



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Departamento de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

**Projeto de Transdutor de Corrente Elétrica para
Alta Tensão com nova abordagem de detecção
magnetostritiva e sensoriamento óptico, utilizando
Terfenol-D e grade de Bragg em fibra óptica.**

Alcides Oliveira Cremonezi
Orientador: Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**. Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente) — DEMIC/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. José Antônio Siqueira Dias — DEMIC/FEEC/UNICAMP
Prof. Dr. Antônio Heronaldo de Sousa — CCT/UDESC

Campinas – SP
Agosto 2011

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP**

C863p	<p>Cremonesi, Alcides Oliveira¹</p> <p>Projeto de transdutor de corrente elétrica para alta tensão com nova abordagem de detecção magnetostritiva e sensoriamento óptico, utilizando Terfenol-D e grade de Bragg em fibra óptica. Alcides Oliveira Cremonesi - Campinas, SP: [s.n.], 2011.</p> <p>Orientador: Elnatan Chagas Ferreira. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.</p> <p>1. Sensor óptico. 2. Correntes elétricas - Medição. 3. Transdutores. 4. Materiais inteligentes. 5. Energia elétrica - Distribuição - Alta tensão. I. Ferreira, Elnatan Chagas. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.</p>
-------	---

Título em Inglês: High voltage electric current transducer project, with innovative approach for magnetostrictive modulation and optical sensing using Terfenol-D and fiber Bragg gratings.

Palavras-chave em Inglês: Optical sensor, Electric current - Measurements, Transducers, Smart materials, Electrical energy - Distribution - High tension.

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: José Antônio Siqueira Dias, Antônio Heronaldo de Sousa

Data da defesa: 12/08/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

¹ Contato: alcides@demic.fee.unicamp.br; acremonezi@gmail.com

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Alcides Oliveira Cremonesi

Data da Defesa: 12 de agosto de 2011.

Título da Tese: “Projeto de Transdutor de Corrente Elétrica para Alta Tensão com Nova Abordagem de detecção magnetostritiva e sensoriamento óptico, utilizando Terfenol-D e grade de Bragg em fibra óptica”.

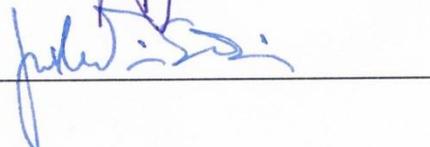
Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente):



Prof. Dr. Antonio Heronaldo de Sousa



Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias:



Resumo

Os sensores a fibra óptica são imunes à interferência eletromagnética (EMI), eles são normalmente encontrados em ambientes eletricamente ruidosos, especialmente em linhas de transmissão de alta voltagem. Essa é a característica principal que faz desse tipo de sensores ideais para empresas de Energia Elétrica.

Esse trabalho apresenta uma nova abordagem, de precisão moderada, robusta e de baixo custo, para a fabricação de um transdutor de corrente elétrica para alta tensão, com detecção magnetostritiva utilizando material inteligente, Terfenol-D, e sensoriamento óptico através de grade de Bragg em fibra óptica (FBG).

O núcleo magnético foi desenvolvido em formato toroidal e construído utilizando usinagem através de eletro-erosão, o que resultou em uma peça única com projeto mecânico robusto.

Aplicando compressão mecânica ao sensor toroidal e fazendo sua resposta ficar muito próxima a uma função quadrática, foi possível calcular o valor RMS da corrente diretamente do sinal de saída do sensor, e com isso, eliminar qualquer polarização magnética DC utilizada em técnicas anteriores reportadas na literatura.

Foi utilizada com sucesso, uma nova técnica de circuito eletrônico de interrogação que permite a medida de sinais AC e mantém o ponto de operação DC da FBG.

Resultados experimentais medidos com o transdutor óptico desenvolvido mostraram que entre correntes de aproximadamente 200 a 900A o erro observado foi de apenas 1,2% e sua dependência com a temperatura dentro de um range de 25 a 45°C mostrou erro máximo de 2%.

O sistema desenvolvido apresenta rápida resposta a transiente e precisa de somente 34ms para alcançar o estado estacionário quando submetido a um aumento de 150% da corrente nele medida.

Os resultados mostram que o projeto sugerido é adequado e muito promissor para a construção comercial de um transdutor óptico de corrente para alta tensão.

Palavras-chave: *Instrumentação eletrônica, Sensor de Corrente, Transdutor Óptico de Corrente, FBG, Fibra Óptica, Grade de Bragg, Alta Tensão, Magnetostricção, Toroidal, Terfenol-D.*

Abstract

Optical sensors are passives and immune to electromagnetic interferences (EMI), they are well suited for applications in electrically noisy environments, especially in high voltages transmission lines. This is the main characteristic that makes them ideal to electrical energy companies.

A new approach to the fabrication of, moderated precision, robust and low-cost fiber Bragg gratings (FBG) optical current transducers using a Terfenol-D magnetostrictive smart material is presented.

Electro-erosion was used to manufacture a magnetic core in a toroidal shape which resulted in a single piece robust mechanical design.

By applying mechanical compression to the toroidal sensor and making its response very close to a quadratic function, it is possible to calculate the RMS value of the current directly from the output of the sensor and eliminate the DC biasing magnetic field used in previous literature reported techniques.

A new electronic interrogation circuit technique which allows the measurement of AC signals and keeps the DC operation point of the FBG was implemented and successfully used in the prototype.

Experimental results measured in the developed optical current transducer showed that an error of 1.2% was achieved for currents over approximately the 200 to 900A range and its temperature dependence in a range of 25 to 45°C has showed a maximum error of 2%.

The developed system presents a fast transient response, and needs only 34ms to reach the steady state after a 150% amplitude step increase is applied to current being measured.

The results shows that the developed project is feasible and also very promisor to be considered on commercial applications.

Keywords: *Electronic Instrumentation, Current sensor, Optical Current Transducer, FBG, Optical Fiber, Fiber Bragg gratings, High Voltage, Magnetostriction, Toroidal, Terfenol-D.*

A toda a minha família, esposa, filhos, amigos e colegas...

*"Insanity is doing the same thing over and over again expecting different results."
"No problem can be solved from the same level of consciousness that created it..."
(Albert Einstein)*

Agradecimentos

A Deus, pela oportunidade de viver e aprender em todos os sentidos.

Aos meus pais Alcides e Audélia pela oportunidade de aqui estar vivendo e por todo apoio, amor e carinho dedicados a toda a minha existência e a dos meus irmãos.

Aos meus irmãos Alcyr e Alex pelo companheirismo e pela oportunidade de crescermos e evoluirmos juntos, tenho certeza que seremos sempre muito unidos.

Aos professores e amigos Dr. Elnatan Chagas Ferreira e Dr. José Antônio Siqueira Dias, pela oportunidade, orientação, atenção, auxílio e confiança em meu trabalho.

A secretária Ester, aos colegas e amigos do departamento que contribuíram fraternamente para a realização deste trabalho.

A GKN pelo suporte e confiança depositada, em especial a Radu por me desafiar e incentivar ao longo dos anos.

Ao Departamento de Eletrônica e Microeletrônica da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP (DEMIC), pela oportunidade do trabalho desenvolvido.

E a Katia, pela ajuda, amor e dedicação incondicionais, os quais não existem palavras para descrever, e por isso eu só posso agradecer e desejar que eu possa retribuir tudo sempre com a mesma intensidade.

Sumário

LISTA DE FIGURAS.....	XIV
LISTA DE TABELAS E EQUAÇÕES	XVI
LISTA DE ABREVIACÕES.....	XVII
LISTA DE CONSTANTES.....	XVIII
INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO DO PROJETO	19
1.2 VISÃO GERAL DOS SENSORES DE CORRENTE A FIBRA ÓPTICA.....	20
1.3 REDE DE BRAGG EM FIBRA	21
1.4 MATERIAIS INTELIGENTES.	25
1.5 MAGNETOSTRIÇÃO	25
1.6 O MATERIAL TERFENOL-D	27
PROJETO DO SENSOR	29
2.1 A PROPOSTA.....	29
2.2 O NÚCLEO MAGNETOSTRITIVO.....	31
2.3 MONTAGEM 1 UTILIZANDO EXTENSÔMETRO	33
2.3.1 Setup empregado na montagem 1 utilizando extensômetro	34
2.4 MONTAGEM 2 UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA	35
2.4.1 Setup empregado na montagem 2 utilizando fibra óptica	36
2.4.2 Fragilidade do núcleo	38

2.4.3	Dimensionamento do Sensor	38
2.4.4	Abraçadeira para compressão.....	40
2.4.5	Sistema de Molas para Compressão	43
2.4.6	Colagem da FBG em Fibra	45
APARATO EXPERIMENTAL		48
3.1	AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA.....	48
3.2	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS, DAQ.....	49
3.3	MONTAGEM 1 UTILIZANDO EXTENSÔMETROS.....	50
3.3.1	Método Experimental.....	50
3.3.2	Circuito de ponte.....	51
3.3.3	Amplificador de instrumentação.....	52
3.3.4	Software	53
3.4	MONTAGEM 2 UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA	55
3.4.1	Método Experimental.....	55
3.4.2	Eletrônica de interrogação da Fibra óptica	56
3.4.3	Medida de Temperatura	59
3.4.4	Compressão do Núcleo.....	60
3.4.5	Software	61
ANÁLISE DOS RESULTADOS		65
4.1	MONTAGEM 1 UTILIZANDO EXTENSÔMETROS.....	65
4.1.1	Limitações do sensor	65
4.1.2	Medidas Efetuadas	68
4.2	PROTÓTIPO 2 UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA	69
4.2.1	Range de Medida.....	69
4.2.2	Medida RMS da corrente	70
4.2.3	Cálculo de Erros das medidas de Corrente RMS	73
4.2.4	Dependência e sensibilidade com temperatura.	76

4.2.5	Cálculo de Erros da Dependência de Temperatura.....	78
4.2.6	Resposta a Transiente	81
4.2.7	Medidas de Magnetostricção	82
CONCLUSÃO		83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85
APÊNDICE.....		87
5.1	DESENHO DA BOBINA.....	87
5.2	DETALHES DOAMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO.....	88
5.3	CÓDIGO FONTE, SOFTWARE DA MONTAGEM 1 COM EXTENSÔMETRO.....	89
5.4	CÓDIGO FONTE, SOFTWARE DA MONTAGEM 2 COM FBG.....	90
5.5	COLA UTILIZADA PARA A FIXAÇÃO DA FIBRA	91

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Distribuição das pesquisas em sensores a fibra óptica de acordo com as aplicações [6].	20
Figura 1.2 – Distribuição das pesquisas em sensores a fibra óptica de acordo com as tecnologias [6].	20
Figura 1.3 – Grade de Bragg em fibra óptica (FBG).	22
Figura 1.4 – FBG em fibra óptica, reflexão do λ_b [10].	22
Figura 1.5 – FBG em fibra óptica, variação do λ_b em função da deformação [11].	23
Figura 1.6 – Construção de uma FBG em fibra óptica [12].	23
Figura 1.7 – FBG em fibra óptica, Λ é o período de grade [10].	24
Figura 1.8 – Magnetostricção (e), reorientação de domínios em presença de campo magnético (H).	25
Figura 1.9 – Magnetostricção, um efeito reversível.	26
Figura 1.10 – Deformação gerada por um campo Magnético H aplicado ao material.	26
Figura 1.11 – Mecanismos da Magnetostricção.	27
Figura 1.12 – Terfenol, relação entre deformação e campo magnético aplicado [14].	28
Figura 2.1 – Exemplo de sensor de corrente [2].	30
Figura 2.2 – Princípio de funcionamento do sensor mostrado na Figura 1.1 [2].	30
Figura 2.2 – Núcleo de Terfenol-D, diâmetro 40mm e altura de 20mm, antes do corte.	32
Figura 2.3 – Núcleo de Terfenol após o corte com eletro-erosão.	32
Figura 2.4 – (A e B) Montagem 1 utilizando <i>extensômetro</i> .	33
Figura 2.5 – Setup empregado na montagem 1 utilizando extensômetros.	35
Figura 2.6 – (A e B) Montagem 2 utilizando fibra óptica.	36
Figura 2.7 – Setup utilizado no Protótipo 2.	37
Figura 2.8 – Núcleo de Terfenol quebrado.	38
Figura 2.9 – Desenho em 3D do sensor.	39
Figura 2.10 – Desenho 3D do núcleo magnético.	39
Figura 2.11 – Desenho 3D do anel para compressão do núcleo.	39
Figura 2.12 – Bobina para o enrolamento.	40
Figura 2.13 – Desenho da abraçadeira para compressão do núcleo.	41
Figura 2.14 – Análise da distribuição da compressão do núcleo magnético.	42
Figura 2.15 – Análise dimensional do núcleo, diâmetro de 40mm e tolerância de 0,015mm.	43
Figura 2.16 – Mola Prato, diferentes associações.	44
Figura 2.17 – Mola Prato, desenho.	44
Figura 2.18 – Cola utilizada para a fixação da fibra. EPO-TEK 301.	45
Figura 2.19 – Fibra óptica sendo colada ao núcleo.	46
Figura 2.20 – Sensor condicionado em uma placa de acrílico.	47
Figura 3.1 – Circuito do Amplificador de Potência.	49
Figura 3.2 – Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados.	49
Figura 3.3 – Método experimental utilizado na montagem 1 com extensômetro.	51
Figura 3.4 – Circuito de Ponte com compensação de temperatura.	51
Figura 3.5 – Extensômetro de 120 Ω do tipo LY11.	52
Figura 3.6 – Amplificador de Instrumentação.	53
Figura 3.7 – Programa em LabVIEW da montagem 1 com extensômetros.	54
Figura 3.8 – Método experimental utilizado na montagem 2.	56

Figura 3.9 – Espectro da FBG utilizada e princípio de funcionamento da eletrônica de interrogação.....	57
Figura 3.10 – Eletrônica de interrogação, diagrama de funcionamento.....	58
Figura 3.11 – Eletrônica da Fibra, Interrogador e Circulador óptico	58
Figura 3.12 – Circuito Sensor de Temperatura	59
Figura 3.13 – Diagrama de funcionamento do software da montagem 2.....	61
Figura 3.14 – Automação em LabVIEW para a aquisição de dados da montagem 2.	62
Figura 3.15 – Banco de dados da aquisição de dados	63
Figura 3.16 – Programa em LabVIEW para efetuar os cálculos da aquisição de dados da montagem 2.....	64
Figura 4.1 – Sinal da ponte zerada, sem sinal do Toroide.....	66
Figura 4.2 – Resposta do núcleo com Sinal de 10mHz com 5V na ponte.....	66
Figura 4.3 – Resposta do núcleo com Sinal de 10mHz sem 5V na ponte.....	66
Figura 4.4 – Resposta do núcleo com Sinal de 60Hz com 5V na ponte.....	67
Figura 4.5 – Resposta do núcleo com Sinal de 60Hz sem 5V na ponte.....	67
Figura 4.6 – Campo magnético versus deformação mecânica, obtido com a montagem 1.....	68
Figura 4.7 – Corrente aplicada no sensor e o sinal da deformação do núcleo, obtido com a montagem 1.....	68
Figura 4.8 – Setup utilizado para emular corrente através do sensor.....	69
Figura 4.9 – Variação da temperatura ao longo de todas as medidas.....	70
Figura 4.10 – Medidas de corrente, resposta do sensor em presença de diferentes compressões.....	72
Figura 4.11 – Medidas linearizada de corrente.....	73
Figura 4.12 – Distribuição do erro dentro do range medido de 200 a 900A.....	74
Figura 4.13 – Menor distribuição de Erro ao longo do range de 200 a 900A.....	75
Figura 4.14 – Perfil de aquecimento utilizado para determinar a influência da variação de temperatura.....	76
Figura 4.15 – Dependência da variação da temperatura para as diferentes compressões.....	77
Figura 4.16 – Dependência da variação da temperatura para as diferentes medidas.....	77
Figura 4.17 – Distribuição do Erro da Dependência de Temperatura.....	79
Figura 4.18 – Menor erro da dependência de Temperatura.....	80
Figura 4.19 – Resposta a Transiente	81
Figura 4.20 – Curva de Magnetostrição do Material.....	82
Figura 5.1 – Desenho da bobina.....	87
Figura 5.2 – Detalhes sobre o amplificador de instrumentação INA121.....	88
Figura 5.3 – Código em LabVIEW utilizado para o Software da montagem 1.....	89
Figura 5.4 – Código em LabView da Automação da aquisição de dados, montagem 2.....	90
Figura 5.5 – Cola utilizada para a fixação da fibra no núcleo	91

Lista de Tabelas e Equações

Tabela 1 – Estimativa dos valores de compressão.	60
Equação 1.1 – Comprimento de Onda de Bragg.	24
Equação 1.2 – Deformação em função do campo magnético.	26
Equação 1.3 – Constante de deformação.	26
Equação 2.1 – Cálculo da Mola Prato em série.	44
Equação 2.2 – Cálculo da Mola Prato em paralelo.	44
Equação 3.1 – Relação de Transformação da Ponte.	52
Equação 3.2 – Ganho do Amplificador de Instrumentação.	53
Equação 3.3 – Cálculo da Temperatura	59
Equação 4.1 – Corrente AC na forma usual.	70
Equação 4.2 – Corrente RMS na forma Integral.	70
Equação 4.3 – Corrente RMS em forma de Somatório.	71
Equação 4.4 – Método de cálculo para Corrente RMS do sensor	71
Equação 4.5 – Cálculo de Erro para a medida RMS	74
Equação 4.6 – Cálculo de Linearização Y_M	78
Equação 4.7 – Cálculo de Erro para a medida da dependência de temperatura.	78

Lista de Abreviações

FBG – Fiber Bragg Gratings ou Grade de Bragg em Fibra

EMI – Interferência Eletromagnética

OCT – Optical Current Transducer ou Transdutor Óptico de Corrente

CT – Current Transducer ou Transdutor de Corrente

DAQ – Data Acquisition System ou Sistema de Aquisição de Dados

RMS – Valor Eficaz ou Valor Quadrático Médio

Lista de Constantes

Δ – Constante de deformação magnética

Y – Módulo de Young.

C – Constante de deformação mecânica em função de campo magnético

B – Campo Magnético

L – Comprimento

P – Pressão

F – Flecha da mola

ε – Deformação mecânica

E – Tensão de alimentação da ponte

K – Fator Gauge

G – Ganho do amplificador

λ_b – Comprimento de onda de Bragg

n – Índice de refração efetivo do núcleo da fibra

Λ – Espaçamento entre as grades, período de grade.

Capítulo 1

Introdução

Nesse capítulo serão apresentados: o escopo do projeto desenvolvido, uma visão geral referente aos sensores a fibra óptica e uma breve introdução dos fenômenos e tecnologias, mais relevantes empregadas, para o desenvolvimento do protótipo.

1.1 Objetivo do Projeto

O objetivo desse projeto foi desenvolver um protótipo de um sensor óptico de corrente elétrica, de precisão moderada e de baixo custo, capaz de medir correntes RMS em sistemas de altas tensões.

Ao desenrolar do trabalho e após a análise de diferentes técnicas citadas anteriormente na literatura, [1], [2], [3], [4], [5], foi desenvolvida uma nova abordagem que resultou em uma peça única, mecanicamente robusta e um sistema eletrônico de interrogação da fibra óptica simples e preciso.

1.2 Visão geral dos sensores de corrente a fibra óptica.

Os sensores a fibra óptica são ideais para condições severas: alta interferência eletromagnética, alta vibração, calor extremo, ambientes molhados, explosivos, corrosivos entre outros. Devido ao sua pequena espessura, uma fibra óptica pode ser posicionada com precisão em áreas restritas [6].

Dentre a família de sensores a fibra óptica mais estudados, conforme pode ser observado na Figura 1.1, é possível encontrar: sensores de deformação, temperatura, pressão, sonoro, corrente elétrica, tensão elétrica, rotação, vibração, aceleração, flexão, torção e deslocamento. Os sensores de deformação mecânica recebem maior atenção dentre as pesquisas científicas.

Dentre os sensores listados acima, e como pode ser observado na Figura 1.2, diferentes tecnologias são utilizadas e estudadas para suas construções, como por exemplo: grade de Bragg, interferômetro, reflexão, espalhamento, rotação Faraday, fluorescência, luminescência, corpo negro, giroscópio e outras. Dentre todas essas tecnologias estudadas, a que recebe maior atenção é a que utiliza grade de Bragg em fibra óptica (FBG) [6].

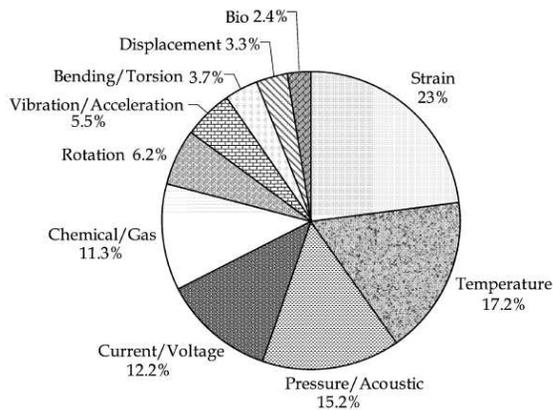


Figura 1.1 – Distribuição das pesquisas em sensores a fibra óptica de acordo com as aplicações [6].

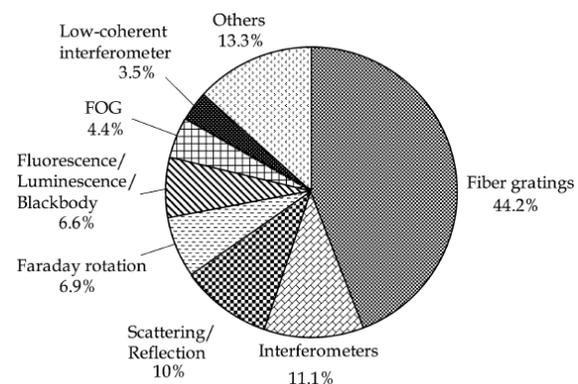


Figura 1.2 – Distribuição das pesquisas em sensores a fibra óptica de acordo com as tecnologias [6].

Os sensores a fibra óptica são imunes à interferência eletromagnética (EMI), eles são normalmente encontrados em ambientes eletricamente ruidosos, especialmente em linhas de

transmissão de alta voltagem. Essa é a característica principal que faz desse tipo de sensores ideais para empresas de Energia Elétrica.

Além da EMI, esses sensores possuem outras vantagens frente aos transdutores de corrente (TCs) convencionais como, por exemplo: alta isolamento elétrica, medida passiva, maior largura de banda, alta sensibilidade, facilidade na transmissão de luz, são compactos, leves e não apresentam perigo de explosão. Além de serem de fácil integração com sistemas de controle digital [7], [8], [9].

Um número significativo de sensores de corrente elétrica são desenvolvidos utilizando o Efeito Faraday, o que resulta em sistemas de interrogação eletrônica altamente complexos e caros [2].

Sensores ópticos utilizando FBG são muito mais simples e apresentam-se como uma excelente alternativa referente ao seu preço moderado [7]. A maioria dos sensores a FBG são baseados no mesmo princípio, o qual envolve medir com uma interrogação apropriada a variação do comprimento central da grade de Bragg (*Bragg shifts*) [3].

A associação de uma grade de Bragg em fibra com um material magnetostritivo (Terfenol-D) vem sendo explorado com sucesso no desenvolvimento de transdutores ópticos de corrente com moderada complexidade, capazes de medir correntes AC e DC [7], [2], [4]. Essa associação apresenta grande potencial para aplicações em linhas de alta tensão.

