Sensors and Actuators A*, 35 (1992) 107– 112.

PANKHURST, Q. A. *et al.*, **Applications of magnetic nanoparticles in biomedicine**. Institute of physics publishing, p. R167 - R181, V. 36, 2003.

PHATADARE, M. R. et al. Studies on polyethylene glycol coating on NiFe₂O₄ nanoparticles for biomedical applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Elsevier, v. 324,

n. 5, p. 770–772, 2012. ISSN 03048853.

PATANGE, S.M. *et al.*, **Rietveld refinement and switching properties of Cr³⁺ substituted NiFe₂O₄ ferrites**. Materials Letters, p. 722 - 724, v. 64, 2010.

PIRES, J., Fibras Ópticas, IST, 2003

RAHMATIAN, F. **High-voltage current and voltage sensors for a smarter transmission grid and their use in live-line testing and calibration**, presented at Power and Energy Society General Meeting IEEE, Minneapolis, Minnesota, USA, July 24–29, 2010.

RIBEIRO, Antonio B. L., “Sensores interferométricos em Fibra óptica”, Gaz. de Física 21, FASC. 1, pp 16-21, 1998.

ROGERS A.J., Optical-fiber current measurement, Int. J. Opt., 3 (1989) 391–407.

SCHERRER, P. Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 98-100, 1918.

SCHMID, G., **Nanoparticles – From theory to application**. Second Edition, Wiley – VCH, 2010.

SHI, Changhai *et al.* Stable dynamic detection scheme for magnetostrictive fiber-optic interferometric sensors. **Optics Express**, [s.l.], v. 14, n. 12, p.5098-5102, 2006. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/oe.14.005098>.

SOARES JUNIOR, F. H. **Efeitos de superfície nas propriedades magnéticas do nanocompositos de CoFe₂O₄/Ag**. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Física – UERN, 2012.

SULAIMAN, A. *et al* (2012). **DC current sensing capability of microfibre Mach- Zehnder interferometer**. *Electronics letters*, 48(15), 943-945.

THOMPSON, P.; Cox, D. E. and Hastings, J. B. Rietveld Refinement of Debye-Scherrer Synchrotron X-ray Data from Al₂O₃. J. Appl. Cryst. 20, 79-83, 1987.

TRIPATHI, S.m. *et al.* Strain and Temperature Sensing Characteristics of Single-Mode–Multimode–Single-Mode Structures. **Journal Of Lightwave Technology**, [s.l.], v. 27, n. 13,

p.2348-2356, jul. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jlt.2008.2008820>.

ZHAO, Y.; ZHANG, J. **Microstrain and grain-size analysis from diffraction peak width and graphical derivation of high-pressure thermomechanics**. Journal of Applied Crystallography, International Union of Crystallography, v. 41, n. 6, p. 1095–1108, 2008. ISSN 00218898.

ZHANG, Xiaobei et al. Refractometry With a Tailored Sensitivity Based on a Single-Mode-Capillary-Single-Mode Fiber Structure. **Ieee Photonics Journal**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.1-8, abr. 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jphot.2017.2690686>. ZU P, CHAN C. C., GONG T, JIN Y, WONG W. C. and DONG X. 2012 Magneto-optical fiber sensor based on bandgap effect of photonic crystal fiber infiltrated with magnetic fluid Appl. Phys. Lett. 101 241118

WANG, Z. P., LIU, X.Y. **Effects of linear birefringence inside sensing head upon bulk glass current sensors sensitivity**, Optics & Laser Technology, vol. 38, no. 3, pp. 177–182, 2006.

WANG H., PU S., WANG N., DONG S. and HUANG J. “Magnetic field sensing based on singlemode-multimode-singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding,” Opt. Lett., vol. 38, no. 19, pp. 3765–3768, Oct. 2013

WU, Qiang et al. High sensitivity SMS fiber structure based refractometer – analysis and experiment. **Optics Express**, [s.l.], v. 19, n. 9, p.7937-7944, 11 abr. 2011. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/oe.19.007937>.

WANG, Pengfei et al. Enhanced Refractometer Based on Periodically Tapered Small Core Singlemode Fiber. **Ieee Sensors Journal**, [s.l.], v. 13, n. 1, p.180-185, jan. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/jsen.2012.2216865>.

WANG, Haotian et al. Magnetic field sensing based on singlemode–multimode–singlemode fiber structures using magnetic fluids as cladding. **Optics Letters**, [s.l.], v. 38, n. 19, p.3765-3768, 19 set. 2013. The Optical Society. <http://dx.doi.org/10.1364/ol.38.003765>.

WERNECK, M. M.; Transdutores e Interfaces; Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos Editora S. A; 1996.

WILLIANSO, G. K.; HALL, W. H. **X-Ray line broadening from filed aluminium and wolfram**. ActaMetallurgica, v. 1, p. 22, 1953.

YANG, S. Y. et al. Origin and applications of magnetically tunable refractive index of magnetic fluid films. **Applied Physics Letters**, [s.l.], v. 84, n. 25, p.5204-5206, 21 jun. 2004. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1765201>.

YANG Y, KANG C, HUANG Z, ZHANG X, WANG D and LIU J 2010 The study of optical fiber ring interference weak magnetic field sensor 2010 Academic Symp. on Optoelectronics and Microelectronics Technology and 10th Chinese–Russian Symp. on Laser Physics and Laser Technology (RCSLPLT/ ASOT 2010) p 283

YU F., YIN S. **Fiber optic sensors**. Marcel-Dekker, 2002.

YAO, Qiqi et al. Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a core-offset Mach–Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating. **Sensors And Actuators A: Physical**, [s.l.], v. 209, p.73-77, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2014.01.017>.