1.3 Rede de Bragg em fibra

Conforme apresentado no capítulo anterior, a rede ou grade de Bragg em fibra óptica (FBG) é a tecnologia mais utilizada e estudada, dentro das aplicações em sensoriamento óptico. A Figura 1.3 mostra uma FBG convencional.

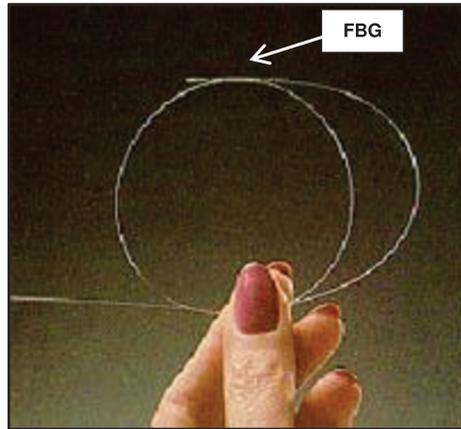


Figura 1.3 – Grade de Bragg em fibra óptica (FBG).

Conforme pode ser observado na Figura 1.4, aplicando-se um sinal de luz de largo espectro em uma FBG, ela reflete um determinado comprimento de onda da luz, λ_b , (comprimento de onda de Bragg) e transmite todos os demais comprimentos de onda [8].

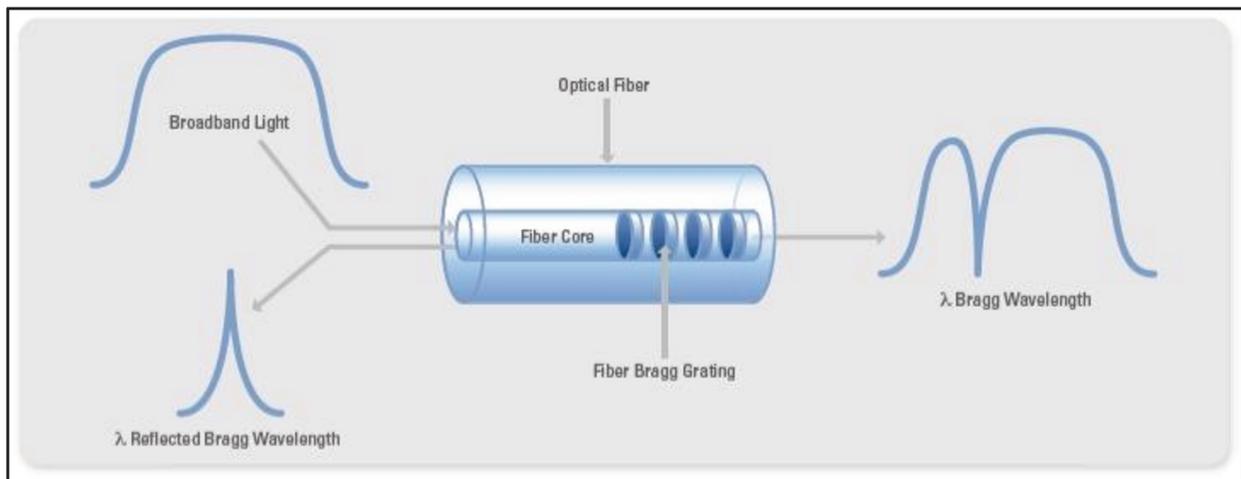


Figura 1.4 – FBG em fibra óptica, reflexão do λ_b [10].

Outra propriedade importante para se apresentar é a mostrada na Figura 1.5, onde o comprimento de onda da Bragg, λ_b , se altera quando a fibra óptica é exposta a variações de temperatura e/ou deformação [8] Essa propriedade é conhecida como (*Bragg shifts*).

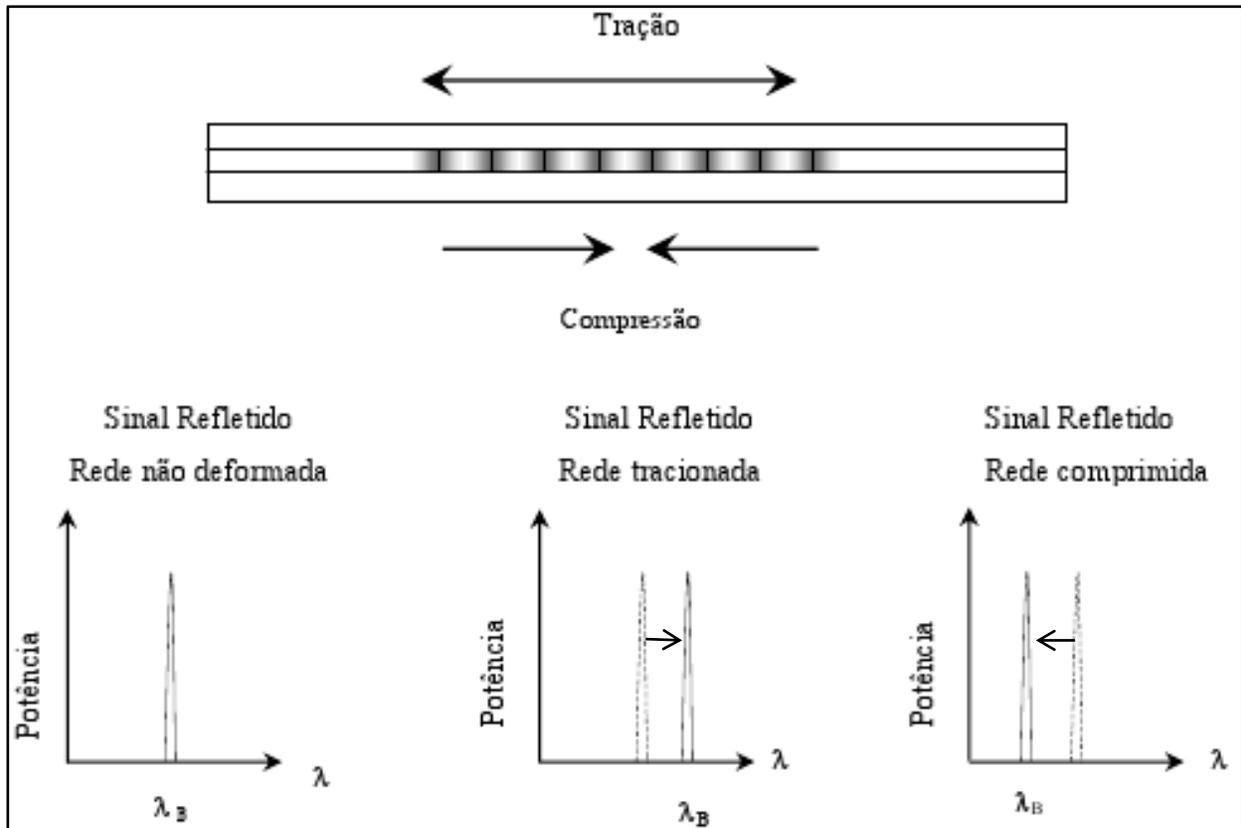


Figura 1.5 – FBG em fibra óptica, variação do λ_B em função da deformação [11].

Dentre várias técnicas disponíveis para a construção dessas grades, a Figura 1.6 abaixo mostra como uma grade de Bragg em fibra é construída utilizando interferência holográfica. Trata-se da exposição de um pequeno pedaço de fibra fotossensível a uma distribuição periódica de intensidade da luz [8].

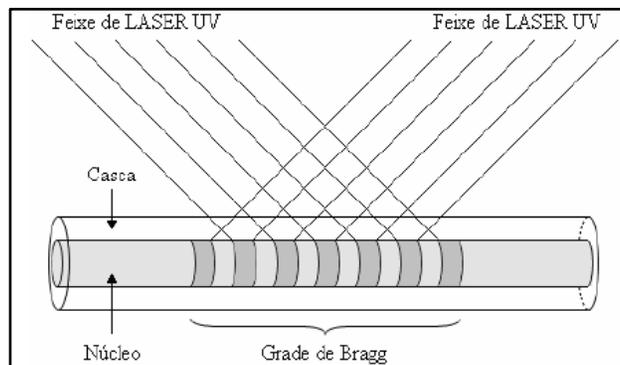


Figura 1.6 – Construção de uma FBG em fibra óptica [12].

A variação periódica resultante no índice de refração é chamada de grade ou rede de Bragg em fibra óptica. Na Figura 1.7 é possível observar como a grade é gravada na fibra, Λ é o espaçamento entre as grades, conhecido como o período de grade.

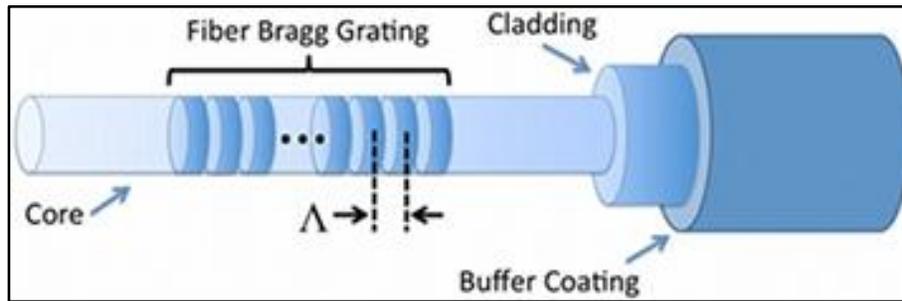


Figura 1.7 – FBG em fibra óptica, Λ é o período de grade [10].

O índice de refração da fibra é determinado de acordo com a intensidade da luz que é exposta a fibra durante o processo de fabricação da grade de Bragg. O comprimento de onda de Bragg (λ_b) é definido pela (1.1) abaixo [8].

$$\lambda_b = 2n\Lambda \quad (1.1)$$

Na (1.1), (λ_b) é o comprimento de onda de Bragg, (n) é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra, e (Λ) é o espaçamento entre as grades, conhecido como o período de grade.

Conforme citado anteriormente e mostrado na Figura 1.5, o efeito de tração e compressão da FBG faz com que o (λ_b) varie. Isso acontece devido a alteração do espaçamento entre as grades (Λ). A relação entre o espaçamento das grades e o comprimento de onda de Bragg conforme citado acima é dado pela (1.1).

1.4 Materiais Inteligentes.

Materiais inteligentes são classes de materiais e/ou compósitos que possuem inerente inteligência juntamente com capacidade própria de se adaptar a estimulações externas [13].

Dentro do espectro de materiais inteligentes existem, por exemplo: Smart Structural Materials; Smart Thermal Materials; Smart Eletromagnetic Materials; Smart Pyrosensitive Materials entre outros.

A presença de características como, por exemplo, o efeito Piezoelétrico e o efeito Magnetostritivo transformam o material em um forte candidato a ser um material inteligente. No caso do trabalho aqui apresentado o efeito Magnetostritivo foi o explorado.

1.5 Magnetostricção

A magnetostricção é uma propriedade que causa em alguns materiais a habilidade de se deformar em presença de campo magnético polarizado [13]. Conforme pode ser observado na Figura 1.8, quando certo material magnetostritivo é exposto a um campo magnético, seus domínios magnéticos são realinhados provocando uma deformação positiva no material. Como ilustrado na Figura 1.9, esse é um fenômeno reversível onde ocorre a conversão de energia elétrica em energia mecânica e vice versa.

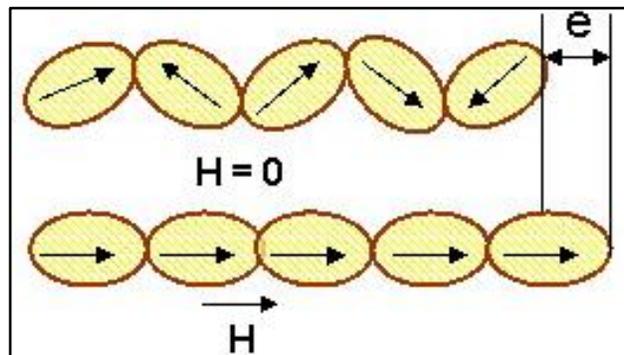


Figura 1.8 – Magnetostricção (e), reorientação de domínios em presença de campo magnético (H).

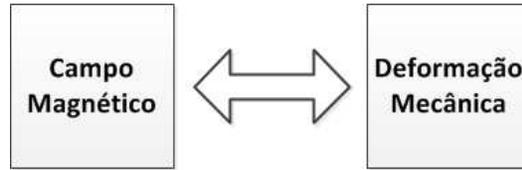


Figura 1.9 – Magnetostricção, um efeito reversível.

Conforme pode ser observado na

Figura 1.10, e de acordo com a relação apresentada na (1.2, uma deformação estática ($\Delta L/L$), é produzida quando se aplica ao material magnetostritivo um campo magnético DC polarizado (B_0) onde (C) é a constante do material expressa em (Weber/Metro²) [13].

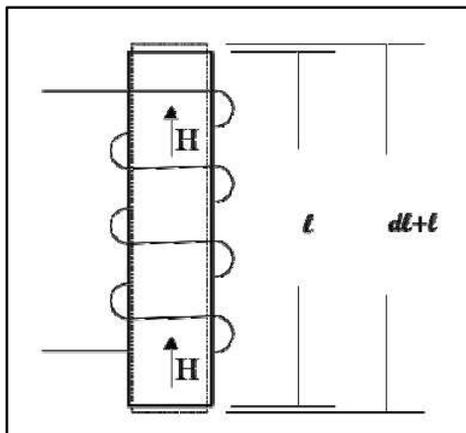


Figura 1.10 – Deformação gerada por um campo Magnético H aplicado ao material.

$$\frac{\Delta L}{L} = C \cdot B_0 \quad (1.2)$$

A constante de deformação magnética (Δ) em (Newton/Weber) é dada pela (1.3 onde (Y_0) é o módulo de Young.

$$\Delta = 2 \cdot C \cdot B_0 \cdot Y_0 \quad (1.3)$$

O mecanismo magnetostritivo expressado pela Figura 1.11, mostra a rotação dos domínios magnéticos em um cristal em presença de um campo magnético externo, como citado acima, esse campo é capaz de promover expansões positivas, na ordem de microssegundos [14], [15].

A mesma Figura 1.11 também ilustra o efeito causado aos domínios quando se aplicada ao material uma compressão.

Quando uma compressão é aplicada, fatores positivos e negativos devem ser levados em consideração: beneficia-se pelo aumento dos níveis de saturação e a redução da histerese da resposta, mas por outro lado, perde-se em sensibilidade.

Ao decorrer desta apresentação, serão mostradas evidências dessas propriedades refletidas nos resultados dos testes do protótipo.

No sensor desenvolvido, a manipulação da compressão foi fator importante para obter resultados satisfatórios.

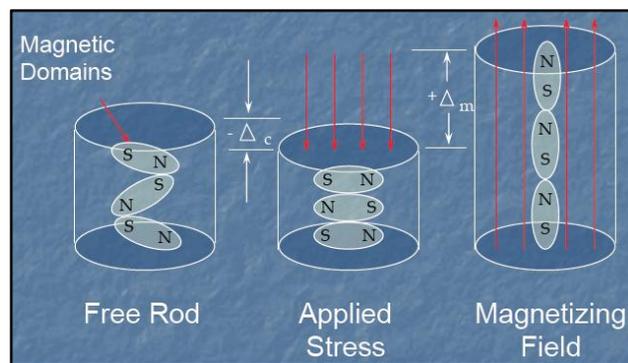


Figura 1.11 – Mecanismos da Magnetostricção

1.6 O material Terfenol-D

Materiais com alto grau de magnetostricção são implementados em estruturas inteligentes modernas. O estado da arte desses materiais produz deformações de até 2000ppm [13]. Eles são

ligas feitas com ferro e materiais de terras raras como, por exemplo, o Terbium (Tb), Dysprosium (Dy) e Niobium (Nb).

Comercialmente, um material conhecido que utiliza tais ligas é o Terfenol-D, material utilizado nesse trabalho como núcleo magnetostritivo do sensor, ele foi escolhido pelo seu grande potencial magnetostritivo e também pela sua rápida resposta, na ordem de microssegundos [14]. Na Figura 1.12 é possível observar a relação entre campo magnético e dilatação mecânica do material em presença de algumas compressões.

Esse material é comumente citado na literatura por produzir “*giant magnetostriction*”, o que significa magnetostricção muito maior do que o normal [15].

Algumas propriedades do material são bem conhecidas como, por exemplo: a deformação é um fenômeno unipolar, produzindo deformação positiva em presença de campo positivo ou negativo; a deformação é proporcional a aproximadamente o quadrado do campo magnético aplicado e o material obedece ao comportamento ferromagnético.

Terfenol-D, é uma liga metálica monocristal, com composição nominal ($Tb_{0.3} Dy_{0.7} Fe_{1.92}$). Terbium (Tb) gera a maior parte da magnetostricção, Dysprosium (Dy) reduz a anisotropia magnética e Ferro (Fe) estabiliza a ordenação magnética devido ao seu alto ponto de Curie [14].

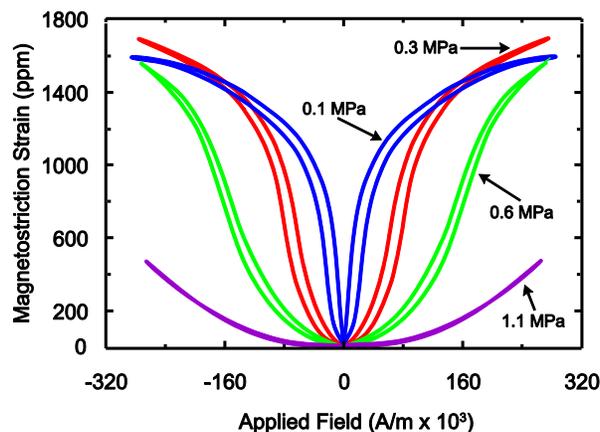


Figura 1.12 – Terfenol, relação entre deformação e campo magnético aplicado [14].

Será apresentado no Capítulo 2 a seguir, como o conjunto de propriedades, fenômenos e tecnologia foram explorados no projeto do sensor.

Capítulo 2

Projeto do Sensor

Para o desenvolvimento do protótipo, foram efetuadas duas montagens diferentes, a primeira, mais simples, utilizando extensômetro e a segunda, mais elaborada, utilizando fibra óptica. Nesse capítulo serão apresentados maiores detalhes do princípio de funcionamento do sensor projetado, a abordagem utilizada no projeto mecânico, o método de fabricação, as dificuldades para sua construção, e o setup de teste/caracterização utilizado em cada uma das montagens efetuadas.

2.1 A Proposta

Dentro do escopo estabelecido para esse trabalho, que foi desenvolver um sensor óptico de corrente elétrica, de precisão moderada e de baixo custo, capaz de medir correntes RMS em sistemas de altas tensões. Após a análise de diferentes técnicas citadas anteriormente na literatura, [1], [2], [3], [4], [5], foi desenvolvida uma nova abordagem de projeto descrita a seguir.

Dentre diferentes layouts utilizados, na Figura 2.1 esta um exemplo de um sensor de corrente elétrica patenteado [2] que utiliza núcleo magnético a base de Terfenol-D.

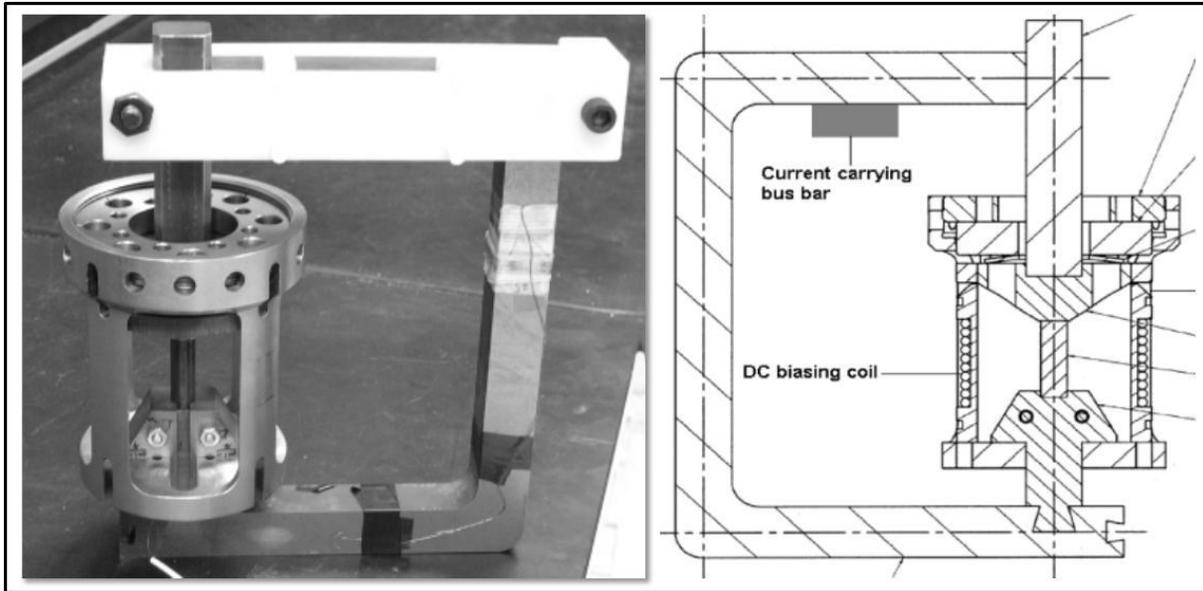


Figura 2.1 – Exemplo de sensor de corrente [2].

O como pode ser observado na Figura 2.1, trata-se de um layout complexo, que utiliza como princípio a medida da variação mecânica do núcleo magnetostritivo polarizando o sinal de saída. Na Figura 2.2 esta o princípio de funcionamento desse sensor. O “input” é o sinal senoidal da rede elétrica, que provoca uma deformação mecânica no núcleo, essa deformação mecânica, “output” é então polarizada com uma bobina, reproduzindo assim o sinal de entrada na saída.

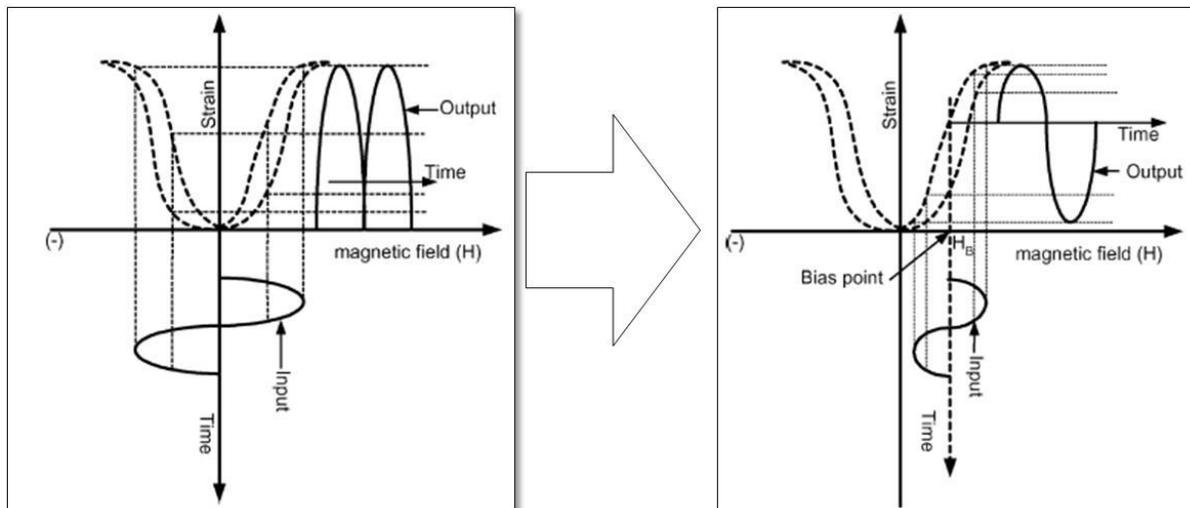


Figura 2.2 – Princípio de funcionamento do sensor mostrado na Figura 1.1 [2].

A nova abordagem utilizada procurou desenvolver um sensor utilizando um núcleo de material magnetostritivo em formato toroidal com uma grade de Bragg em fibra óptica colada no sentido radial, e com isso explorar o efeito magnetostritivo para desenvolver um sensor de corrente elétrica sem requerer do uso de polarização magnética DC para transformar a resposta unipolar do Terfenol em bipolar, simplificando assim o projeto do sensor.

A escala de medida de corrente seria proporcional à deformação do núcleo. Para fazer essa medida de deformação, foi utilizado uma grade de Bragg em fibra (FBG) e um sistema eletrônico de interrogação o qual elimina a dependência da temperatura da FBG e pode precisamente medir as mudanças do comprimento de onda de Bragg ao redor do ponto de operação utilizando somente uma fibra e um circulador óptico [11], [12], [3].

Conforme apresentado no capítulo anterior, a FBG possui a característica de variar o comprimento de onda de um sinal refletido por ela de acordo com sua deformação mecânica. Então, através da medida AC dessa deformação foi construído um sensor de corrente elétrica correlacionando o valor RMS da medida AC do sinal de luz refletido pela fibra com a intensidade de corrente elétrica passando pelo núcleo.

2.2 O Núcleo Magnetostritivo

O núcleo foi adquirido em formato cilíndrico, conforme mostrado na Figura 2.3. Levando em consideração às recomendações do fabricante quanto às dificuldades referentes a usinabilidade do material, foi decidido então utilizar para corte, o processo de eletro-erosão a fio. Com esse processo, foram reduzidos os riscos de acidente e possível perda do material por falta de experiência com sua usinagem. O núcleo então cortado é mostrado na Figura 2.4 a seguir.



Figura 2.3 – Núcleo de Terfenol-D, diâmetro 40mm e altura de 20mm, antes do corte.



Figura 2.4 – Núcleo de Terfenol após o corte com eletro-erosão.

2.3 Montagem 1 utilizando extensômetro

Antes de iniciar o trabalho com fibra óptica, foi desenvolvido uma primeira montagem, mais simples, utilizando extensômetro², conforme mostrado na Figura 2.5. Essa montagem funcionou de maneira satisfatória, com uma boa faixa dinâmica, porém como já era de se esperar, ele não era imune às interferências eletromagnéticas, fato que tornou o protótipo possível de ser testado somente em frequências muito baixas.

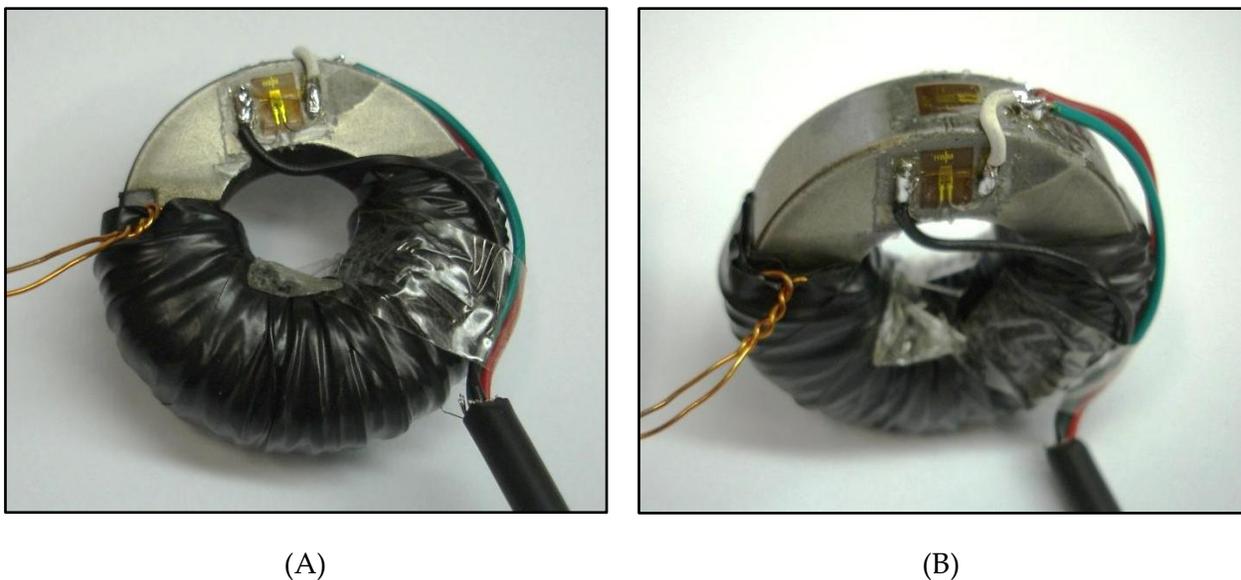


Figura 2.5 – (A e B) Montagem 1 utilizando *extensômetro*.

Conforme pode ser observado na Figura 2.5 (A e B), dois extensômetros foram utilizados, um no sentido do radial, sentido do campo magnético, e outro no sentido perpendicular ao campo. O primeiro foi responsável pela medida da magnetostricção e o segundo responsável pela compensação da deformação referente à variação de temperatura. Conforme também pode ser observado, em ambas as fotos, existe uma bobina com 200 espiras de fio esmaltado de 0,6mm ao

² Extensômetro, em Inglês, *Strain Gauges*. É um transdutor capaz de medir deformações mecânicas de corpos. Quando um material é deformado sua resistência eléctrica é alterada, a fração de mudança na resistência é proporcional a fração de mudança no comprimento do material.

redor do núcleo com o objetivo de emular uma corrente elétrica de alta tensão passando através do sensor.

2.3.1 SETUP EMPREGADO NA MONTAGEM 1 UTILIZANDO EXTENSÔMETRO

Para o desenvolvimento dessa montagem, conforme mostrado na Figura 2.6, foram utilizados: um amplificador de potência, para amplificar o sinal emitido por um gerador de sinais e um amplificador de instrumentação juntamente com um circuito de ponte.

Além desses circuitos eletrônicos acima citados, foram utilizados também uma placa de aquisição de dados de 14bits [16], uma fonte de alimentação, um gerador de sinais, um PC e Software desenvolvido utilizando linguagem de programação gráfica na plataforma LabVIEW [17].

Durante o desenvolvimento do trabalho, todos os softwares utilizados foram desenvolvido em LabVIEW.

Maiores detalhes sobre cada item que compõem o sensor e a metodologia de teste/caracterização utilizada serão mostradas de forma individual e sistemática no Capítulo 3 a seguir.

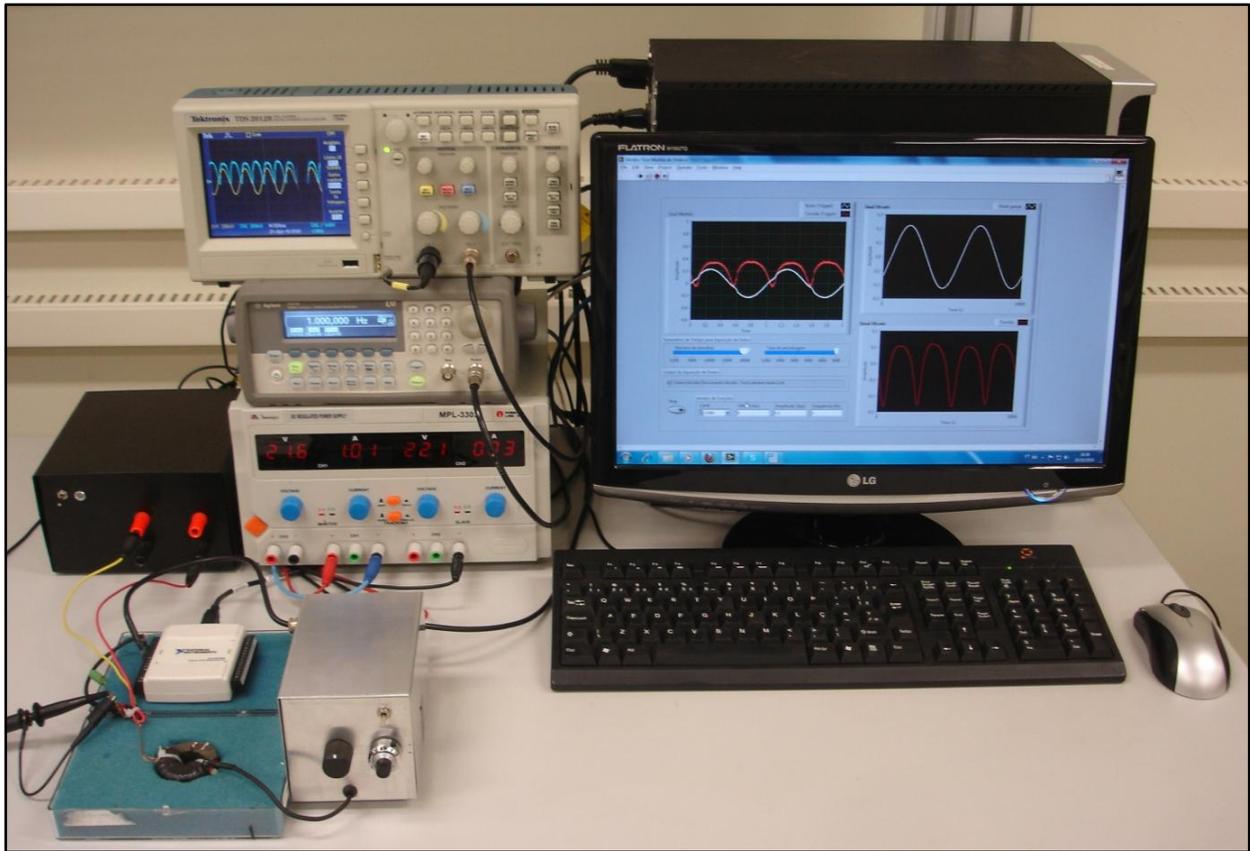


Figura 2.6 – Setup empregado na montagem 1 utilizando extensômetros.

2.4 Montagem 2 utilizando fibra óptica

Através da experiência adquirida com o primeiro protótipo, e informações da literatura [2], observamos que teríamos grande benefício se fosse considerado para essa segunda montagem, alguma forma de aplicar uma determinada compressão ao núcleo.

Comprimindo o núcleo, pode-se aproximar mais a sua resposta de uma função quadrática, e com isso então, baseado na metodologia utilizada para o cálculo do valor RMS, obter maior precisão nas correntes medidas.

Tal fato se dá como descrito nas propriedades do material citadas anteriormente no Capítulo 1.6.

A possibilidade de compressão do núcleo magnetostritivo não foi explorada na primeira montagem. Baseado nos fatos acima citados, foi desenvolvida a montagem 2, mais elaborada, conforme mostrado na Figura 2.7 a seguir.

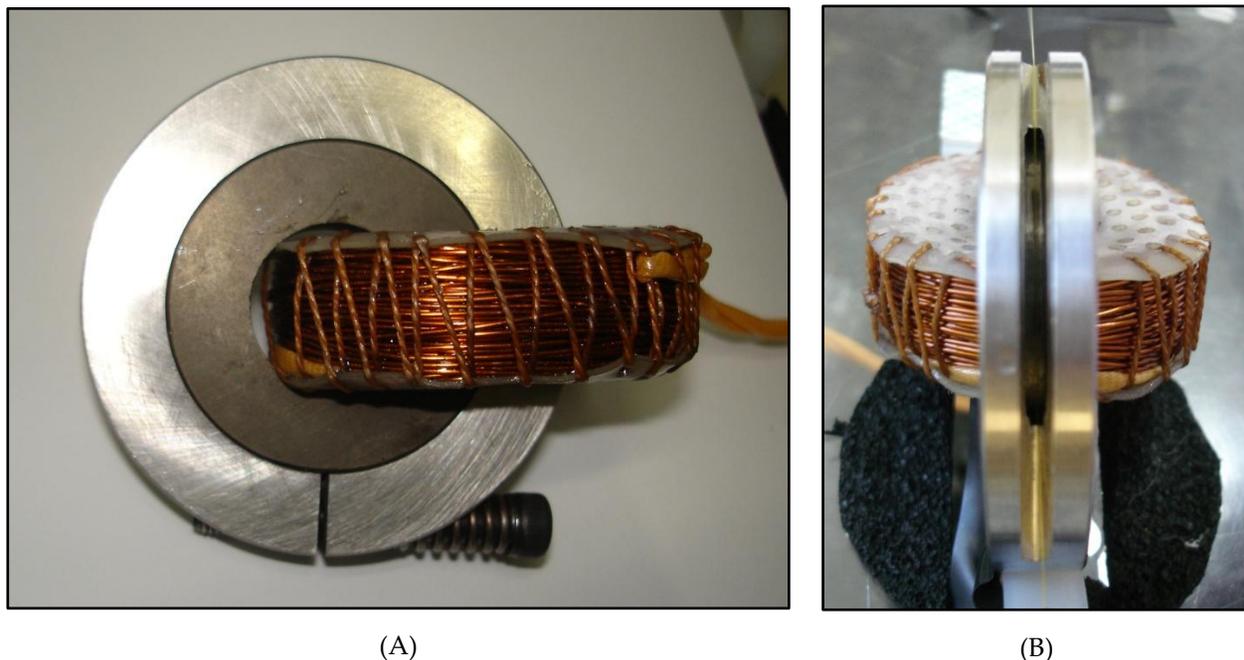


Figura 2.7 – (A e B) Montagem 2 utilizando fibra óptica.

A Figura 2.7, mostra a foto da montagem 2 utilizando fibra óptica, a foto (A) mostra em evidência a bobina utilizada para emular a corrente passando pelo sensor e também o núcleo magnetostritivo, construído em formato toroidal, envolvido por uma abraçadeira pra compressão construída em aço inox. A foto (B) mostra a cavidade onde foi colada a FBG.

2.4.1 SETUP EMPREGADO NA MONTAGEM 2 UTILIZANDO FIBRA ÓPTICA

Para o desenvolvimento dessa montagem, conforme mostrado na Figura 2.8, apesar de utilizar o mesmo conceito da montagem anterior, foi empregado um novo setup.

O amplificador de potência para amplificar o sinal emitido de um gerador de sinais foi mantido e o amplificador de instrumentação com o circuito de ponte foi substituído por um sistema eletrônico de interrogação para a FBG.

Além desses circuitos eletrônicos acima citados, foram utilizados também, assim como na montagem 1, uma placa de aquisição de dados de 14bits [16], uma fonte de alimentação, um gerador de sinais, um PC e Software desenvolvido utilizando linguagem de programação gráfica na plataforma LabVIEW [17].

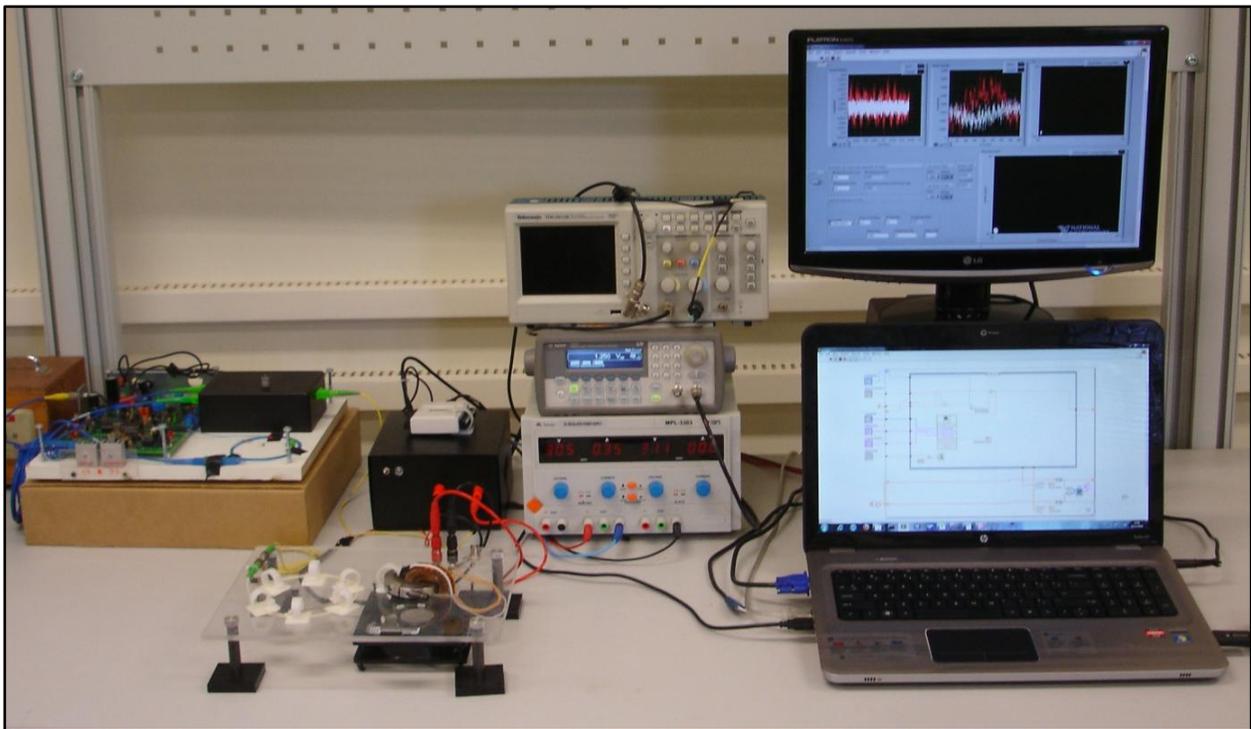


Figura 2.8 – Setup utilizado no Protótipo 2

2.4.2 FRAGILIDADE DO NÚCLEO

Após o término dos testes com a montagem 1, o sensor foi desmontado, os extensômetros foram removidos e o fio de cobre desenrolado. Infelizmente, ao ser limpo, ele caiu acidentalmente no chão, piso de cerâmica, a uma distância de aproximadamente 1,5m e quebrou imediatamente em 4 partes conforme mostrado na Figura 2.9 abaixo.



Figura 2.9 – Núcleo de Terfenol-D quebrado.

Isso reforça a necessidade de cuidados especiais referente a sua usinagem. Com certeza, ter decidido pelo método de eletro-erosão foi uma decisão muito feliz, caso contrário, devido a falta de experiência com a usinagem desse material, com certeza, a amostra seria destruída dentro do torno.

2.4.3 DIMENSIONAMENTO DO SENSOR

Conforme pode ser observado no desenho do sensor mostrado na Figura 2.10 e no desenho do núcleo magnético mostrado na Figura 2.11. O sensor foi todo projetado em formato toroidal com o objetivo de tornar sua montagem simples, robusta e de baixo custo.

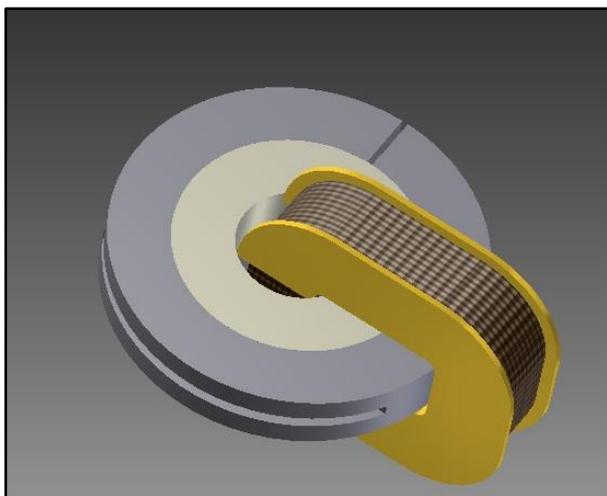


Figura 2.10 – Desenho em 3D do sensor

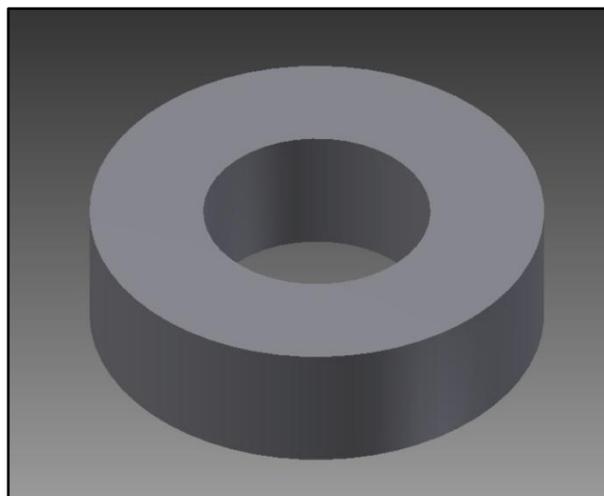


Figura 2.11 – Desenho 3D do núcleo magnético

Com o objetivo de comprimir o núcleo e de guiar a fibra óptica para a colagem, foi desenvolvida uma abraçadeira de compressão, que pode ser visualizada com detalhes na Figura 2.12. Na imagem pode ser observado o corte guia para a colagem da fibra, e o recorte interno para garantir a linearidade da compressão radial em todos os sentidos.

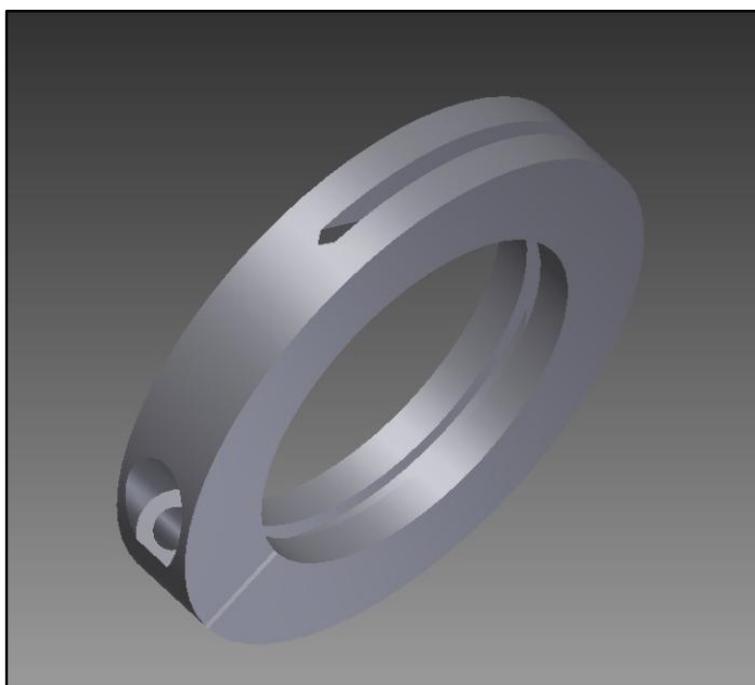


Figura 2.12 – Desenho 3D do anel para compressão do núcleo.

Conforme introduzido anteriormente, com o objetivo de emular em laboratório o fluxo de corrente elétrica através do sensor, foi construída uma bobina, como é mostrado na

Figura 2.13. O material utilizado foi o teflon e nela foi enrolado 357 espiras de fio esmaltado de 0,6 mm de espessura. Seu desenho detalhado está no apêndice desse trabalho.

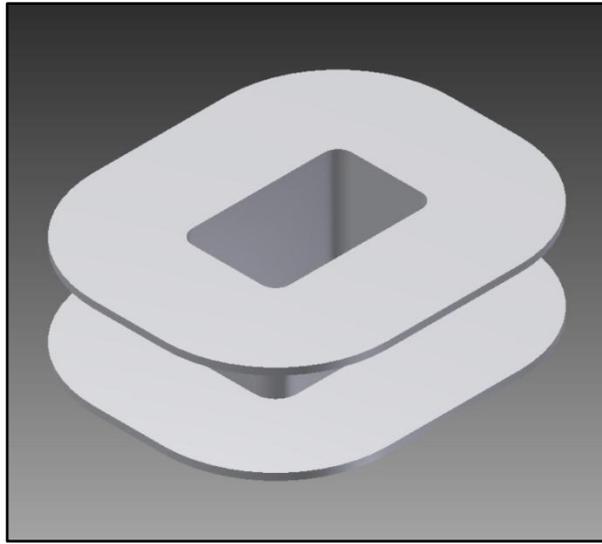


Figura 2.13 – Bobina para o enrolamento.

2.4.4 ABRAÇADEIRA PARA COMPRESSÃO

Conforme apresentado no Capítulo 2.4, após a experiência adquirida com a montagem 1, e conforme observado em [2] foi despertado a necessidade, devido os benefício já citado anteriormente, de desenvolver um dispositivo que pudesse comprimir o núcleo de maneira homogenia no sentido radial.

Para isso foi desenvolvido uma abraçadeira, que é mostrada em detalhes na Figura 2.12. Como a abraçadeira precisava possuir um corte para permitir a colagem da fibra óptica no núcleo, surgiu a preocupação de garantir que a compressão do núcleo fosse igual em todo o sentido radial.

Para solucionar esse problema, foram tomadas duas medidas:

Levando-se em consideração que o anel representado na Figura 2.12 estaria com seu dimensional justo ao do núcleo, através de uma análise simples de elementos finitos, foi obtido uma distribuição de cargas conforme mostrado na Figura 2.15 a seguir.

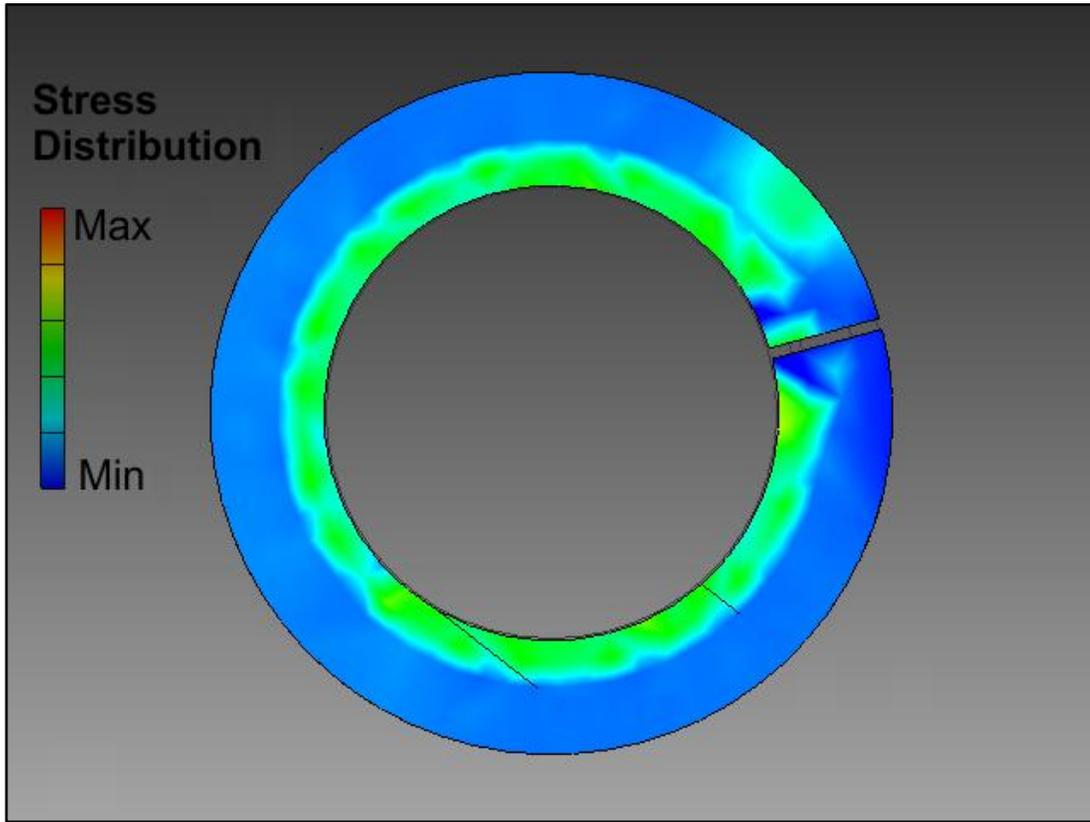


Figura 2.15 – Análise da distribuição da compressão do núcleo magnético.

O resultado da simulação, mostrou que o desenho proposto, com um recorte interno, garantia uma linearidade satisfatória. A diferença de cores na imagem acima mostra como a pressão é distribuída no sentido radial quando se aperta o parafuso do anel de compressão.

Baseado no resultado dessa simulação mostrada acima foi medida a circularidade do núcleo. Na Figura 2.16 está o resultado dessa medida dimensional, o que mostra que o diâmetro do núcleo a ser comprimido era de 40,010mm com uma variação dimensional bem apertada, de 0,015mm.

Baseado nesses resultados, o anel foi dimensionado e construído de tal maneira que ele ficasse o mais justo possível, obedecendo a tolerância medida, reduzindo assim os riscos da compressão não ser igual em todos os sentidos.

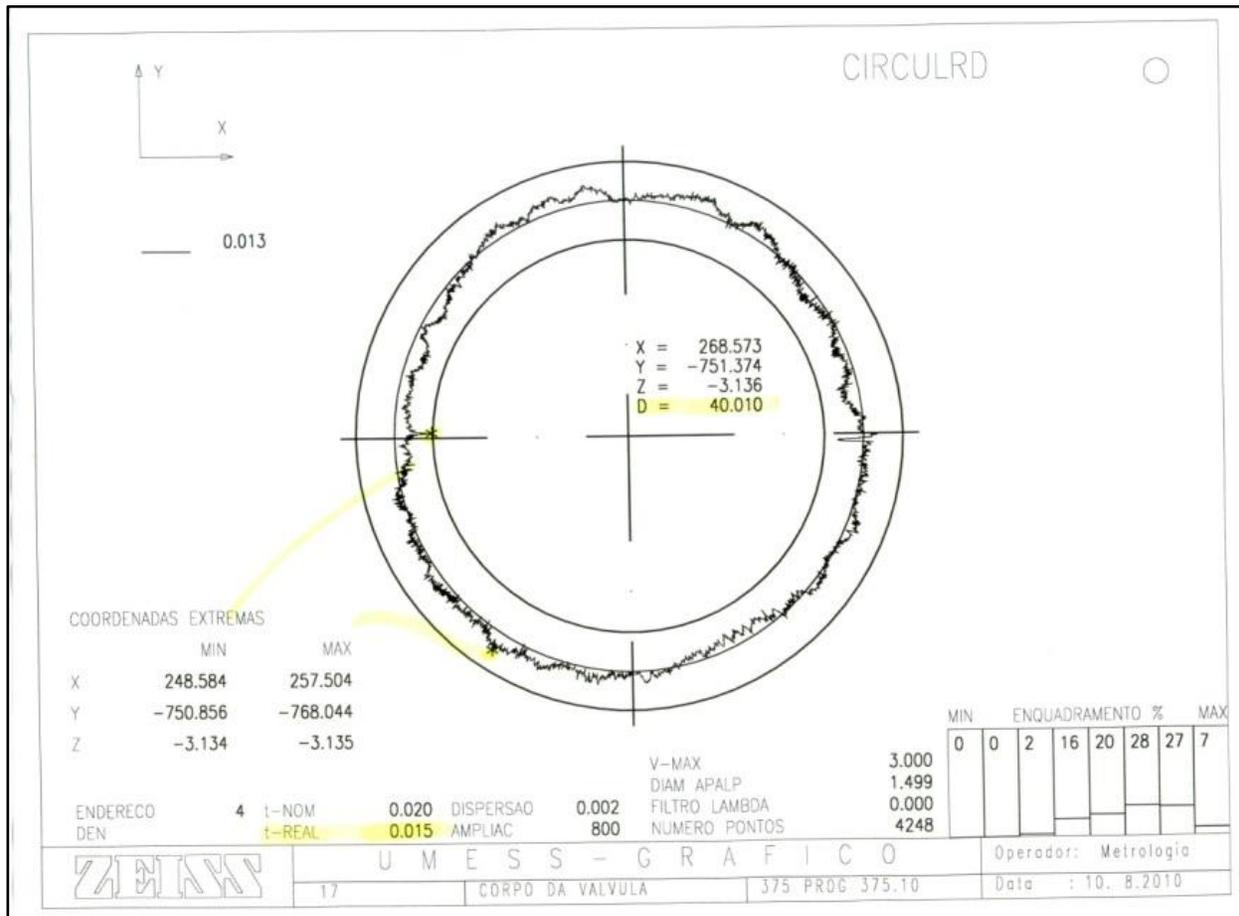


Figura 2.16 – Análise dimensional do núcleo, diâmetro de 40,010mm e tolerância de 0,015mm.

2.4.5 SISTEMA DE MOLAS PARA COMPRESSÃO

No decorrer do trabalho, varias molas foram utilizadas, inclusive algumas até foram construídas sob medida, porém a que foi mais adequada para se trabalhar devido a sua precisão e facilidade de definir sua força foram as molas do tipo prato [19].

Na Figura 2.17 e Figura 2.18 é possível observar, com detalhes, como elas são e que permitem ser utilizada em duas associações, em série e em paralelo.

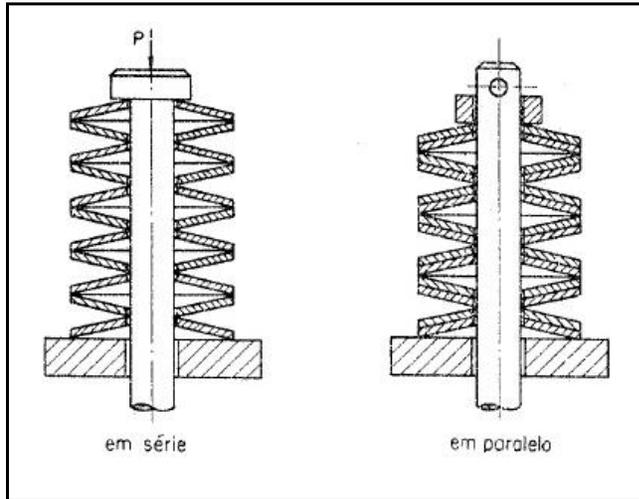


Figura 2.17 – Mola Prato, diferentes associações.

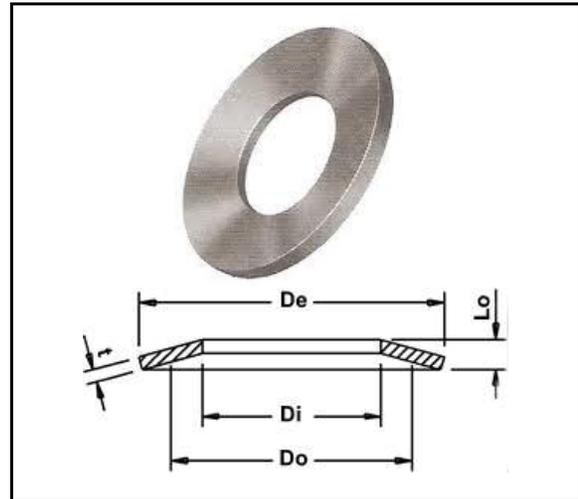


Figura 2.18 – Mola Prato, desenho.

Utilizando a configuração em série, aumenta-se a flecha³ da mola, com a configuração em paralelo aumenta-se a pressão total da mola. Abaixo, na (2.1 e na (2.2 estão as relações para cada associação.

$$P_{Total} = P \quad ; \quad F_{Total} = n \cdot F \quad (2.1)$$

$$P_{Total} = n \cdot P \quad ; \quad F_{Total} = F \quad (2.2)$$

Foram utilizadas combinações em série e em paralelo de 24 molas. Segundo o fabricante das molas [19], cada uma delas possuía pressão máxima de aproximadamente 0,6MPa e flecha de 0,15mm, totalizando, após a combinação de todas elas, pressão final máxima de aproximadamente 2,3MPa e flecha de 0,9mm.

³ Flecha da Mola é o valor máximo que a mola pode ser comprimida sem que haja prejuízo no seu desempenho.

2.4.6 COLAGEM DA FBG EM FIBRA

Para a fixação da fibra óptica no núcleo magnético foi utilizada uma cola epóxi, de dois componentes, com excelentes propriedades ópticas e mecânicas, cura⁴ a temperatura ambiente e baixa viscosidade. A mistura dos dois elementos da cola, conforme mostrado na Figura 2.19, foi feita, seguindo as recomendações do fabricante. O datasheet esta disponível no apêndice.



Figura 2.19 – Cola utilizada para a fixação da fibra. EPO-TEK 301

A limpeza da fibra e da superfície na qual ela foi colada foi previamente limpa com um detergente neutro e posteriormente com álcool isopropílico.

Como apresentado anteriormente, a abraçadeira de compressão foi projetada com uma cavidade para guiar a fibra e facilitar o processo de colagem.

⁴ Cura ou reação de cura é o processo de polimerização da cola, o endurecer da cola.

O desenho do anel de compressão forneceu a segurança necessária para que a colagem fosse feita no centro do núcleo e alinhada corretamente no sentido radial. Para esticar a fibra dentro desse gabarito de alinhamento, foi utilizado como peso um simples parafuso, uma vez que a fibra não necessitava ser colada com tração.

O sensor foi deixado durante praticamente dois dias fechado em uma sala sem sofrer nenhum distúrbio mecânico. Abaixo, na Figura 2.20 está a foto da maneira como a fibra foi colada.

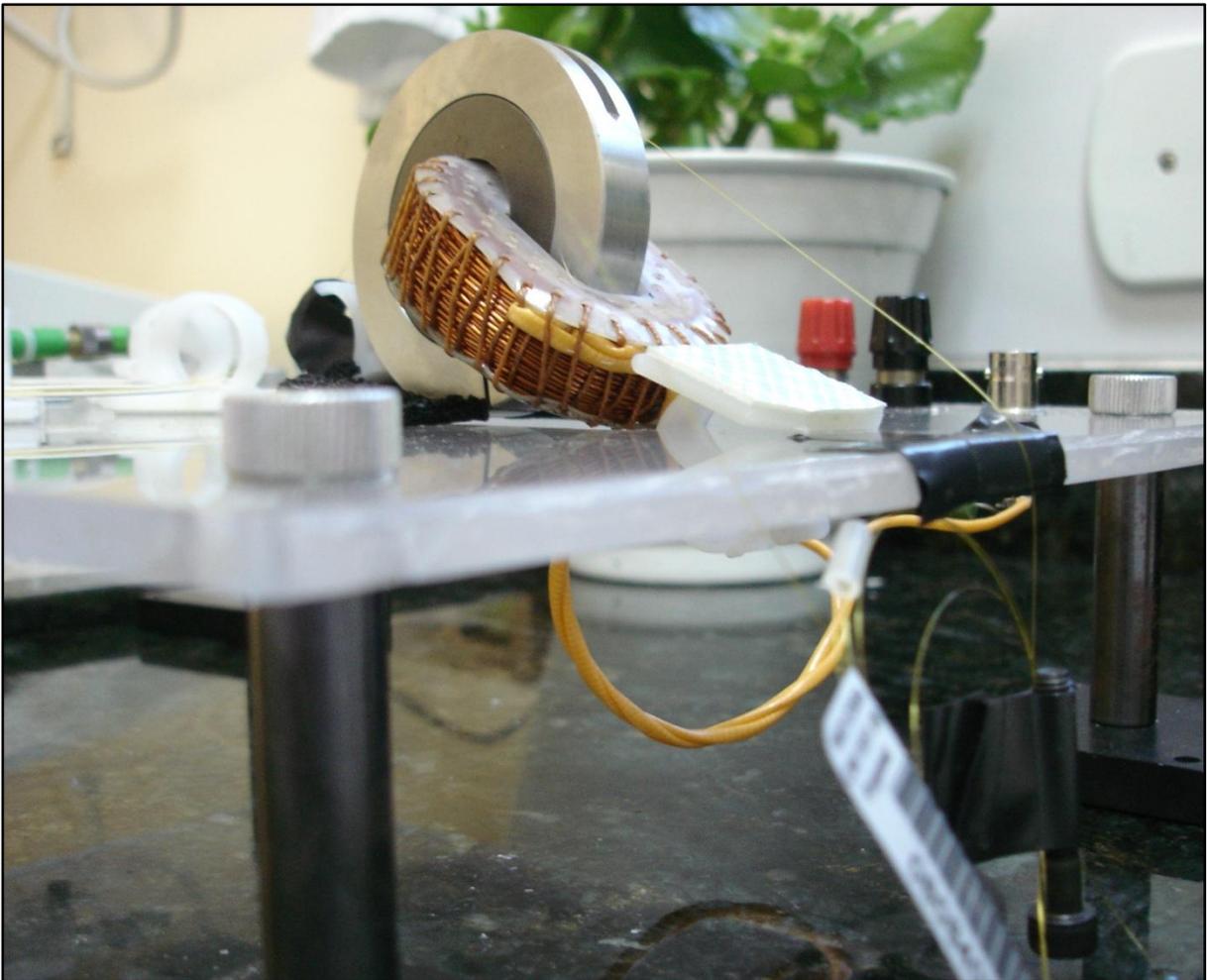


Figura 2.20 – Fibra óptica sendo colada ao núcleo.

Com o objetivo de facilitar o manuseio e evitar acidentes como a quebra da fibra, o conjunto do sensor, agora com a fibra óptica colada, foi acondicionado em uma placa de acrílico, a fibra foi devidamente enrolada e o seu conector óptico fixo.

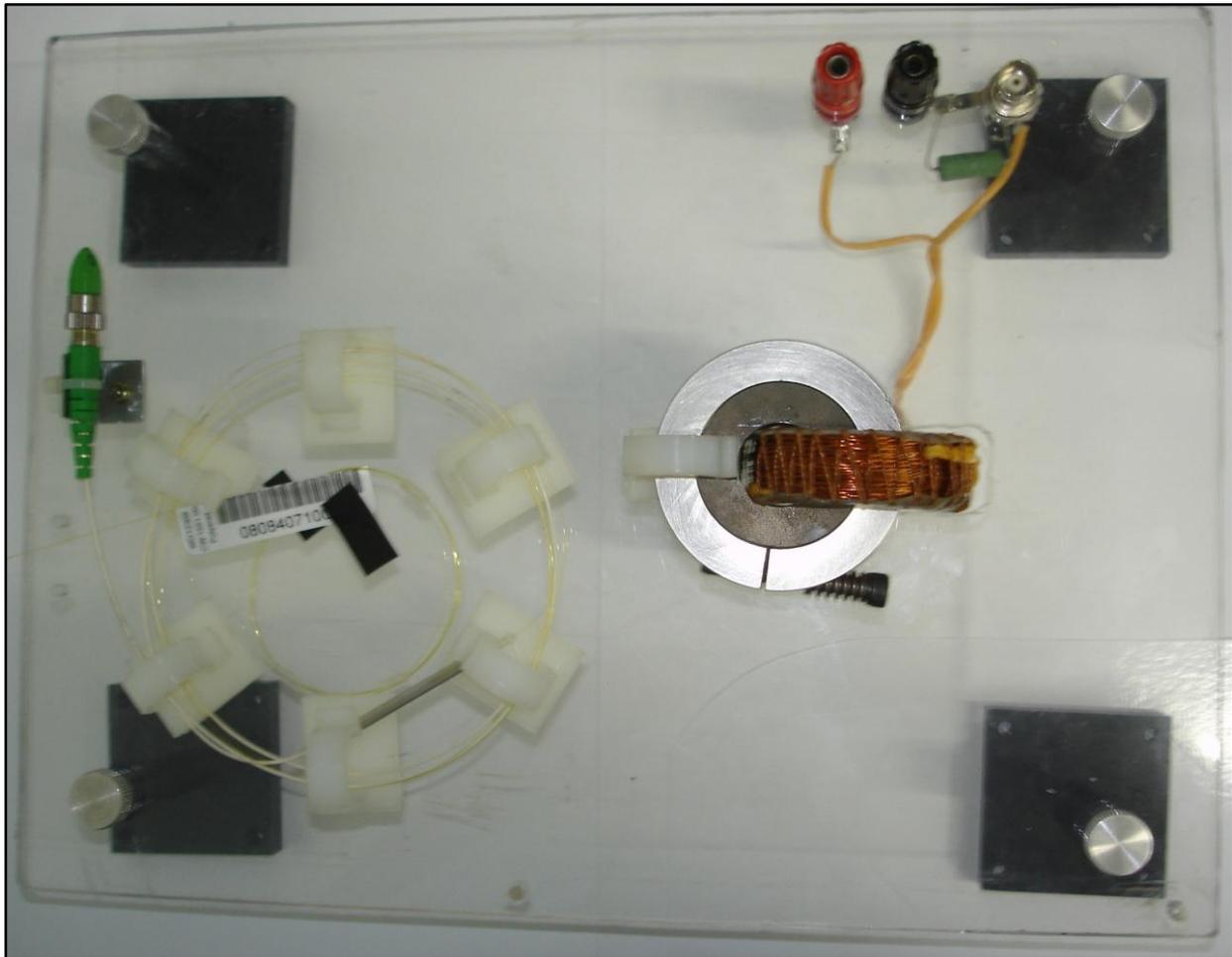


Figura 2.21 – Sensor condicionado em uma placa de acrílico.

O projeto do sensor em si, desenvolvido em um formato toroidal, foi construído de maneira criteriosa do ponto de vista dimensional, resultou em um projeto mecânico robusto, de peça única e conseqüentemente de baixo custo. A seguir, no Capítulo 3, serão apresentados os detalhes do setup que permitiram todos os testes e caracterizações.

Capítulo 3

Aparato Experimental

O objetivo dos dois capítulos anteriores foi prover embasamento ao que será apresentado agora. Nesse capítulo serão apresentados os detalhes a respeito dos equipamentos que fizeram parte do desenvolvimento do protótipo e também mostrar a metodologia utilizada para os testes e caracterizações.

3.1 Amplificador de potência

Com o objetivo de emular uma corrente através do sensor desenvolvido, foi acoplada ao protótipo uma bobina com 357 espiras de fio esmaltado de 0,6mm de espessura. Esse foi o volume máximo de espiras que foi possível montar. A bobina pode ser visualizada em detalhes na Figura 2.21 do capítulo anterior.

Um sinal senoidal de 60Hz gerado através de um gerador de sinais foi amplificado com um amplificador operacional na configuração tensão-corrente conforme representado na Figura 3.1. A corrente aplicada na bobina foi monitorada através de um resistor de shunt com resistência conhecida utilizando uma placa de aquisição de dados.

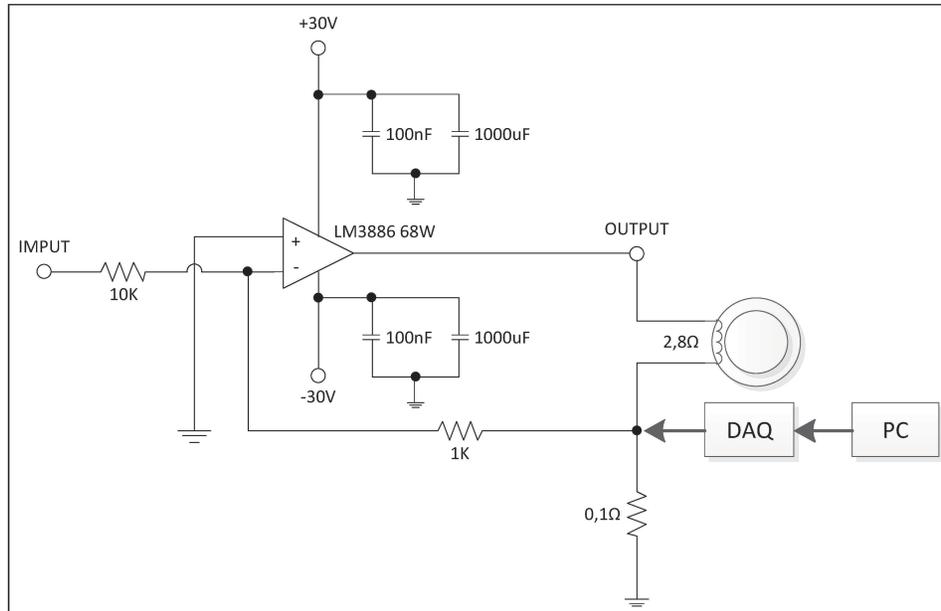


Figura 3.1 – Circuito do Amplificador de Potência

3.2 Placa de aquisição de dados, DAQ.

Todas as aquisições de dados foram feitas utilizando uma interface USB de baixo custo modelo USB-6009 da National Instruments [16] com resolução de 14 Bits e taxa de amostragem máxima de 48 KS/s. Uma foto da interface é apresentada na Figura 3.2 a seguir.

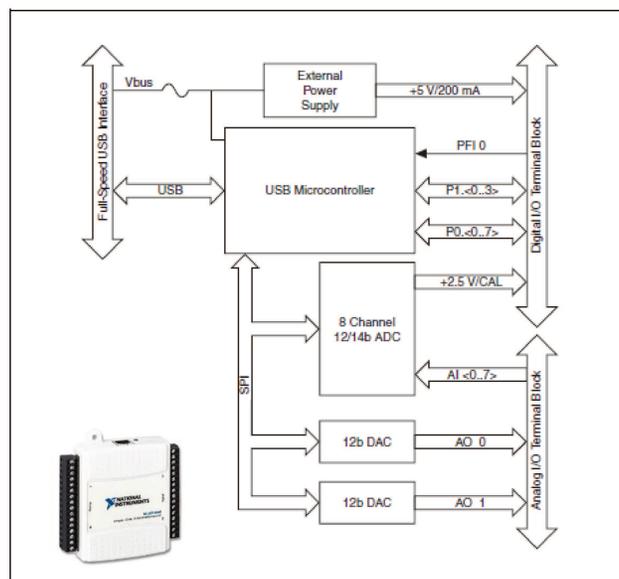


Figura 3.2 – Diagrama de blocos da placa de aquisição de dados.

3.3 Montagem 1 utilizando extensômetros

Conforme citado no Capítulo 2, devido ao baixo custo dos extensômetros e a sua simplicidade de uso, essa montagem intermediária foi utilizada para observar o fenômeno de magnetostrrição e adquirir um pouco de experiência prévia sem partir diretamente para um setup mais caro com a fibra óptica. Nessa montagem, o sensor funcionou conforme a proposta, porém sensível a EMI.

3.3.1 MÉTODO EXPERIMENTAL

No setup utilizado para a montagem 1, conforme diagrama mostrado na Figura 3.3, foi composto de um PC, que por um software comunicava-se através de porta USB com um gerador de sinais e uma DAQ.

O software controlava os parâmetros de saída do gerador de sinais. Sua saída foi então, amplificada, utilizando o amplificador da Figura 3.1.

O corrente resultante foi então aplicada a bobina com o objetivo de emular uma corrente elétrica passando pelo sensor.

Paralelo a excitação do núcleo, a DAQ, fazia a aquisição da medida de corrente aplicada e também da deformação do núcleo.

Para a medida da deformação do núcleo, foi utilizado um circuito de ponte com compensação de temperatura utilizando dois extensômetros. O circuito de ponte utilizado é representado na Figura 3.4 e os extensômetros escolhidos foram do fabricante HBM e estão apresentados na Figura 3.5.

Para monitorar o desbalanceamento da ponte, foi utilizado um amplificador de instrumentação com ganho de 10 mil conforme mostrado na Figura 3.6.

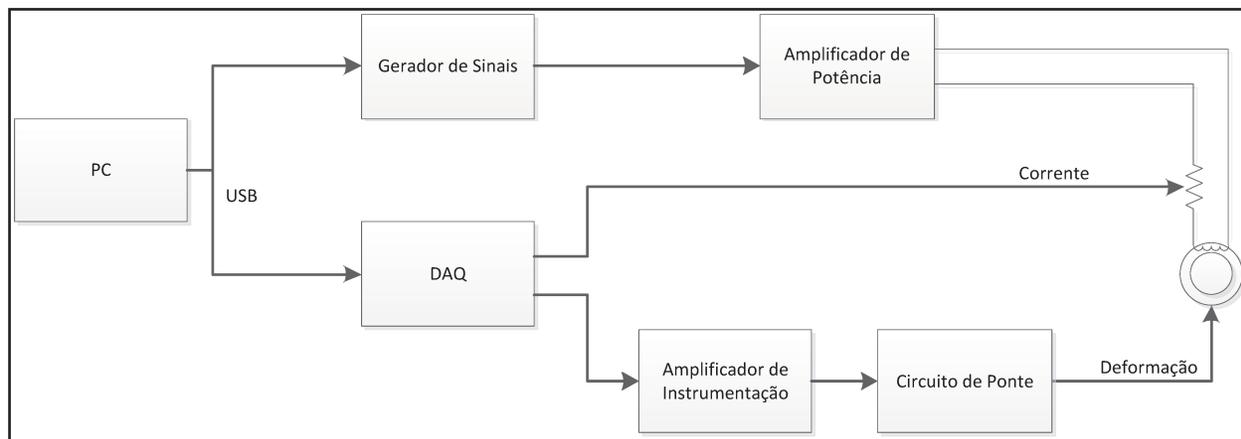


Figura 3.3 – Método experimental utilizado na montagem 1 com extensômetro.

3.3.2 CIRCUITO DE PONTE

O circuito de ponte utilizado para a medida de deformação do núcleo possuía um extensômetro adicional, afixado em um sentido onde o núcleo não apresentava deformação, o objetivo desse componente adicional, como citado anteriormente, foi fazer a compensação de temperatura.

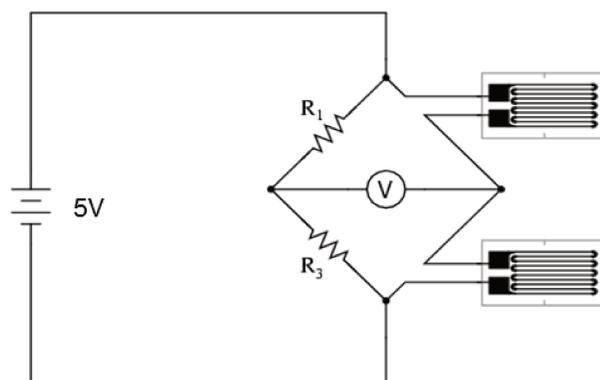


Figura 3.4 – Circuito de Ponte com compensação de temperatura.

O cálculo da deformação foi efetuado através da equação de transformação de tensão (V) em deformação (ϵ), conforme mostrado na (3.1).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \left(\frac{4}{E \cdot G \cdot K} \right) \cdot V \quad (3.1)$$

Onde, (E) é a alimentação da ponte, (G) é o ganho do amplificador de instrumentação utilizado e (K) é o fator gauge dos extensômetros utilizados.

Os extensômetros utilizados foram do fabricante HBM, Figura 3.5, de 120Ω do tipo LY11. Ele foi escolhido devido a sua a resposta com a temperatura ser muito semelhante com a do núcleo magnético utilizado.



Figura 3.5 – Extensômetro de 120Ω do tipo LY11.

3.3.3 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO

Conforme mostrado na Figura 3.6, o circuito foi montado utilizando um circuito integrado INA121.

O amplificador de instrumentação tem como característica ter alta impedância de entrada rejeitando o sinal de modo comum. O cálculo do seu ganho é apresentado na (3.2, a seguir).

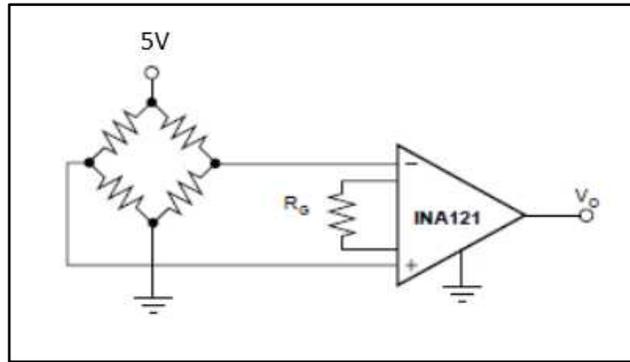


Figura 3.6 – Amplificador de Instrumentação

$$G = 1 + \frac{50K\Omega}{R_G} \quad (3.2)$$

3.3.4 SOFTWARE

Conforme mostrado na Figura 3.7, um software foi desenvolvido, de tal maneira que se pudessem ajustar alguns parâmetros de aquisição de dados, como por exemplo: taxa de amostragem, amplitude, frequência e off-set do sinal aplicado na bobina que emulava a corrente passando pelo sensor.

Como citado anteriormente, através da porta USB do PC, o programa controlava automaticamente o gerador de sinais e também se comunicava com a DAQ.

Com o software desenvolvido, foi possível fazer a aquisição dos sinais, filtra-los e calcular os resultados finais.

A maneira utilizada para filtrar o sinal foi fazendo a aquisição de 10 ciclos e calculando a média. A Figura 3.7 abaixo mostra a aquisição de 5 ciclos, o calculo de suas médias e também uma relação entre Campo Magnético e Deformação. O código fonte principal encontra-se na Figura 5.3 no apêndice.

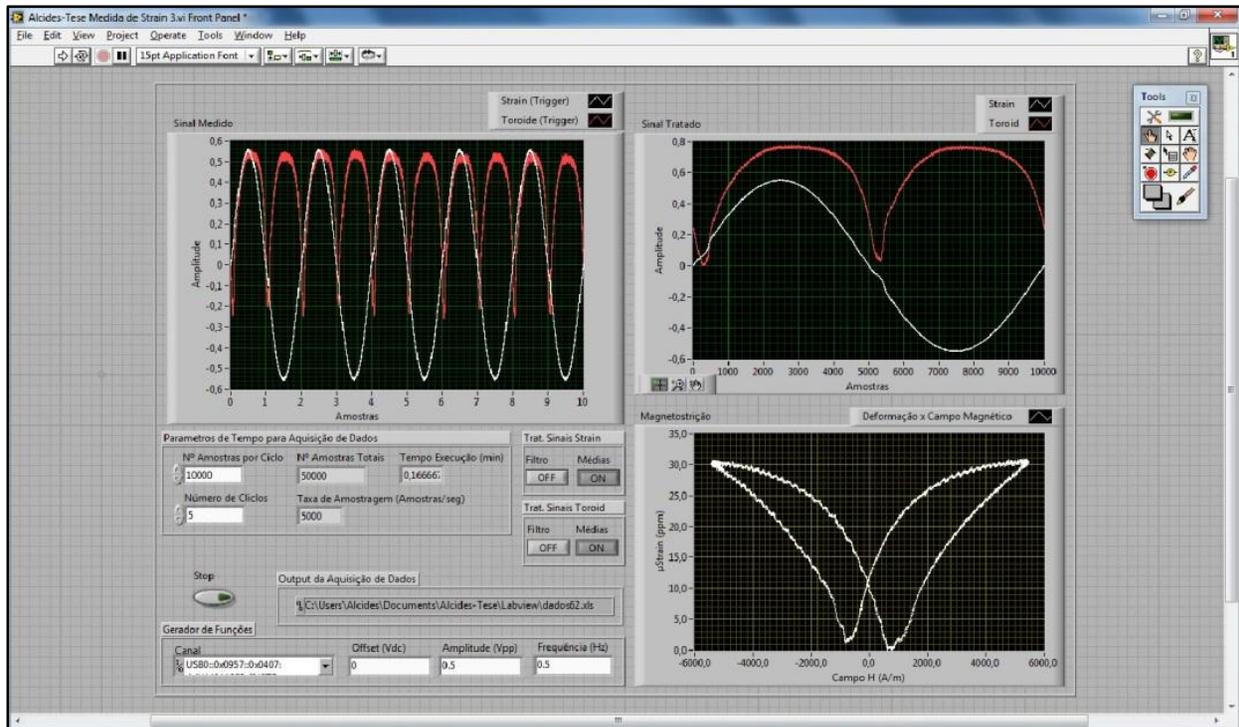


Figura 3.7 – Programa em LabVIEW da montagem 1 com extensômetros.

3.4 Montagem 2 utilizando fibra óptica

Após o aprendizado e a observação dos fenômenos com a montagem 1, foi montado a proposta final, seguindo o mesmo conceito, só que dessa vez com um setup mais elaborado, a medida de deformação do núcleo foi feita através de uma FBG em fibra, a eletrônica, o projeto mecânico e o software se tornariam mais precisos.

3.4.1 MÉTODO EXPERIMENTAL

O método utilizado para a montagem 2 é muito parecido com o método utilizado na montagem 1. Conforme diagrama mostrado na Figura 3.8 a seguir, um PC, executando um software comunicava-se através de porta USB com um gerador de sinais e uma DAQ.

O software controlava os parâmetros de saída do gerador de sinais. Sua saída foi então, amplificada, utilizando o amplificador da Figura 3.1.

A corrente resultante dessa amplificação foi então aplicada a bobina com o objetivo de emular uma corrente elétrica de alta tensão passando pelo sensor.

Paralelo a excitação do núcleo, como na montagem 1, a DAQ, fazia a aquisição da medida de corrente aplicada e também da deformação do núcleo.

Para a medida da deformação, foi utilizada uma grade de Bragg em fibra com um sistema eletrônico de interrogação apropriado.

Além disso, foi monitorada a temperatura do sensor através de um AD590 colado ao núcleo magnetostritivo.

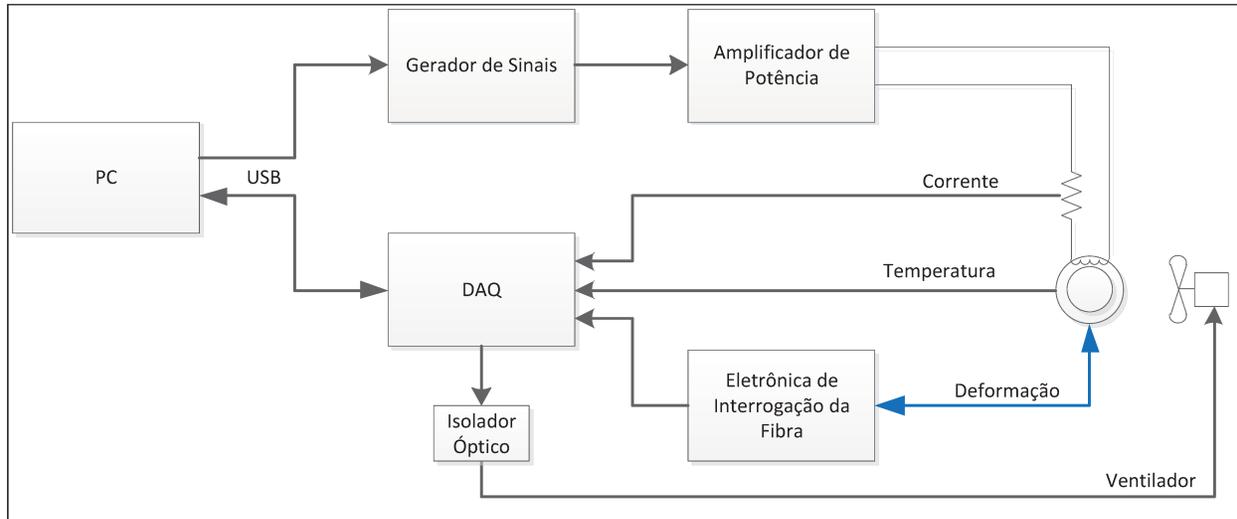


Figura 3.8 – Método experimental utilizado na montagem 2.

3.4.2 ELETRÔNICA DE INTERROGAÇÃO DA FIBRA ÓPTICA

Não serão aqui apresentados os detalhes de projeto e construção da eletrônica de interrogação porque ela já foi utilizada em outros trabalhos, [11], [12], [3].

Segue explicação detalhada do seu princípio de funcionamento e como ela foi utilizada para o desenvolvimento do sensor de corrente aqui apresentado.

Como mostrado na Figura 3.9 a seguir, a eletrônica de interrogação da fibra opera como um amplificador AC em torno de um ponto de operação DC. O sinal de entrada desse amplificador trata-se da variação AC do comprimento de onda central da FBG colada ao núcleo de Terfenol.

Quando aplicado um campo magnético ao núcleo que contem a fibra colada, ocorrem alterações dimensionais.

Essas mudanças dimensionais são detectadas pela FBG através da aplicação de uma luz Laser em um determinado comprimento de onda (λ) em sintonia com a grade (ponto de operação mostrado na figura Figura 3.9).

A então monitoração da intensidade da luz refletida indica as mudanças dimensionais no núcleo em função do campo magnético.

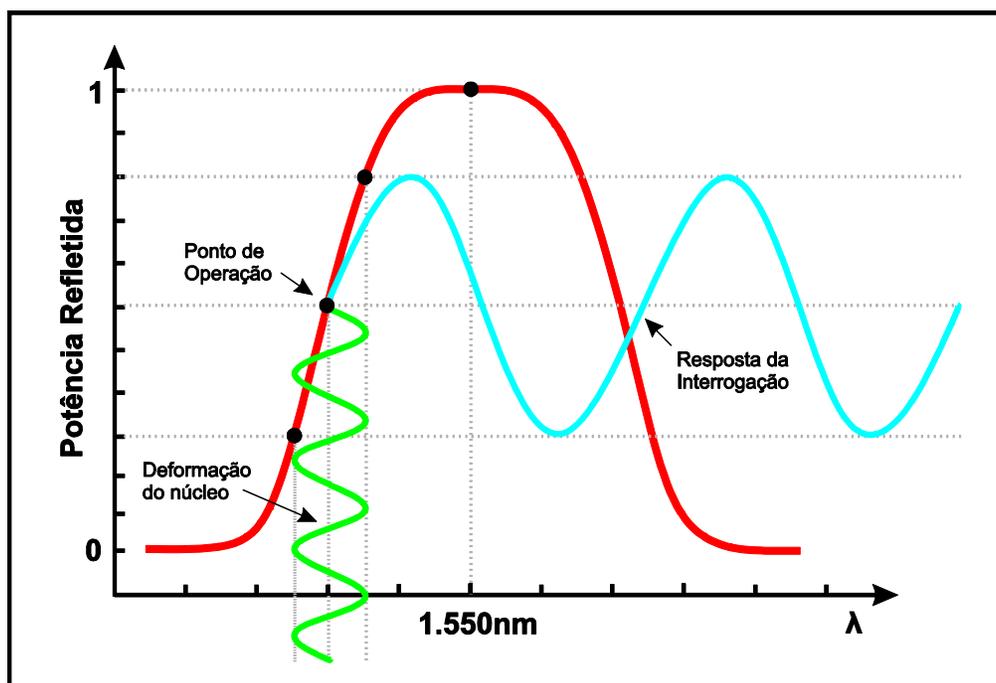


Figura 3.9 – Espectro da FBG utilizada e princípio de funcionamento da eletrônica de interrogação.

O método de interrogação utilizado, [12] e [11], possui compensação de temperatura que consiste em sintonizar o laser com o sinal refletido pela grade em um valor médio. Esse valor médio é mostrado na Figura 3.9 como ponto de operação. Considera-se então esse valor como sendo o valor de referência da realimentação do circuito eletrônico. Se a temperatura da fibra óptica variar, o valor medido difere do valor de referência, para compensar essa variação na sintonia, altera-se o λ central do laser garantindo que o laser volte para o ponto de trabalho da grade.

A eletrônica de interrogação da fibra como mostrado na Figura 3.11, é formada pelo circuito interrogador e o circulador óptico.

O sistema de interrogação injeta uma luz laser na grade e a intensidade do sinal refletida é medida por um fotodiodo.

A variação da intensidade ótica, causada pela deformação da FBG, nível AC, é medida por uma DAQ e então interpretada pelo software desenvolvido. Na Figura 3.10 esta o diagrama que ilustra o que foi dito.

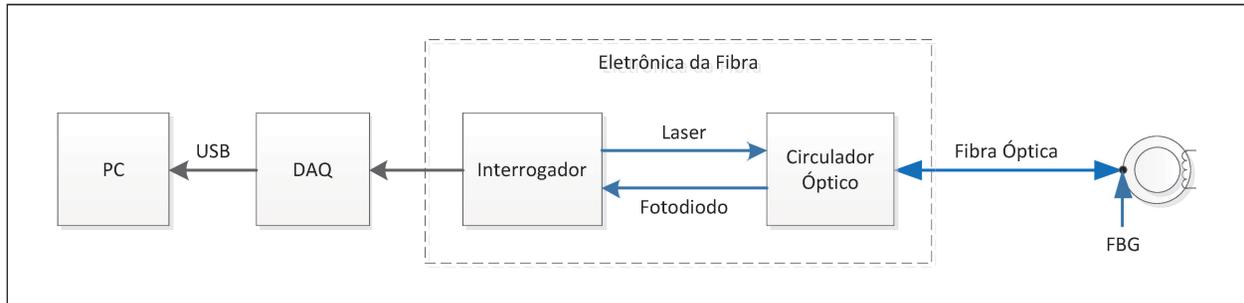


Figura 3.10 – Eletrônica de interrogação, diagrama de funcionamento.

Abaixo, na Figura 3.11, esta uma foto da eletrônica de interrogação montada.

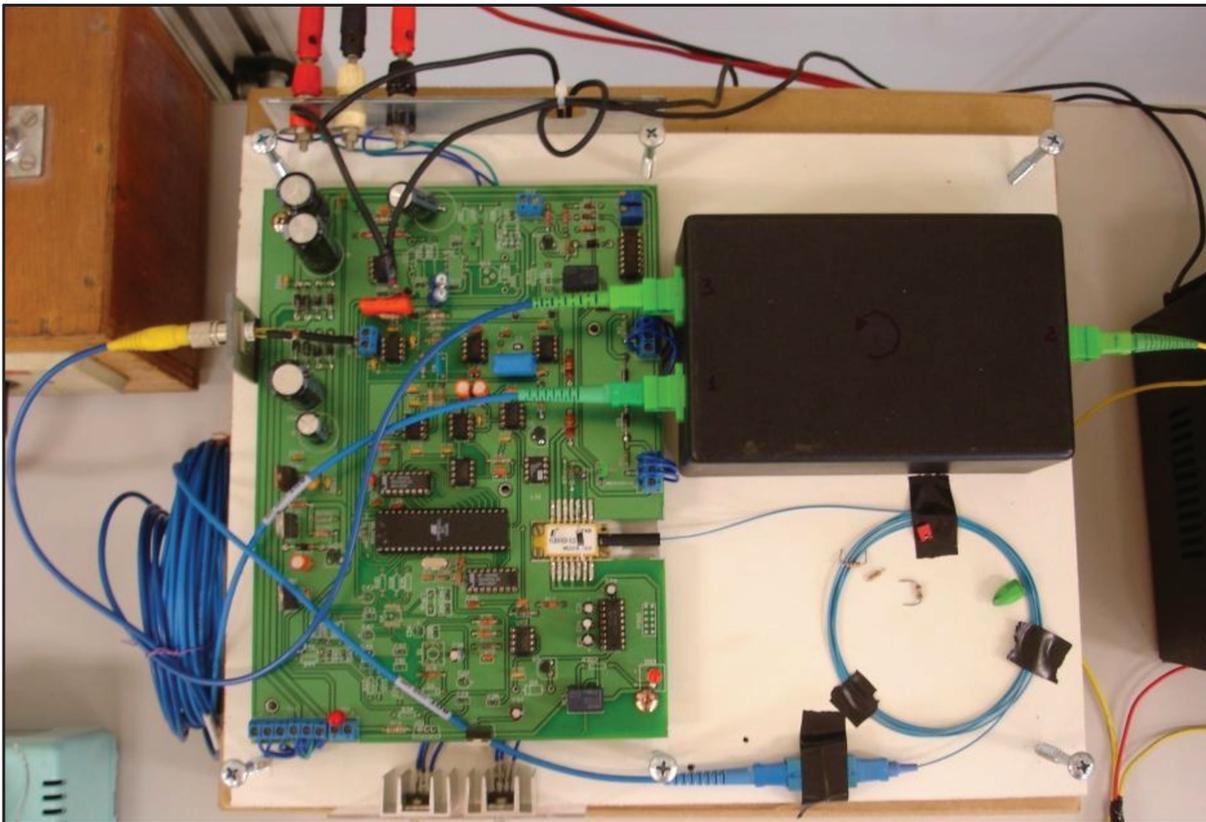


Figura 3.11 – Eletrônica da Fibra, Interrogador e Circulador óptico

3.4.3 MEDIDA DE TEMPERATURA

Para medir a temperatura do núcleo, foi utilizado um AD 590. Esse componente tem como característica fornecer $1\mu\text{A}/\text{K}$. Foi medido com a DAQ a tensão em cima de um resistor conforme Figura 27 e a equação utilizado para conversão de tensão para temperatura esta representada na Equação 8.

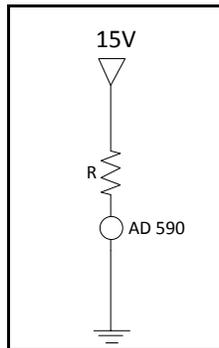


Figura 3.12 – Circuito Sensor de Temperatura

$$T (\text{°C}) = 273,15 - \frac{V}{R} \quad (3.3)$$

3.4.4 COMPRESSÃO DO NÚCLEO

Conforme método de compressão descrito no capítulo 2.4.5, as pressões aplicadas foram estimadas conforme mostrado na Tabela 1 abaixo.

Medida	MPa
1	0,3
2	0,5
3	0,6
4	0,8
5	0,9
6	1,1
7	1,2
8	1,4
9	1,6
10	1,7
11	1,9

Tabela 1- Estimativa dos valores de compressão.

Os níveis de compressão alcançados com o desenho toroidal do sensor foi superior ao reportado pelo fabricante no datasheet do material.

Isso significa que durante os testes, foi possível utilizar todo o potencial de benefícios do material, como por exemplo, o aumento de saturação, redução da histerese e ajuste da resposta para se aproximar a uma função quadrática.

3.4.5 SOFTWARE

O software foi desenvolvido em dois módulos recebendo algumas melhorias. O primeiro módulo foi encarregado de condicionar o setup de maneira adequada e padronizada para todas as medidas e depois fazer a aquisição de dados conforme mostrado no diagrama da Figura 3.13 a seguir.

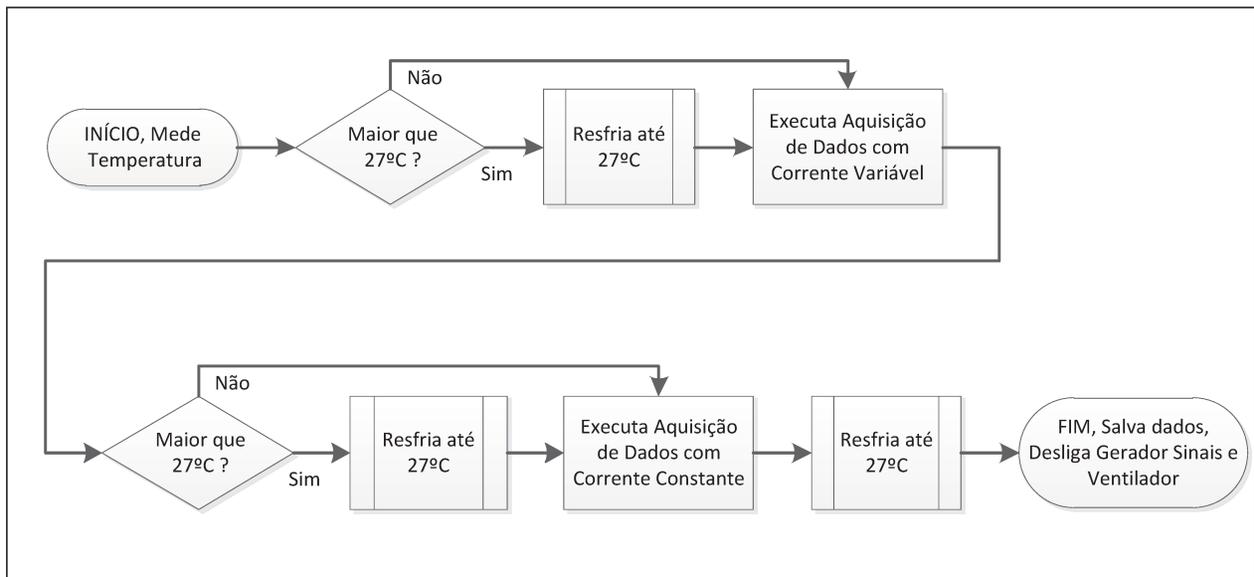


Figura 3.13 – Diagrama de funcionamento do software da montagem 2.

Duas aquisições de dados foram feitas: A primeira variando a corrente passando pelo sensor em 25 passos crescentes dentro do range de aproximadamente 200 a 900A. A segunda, mantendo uma corrente constante, variou-se a temperatura de 27 até 46°C.

Com a primeira aquisição, estudou-se a faixa de funcionamento do sensor. Com a segunda medida, foi obtida sua dependência com a variação de temperatura.

Conforme pode ser observado na tela do primeiro software conforme mostrado na Figura 3.14, podem-se ajustar todos os parâmetros de medida e então utiliza-los de maneira sistêmica para todas as compressões estudadas.

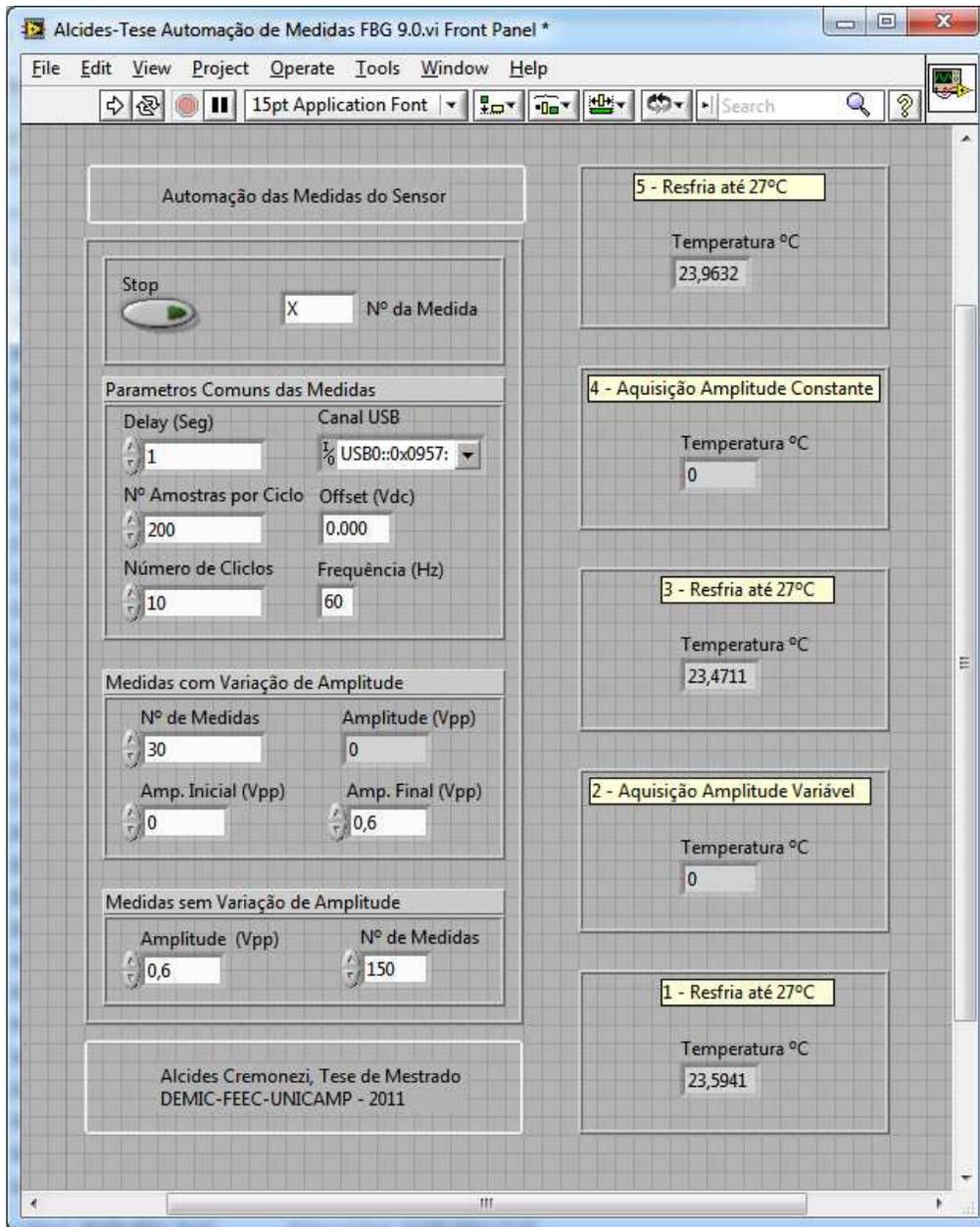


Figura 3.14 – Automação em LabVIEW para a aquisição de dados da montagem 2.

Foram feitas varias medidas com a sistemática do diagrama da Figura 3.13. A cada repetição, um ajuste de compressão diferente foi aplicado, e ao término de cada medida os dados eram adicionados no mesmo arquivo de banco de dados, em sequencia, conforme ilustrado na Figura 3.15.

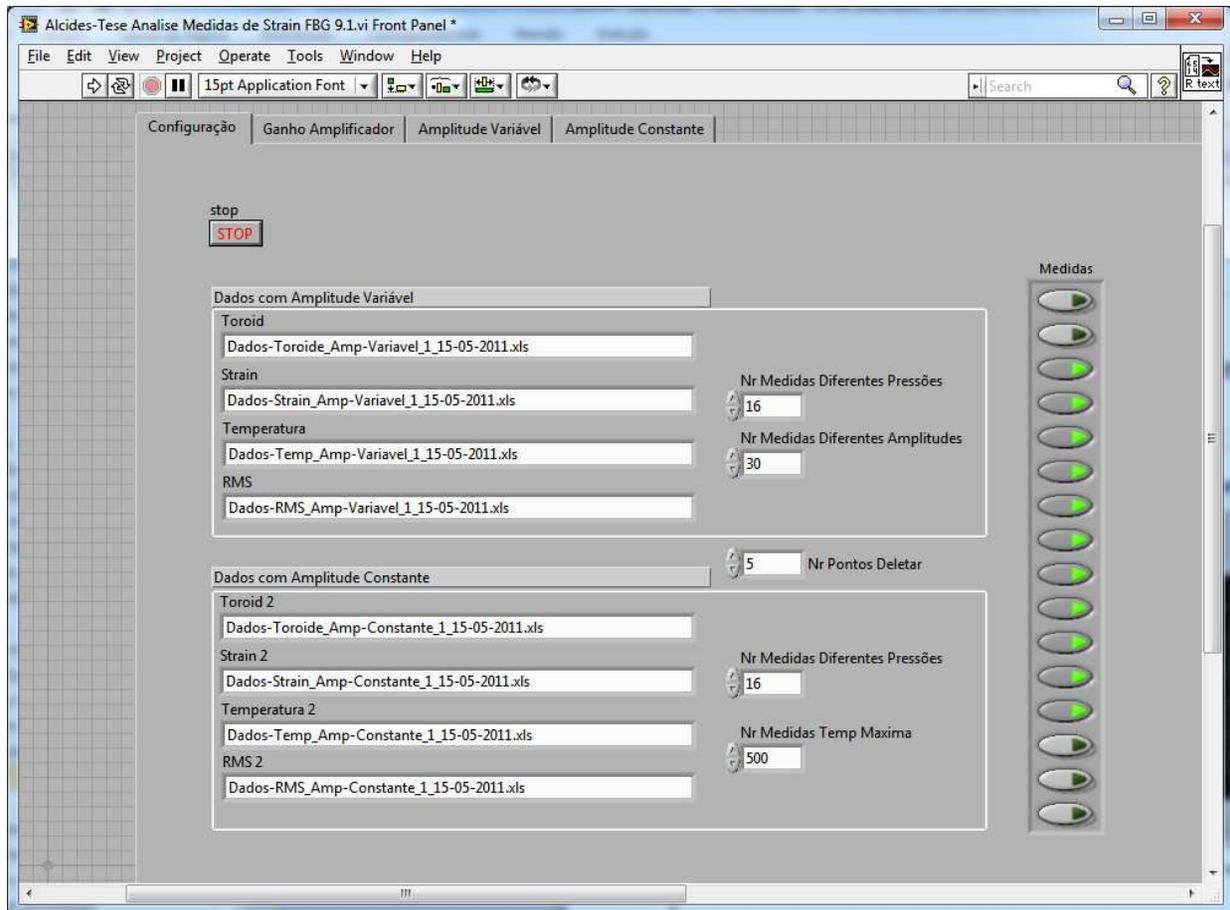


Figura 3.15 – Banco de dados da aquisição de dados

O segundo módulo, conforme mostrado na Figura 3.16, era responsável por efetuar os cálculos, traçar os gráficos e então mostrar os resultados através da leitura dos dados registrados no banco de dados gerado pelo programa 1. Uma tela do software para ilustrar o seu funcionamento é mostrado na Figura 3.16 a seguir.

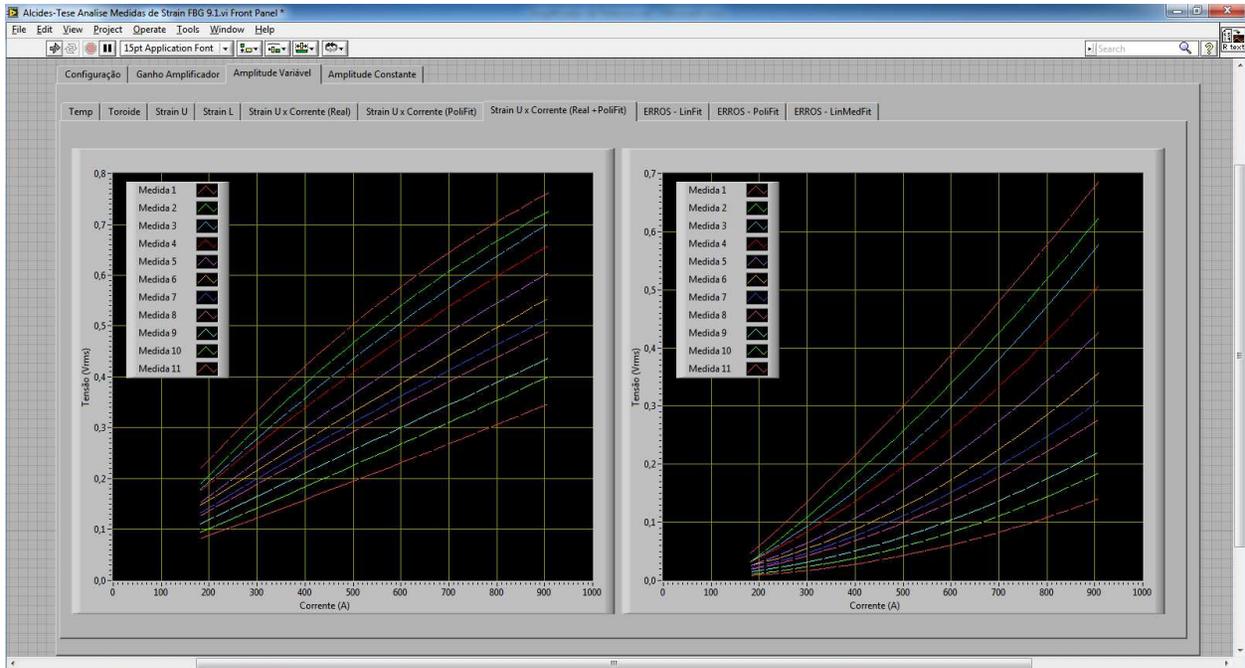


Figura 3.16 – Programa em LabVIEW para efetuar os cálculos da aquisição de dados da montagem 2.

Nesse capítulo foram apresentados os detalhes julgados mais relevantes referentes ao setup e a metodologia utilizada. A partir de então, o projeto foi totalmente apresentado, desde o seu escopo, passando pelos fenômenos explorados, projeto mecânico, definição da eletrônica, software e testes/caracterização. Agora chegou o momento de apresentar os resultados, que serão discutidos no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Análise dos Resultados

Nesse capítulo serão apresentados os resultados experimentais do projeto desenvolvido, assim como as expressões utilizadas para obtê-los. Os erros das medidas foram determinados e a sua dependência com a variação de temperatura e compressão do núcleo foram estudadas.

4.1 Montagem 1 utilizando extensômetros

Os resultados obtidos com essa montagem foram satisfatórios, foi possível observar o fenômeno de magnetostricção, consolidar melhor a nova abordagem sugerida e identificar as limitações com a EMI.

4.1.1 LIMITAÇÕES DO SENSOR

Como já era de se esperar, o sensor mesmo funcionando, possuía uma grande limitação que era o fato de não ser imune a EMI.

Portanto, para observar essa limitação, foi desligado o sinal na bobina que emulava a corrente atravessando o sensor, a ponte foi zerada, e o sinal de resposta é mostrado na Figura 4.1 a seguir. Conforme se pode observar, nenhuma interferência eletromagnética foi detectada.

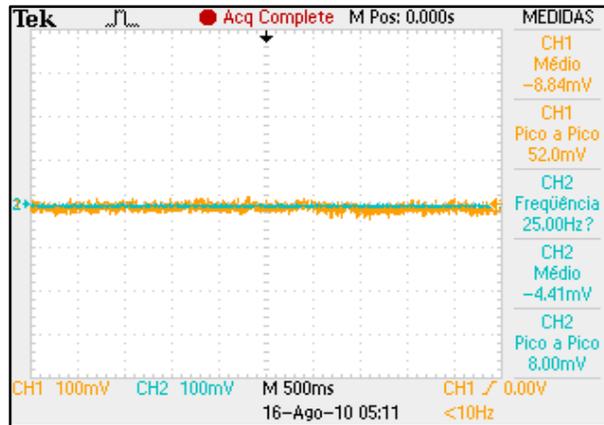


Figura 4.1 – Sinal da ponte zerada, sem sinal do Toroide

Em seguida, foi aplicado, na bobina, uma corrente constante de 10mHz, e o resultado, conforme ilustrado na Figura 4.2, foi satisfatório. O sinal azul trata-se da corrente aplicada no sensor. O sinal retificado, laranja, trata-se da magnetostrição do núcleo. Observando assim a sensibilidade do núcleo quando em presença de campo magnético.

Mais tarde, foi desligado a alimentação de 5V do circuito de ponte e o resultado é mostrado na Figura 4.3, exatamente o esperado. O sinal da resposta do núcleo praticamente foi para zero, mostrando assim sua incapacidade de media a magnetostrição.

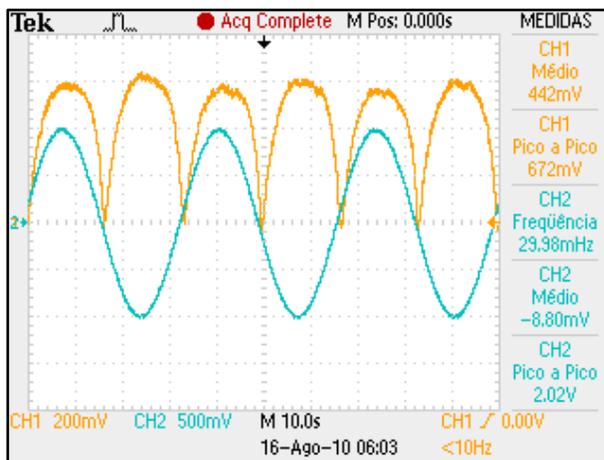


Figura 4.2 – Resposta do núcleo com Sinal de 10mHz com 5V na ponte.

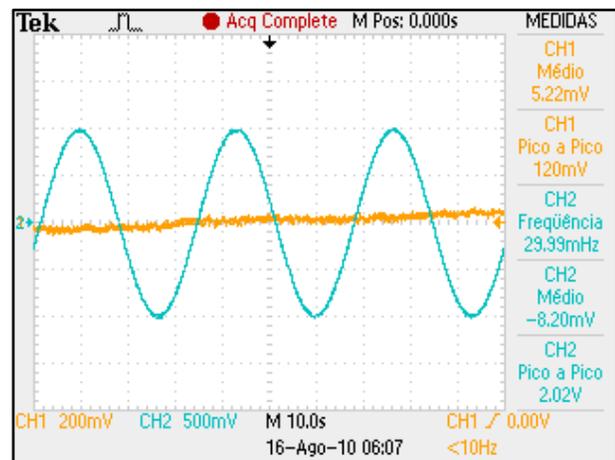


Figura 4.3 – Resposta do núcleo com Sinal de 10mHz sem 5V na ponte.

Conforme mostrado na Figura 4.4, um novo teste foi feito aplicando 60Hz ao sensor, porém o sinal de resposta medido apareceu distorcido.

Ao desligar a alimentação da ponte, de acordo com a Figura 4.5, o sinal permaneceu praticamente o mesmo, com uma pequena alteração. Mostrando que o campo magnético no núcleo estava possivelmente gerando uma corrente induzida nos extensômetro alterando o sinal desejado.

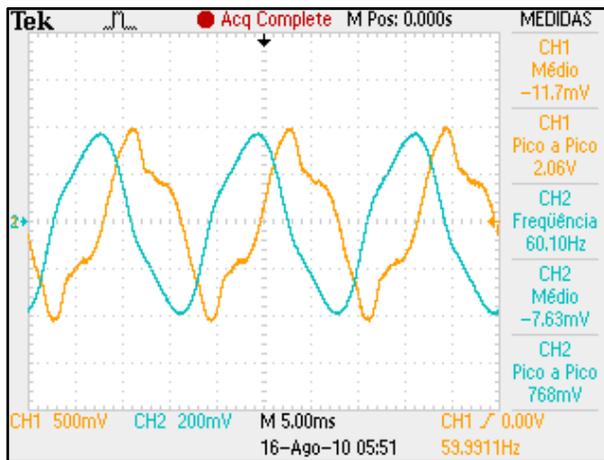


Figura 4.4 – Resposta do núcleo com Sinal de 60Hz com 5V na ponte.

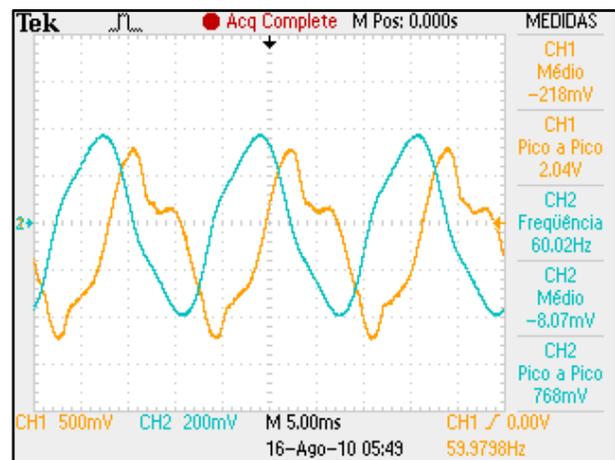


Figura 4.5 – Resposta do núcleo com Sinal de 60Hz sem 5V na ponte.

4.1.2 MEDIDAS EFETUADAS

Conforme citado anteriormente, na montagem 1, não foi possível efetuar os testes em 60Hz devido as limitações citadas anteriormente, porém, nas Figura 4.6 e Figura 4.7 a seguir, é possível observar qualitativamente os resultados de magnetostricção, *off-set* e histerese obtidos na frequência de 10mHz.

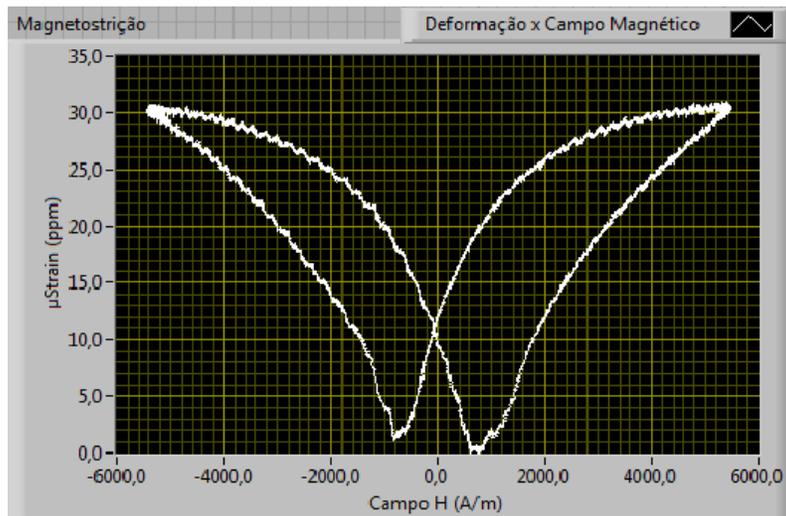


Figura 4.6 – Campo magnético versus deformação mecânica, obtido com a montagem 1.

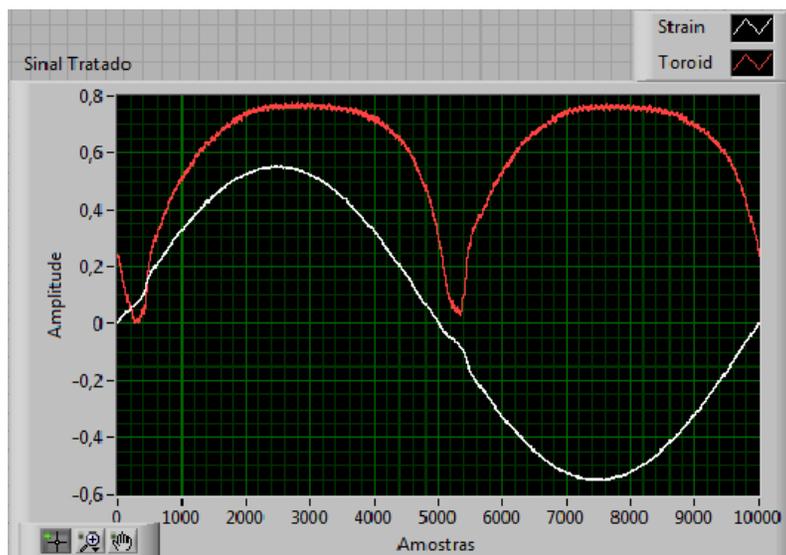


Figura 4.7 – Corrente aplicada no sensor e o sinal da deformação do núcleo, obtido com a montagem 1.

4.2 Protótipo 2 utilizando fibra óptica

Os resultados obtidos com essa montagem foram satisfatórios, foi possível obter as medidas de valores de corrente RMS em 60Hz com precisão moderada.

Os erros das medidas foram determinados e a sua dependência com a variação de temperatura e compressão do núcleo foram estudadas.

4.2.1 RANGE DE MEDIDA

O setup para a medida de corrente foi montado conforme a Figura 4.8. Um gerador de funções, conectado em um PC e controlado por um software aplicava sinal senoidal ao amplificador iniciando com amplitude de 20mVpp evoluindo em 25 passos até 600mVpp.

Após a amplificação, conforme explicado com maiores detalhes no Capítulo 3, a corrente aplicada durante os testes do sensor desenvolvido foi de aproximadamente 200A evoluindo em 25 saltos até aproximadamente 900A.

O conjunto de aparelhos de laboratório disponíveis mais a eletrônica desenvolvida para amplificar o sinal do gerador de funções não permitiu o teste do sensor de maneira consistente fora desse range, por esse motivo também, os testes não iniciaram do zero.

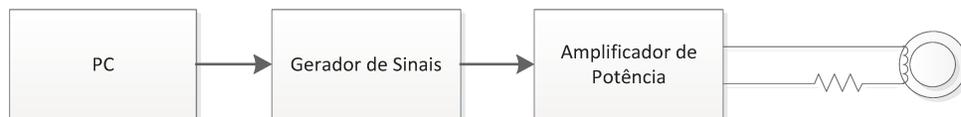


Figura 4.8 – Setup utilizado para emular corrente através do sensor.

Como mostrado na Tabela 1, dentro do range de corrente estudado, foram feitas 11 medidas, com compressões diferentes do núcleo.

Para cada uma dessas 11 medidas foi extraído a variação de temperatura durante o teste. Como pode ser observado na Figura 4.9, o resultado da variação em cada uma das medidas

realizadas dentro do range de corrente foi de menos que 0,3°C. O objetivo dessas medidas de variação de temperatura foi checar se o parâmetro de comparação entre elas estava consistente.

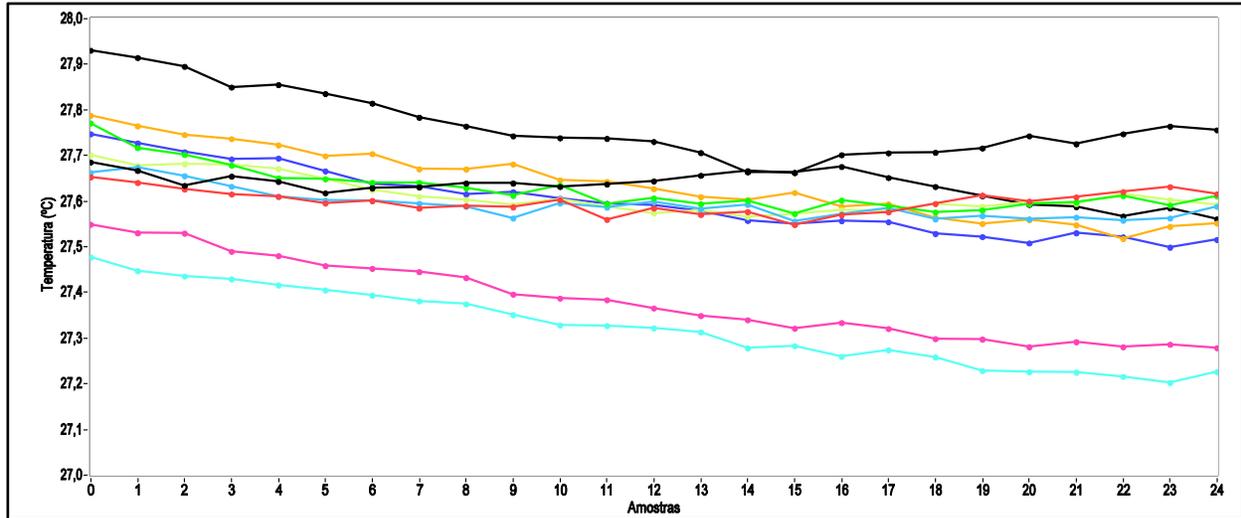


Figura 4.9 – Variação da temperatura ao longo de todas as medidas.

4.2.2 MEDIDA RMS DA CORRENTE

Sabendo que o sensor desenvolvido será utilizado para medir o valor RMS de uma corrente AC em linhas de distribuição e assumindo que a corrente medida pelo sensor esta na forma usual, conforme a (4.1).

$$I(t) = I_0 \text{sen}(wt) \quad (4.1)$$

Para obter o valor RMS é necessário utilizar a (4.2).

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [I(t)]^2 dT} \quad (4.2)$$

Portanto, para medir a corrente RMS do sensor utilizando uma DAQ, com alta taxa de amostragem, foi utilizado a (4.3) a seguir.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N [I(i)]^2} \quad (4.3)$$

Para cada ciclo de 60Hz foram adquiridos 200 pontos, N=200.

Conforme discutido durante o trabalho, para simplificar e reduzir custo no projeto do sensor, um dos objetivos foi utilizar o núcleo magnetostritivo sem as convencionais polarizações magnéticas DC utilizadas para transformar o comportamento unipolar do material em bipolar [2], [20], [21], [22]. Com isso, a deformação medida ficará sempre positiva.

Se a compressão aplicada ao Terfenol-D, for tal que a função de transferência do campo magnético versus deformação seja o mais próximo possível de uma função quadrática, o sinal medido será então diretamente $[I(t)]^2$, o que é a expressão necessária para calcular o valor RMS da corrente.

Baseado nas considerações citadas acima, como o valor da saída do sensor já era uma função quadrática, os valores RMS da corrente foram calculados conforme a (4.4) a seguir.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N I(i)} \quad (4.4)$$

Cada medida representada a seguir, Figura 4.10, foi efetuada com níveis de compressões diferentes. A medida 1 foi obtida com a menor compressão e a 11 com a maior compressão do núcleo.

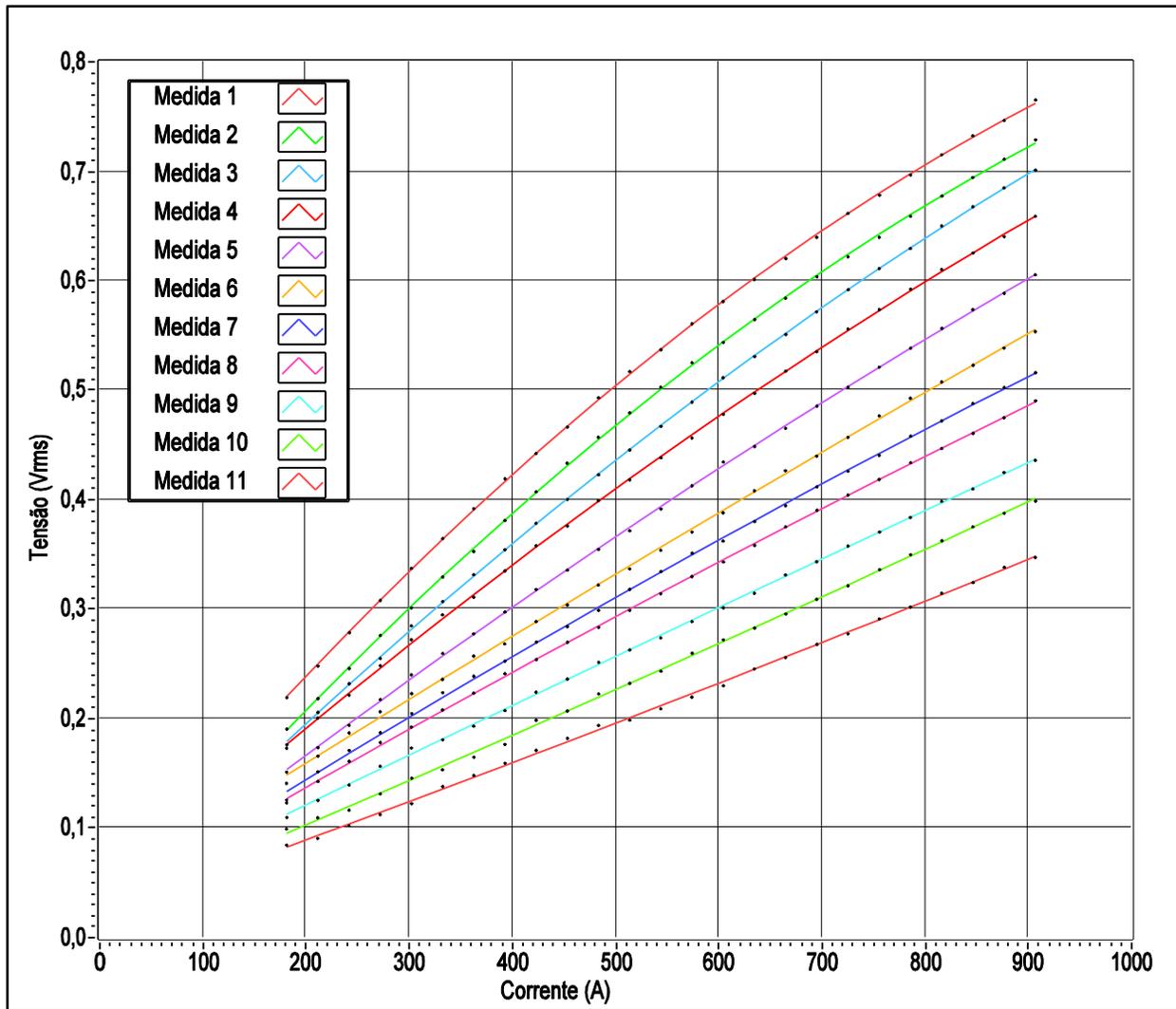


Figura 4.10 – Medidas de corrente, resposta do sensor em presença de diferentes compressões.

Conforme pode ser observado na Figura 4.10 acima, quando maior a compressão aplicada ao núcleo, mais a resposta apresenta um comportamento linear.

A partir dos dados X e Y acima, cada curva foi linearizada, utilizando a técnica de *best linear fitting* que minimiza o resíduo para encontrar a melhor reta que representa a curva. O eixo X foi fixo e a partir de Y foi calculado o $Y_{\text{Best Linear Fiting}}$ conforme mostrado na Figura 4.11 a seguir.

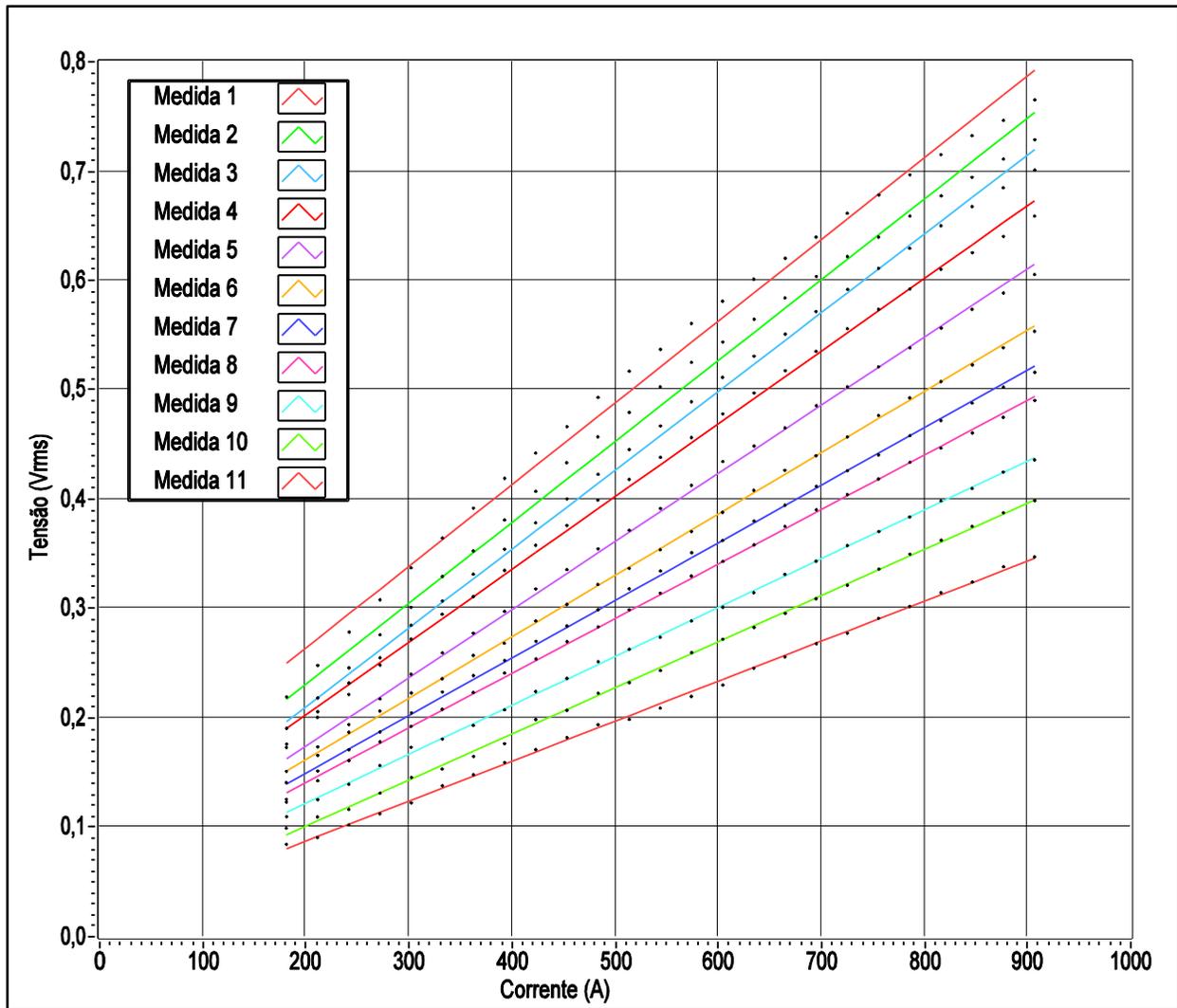


Figura 4.11 – Medidas linearizada de corrente.

Com o gráfico da Figura 4.11 linearizado pode-se observar com maior evidência, que conforme aumentamos a compressão do núcleo, mais a resposta se aproxima de um comportamento linear.

4.2.3 CÁLCULO DE ERROS DAS MEDIDAS DE CORRENTE RMS

A partir da linearização das curvas obtidas com as diferentes compressões, foram calculados os erros de cada medida utilizando a (4.5) abaixo.

$$Erro_{\%} = \frac{Y - Y_{Best\ Linear\ Fiting}}{Y_{Max}} \quad (4.5)$$

Utilizando o método de cálculo de erro apresentado acima na (4.5, foram obtidos os gráficos de distribuição de erro ao longo do range de corrente medido de aproximadamente 200 até 900A.

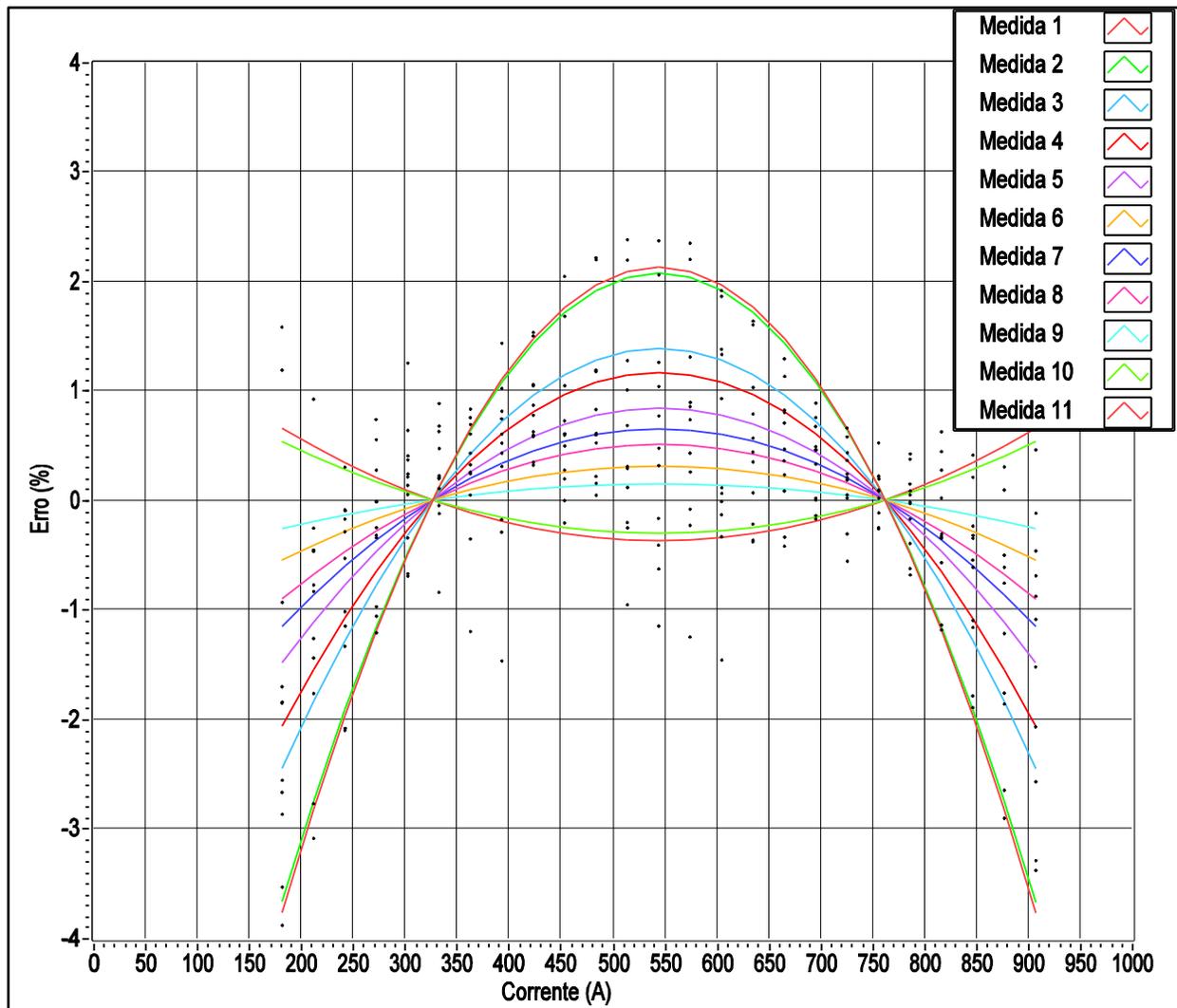


Figura 4.12 – Distribuição do erro dentro do range medido de 200 a 900A.

A seguir está a curva que representam o menor erro obtido.

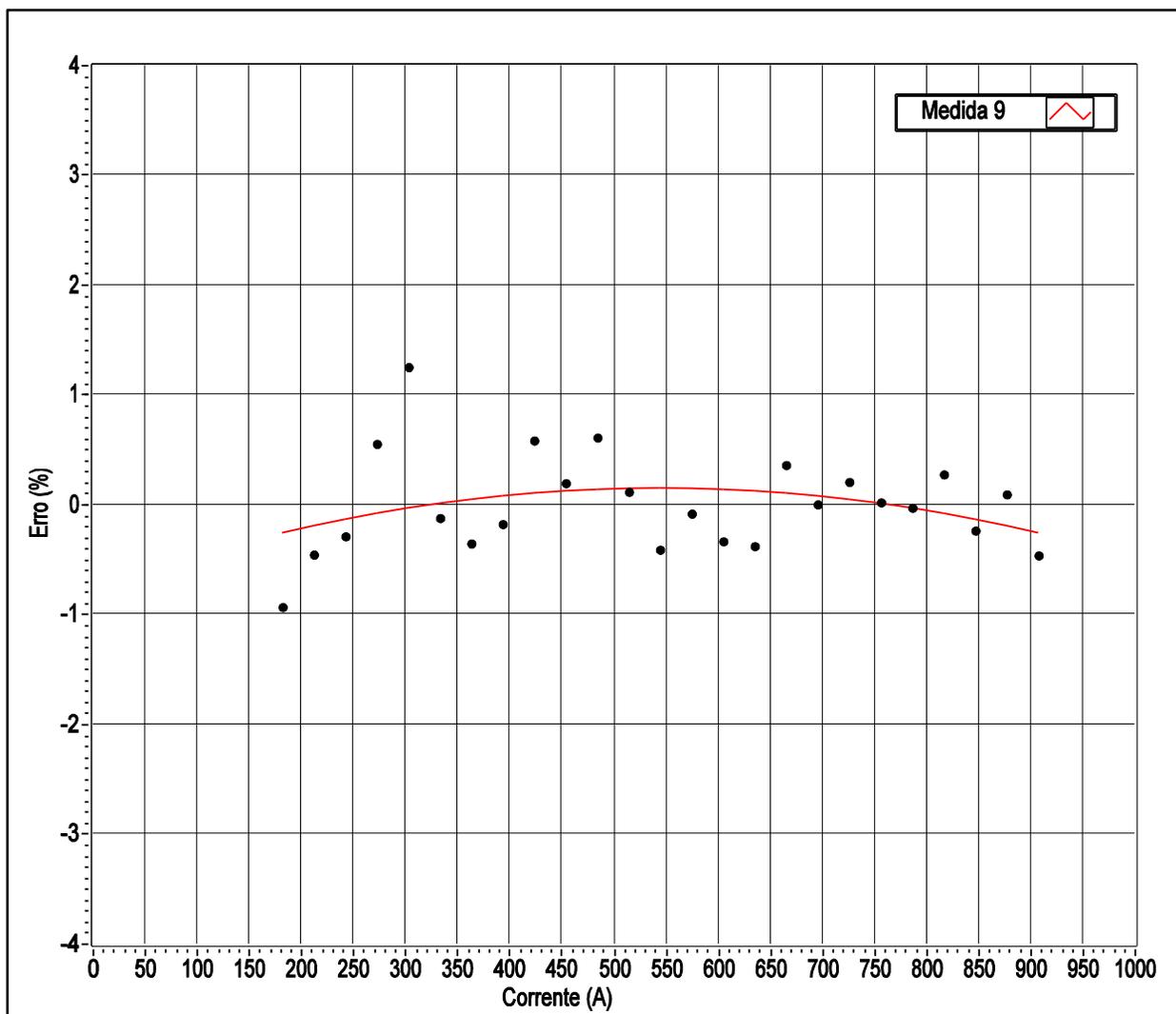


Figura 4.13 – Menor distribuição de Erro ao longo do range de 200 a 900A.

O gráfico acima mostra a melhor curva de erro obtida. O erro ao longo da medida entre 320 a 900A foi menor que 0,6%. No range de 200 a 320A alcançou picos de aproximadamente 1,2%.

O resultado obtido foi muito satisfatório frente a sua simplicidade em comparação com os sensores disponível no mercado [2], como se trata de uma abordagem nova, nenhum resultado era esperado. O erro foi tão pequeno provavelmente devido ao projeto mecânico inovador, a montagem criteriosa do protótipo e o sistema preciso de interrogação da fibra óptica.

4.2.4 DEPENDÊNCIA E SENSIBILIDADE COM TEMPERATURA.

Para definir a dependência com temperatura foi aplicado uma corrente constante de aproximadamente 900A por aproximadamente 10 minutos para cada compressão do núcleo.

Após 10 minutos com essa corrente, a bobina aqueceu o sensor naturalmente com os perfis de aquecimento mostrado na Figura 4.14 abaixo.

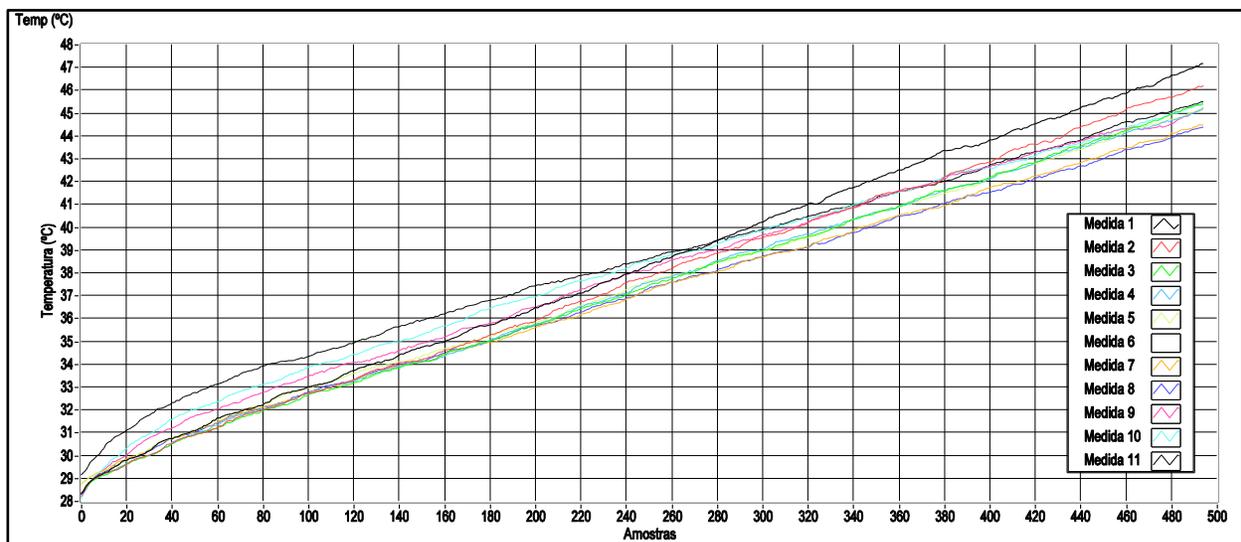


Figura 4.14 – Perfil de aquecimento utilizado para determinar a influência da variação de temperatura.

Conforme pode ser observado na Figura 4.14 acima, todas as compressões receberam praticamente o mesmo perfil de aquecimento. Essa medida foi feita para checar o parâmetro de comparação entre elas.

Medindo a saída RMS do sensor para cada compressão ao longo da variação de temperatura obtivemos as curvas a seguir.

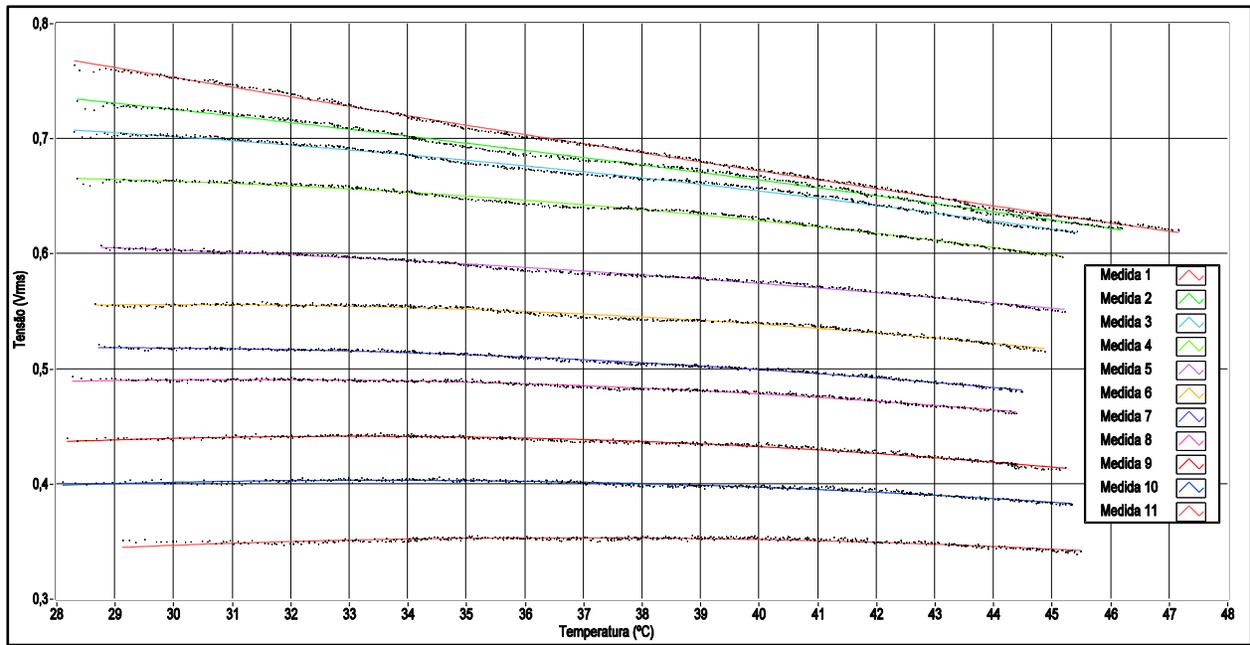


Figura 4.15 – Dependência da variação da temperatura para as diferentes compressões.

Os dados da Figura 4.15 acima foram então normalizados com o objetivo de colocar todos os dados em uma maneira que eles pudessem ser analisados juntos.

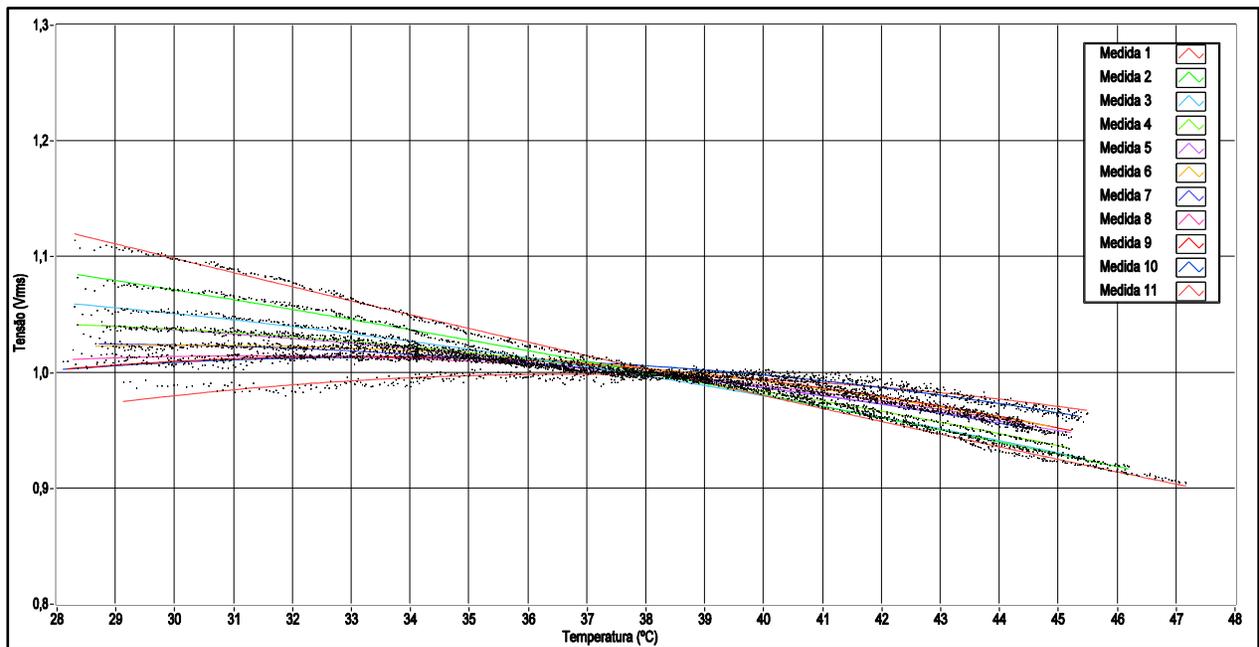


Figura 4.16 – Dependência da variação da temperatura para as diferentes medidas.

O protótipo desenvolvido foi testado em presença de uma variação de temperatura na ordem de 15°C e com isso foi possível observar que a técnica de interrogação funciona perfeitamente mantendo o ponto apropriado de operação da FBG.

4.2.5 CÁLCULO DE ERROS DA DEPENDÊNCIA DE TEMPERATURA

A partir dos dados X e Y da Figura 4.16, cada curva foi linearizada, utilizando para isso a reta média entre o valor máximo e mínimo. O eixo X foi fixo e a partir de Y foi calculado o Y_M , conforme a (4.6) abaixo.

Tal método de linearização foi aplicado devido ao resultado que se esperava era uma reta contínua com coeficiente angular igual a zero, mostrando que a medida de corrente RMS não variaria com o aumento da temperatura.

$$Y_M = \frac{Y_{Max} + Y_{min}}{2} \quad (4.6).$$

A partir da linearização das curvas obtidas com as diferentes compressões, foram calculados os erros de cada medida utilizando a (4.7) abaixo.

$$Erro_{\%} = \frac{Y - Y_M}{Y_{Max}} \quad (4.7)$$

Utilizando o método de cálculo de erro apresentado acima, foram obtidos os dados representados no gráfico de distribuição de erro da Figura 4.17.

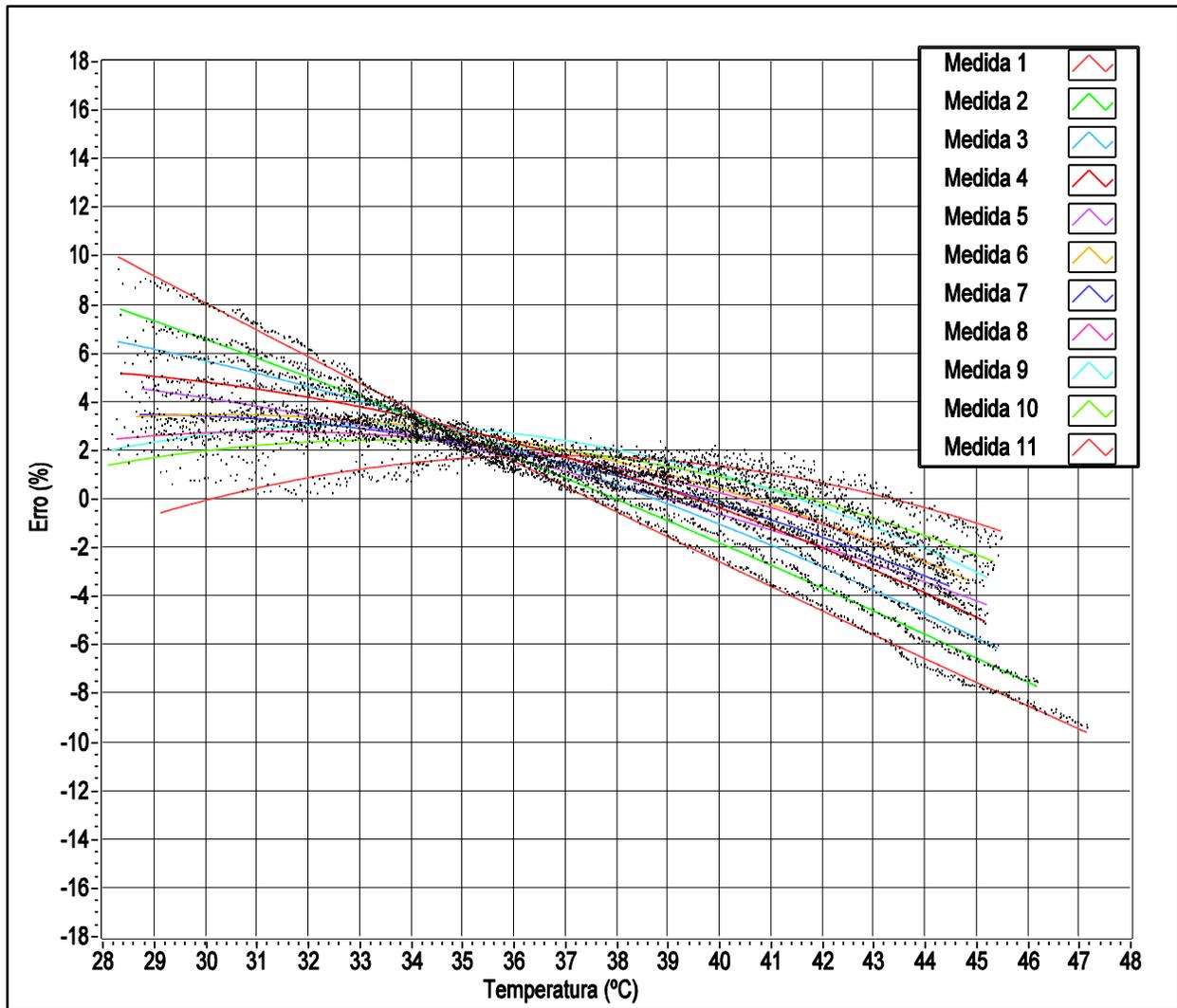


Figura 4.17 – Distribuição do Erro da Dependência de Temperatura.

A seguir, na Figura 4.18, está a curva que representam o menor erro.

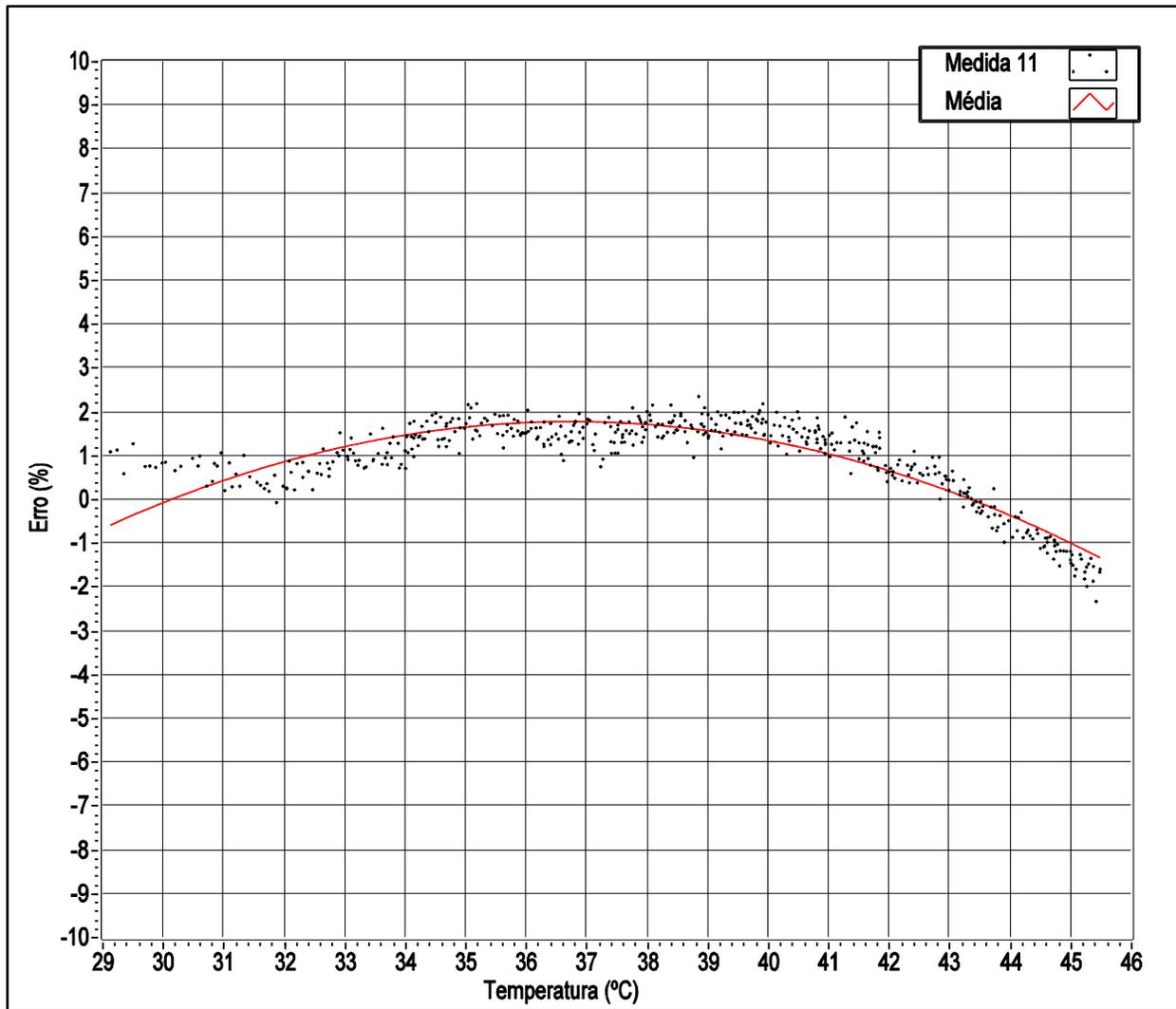


Figura 4.18 – Menor erro da dependência de Temperatura

O erro medido durante a variação de temperatura, como mostrado acima, alcançou valor máximo de aproximadamente 2% para uma corrente constante em RMS de 900A senoidal em 60Hz aplicada ao sensor.

Esse erro é causado pelo comportamento já conhecido do Tefenol-D, novas investigações serão conduzidas para observar a repetitividade desse comportamento e então implementar uma solução utilizando uma tabela de calibração para calcular o valor RMS da corrente sendo medida.

4.2.6 RESPOSTA A TRANSIENTE

O protótipo desenvolvido foi testado em presença de mudanças abruptas de corrente, simulando uma condição de falha em linhas de transmissão com o objetivo de testar se o sensor é capaz de detectar surtos de corrente na linha de alimentação em curtos períodos de tempo.

Para efetuar o teste, o sensor foi mantido em estado estacionário de medida, medindo uma corrente constante e em seguida recebeu um aumento de 150% da corrente aplicada. A resposta do sensor foi medida através de um osciloscópio digital e o resultado é mostrado na Figura 4.19 abaixo. A linha azul corresponde a corrente aplicada e o sinal laranja corresponde a resposta do sensor.

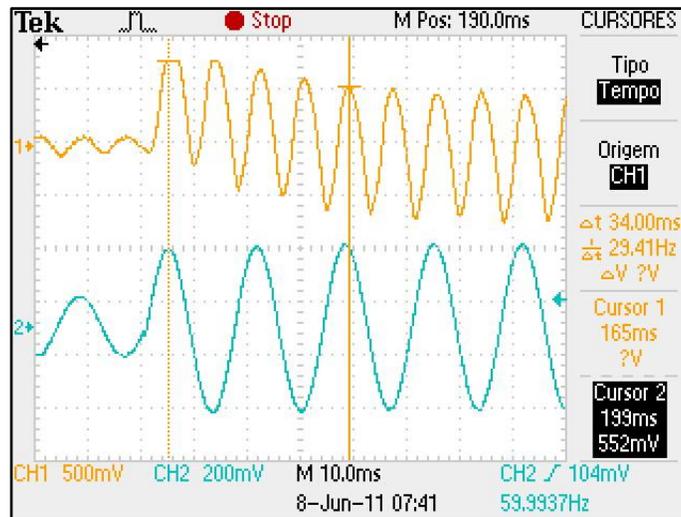


Figura 4.19 – Resposta a Transiente

Como é observado na Figura 4.19, após o transiente ser aplicado aparece um pico no sinal de saída do sensor e o sinal de saída necessita de aproximadamente 34ms para acomodar o resultado e então encontrar o estado estacionário novamente, como também pode ser observado, isso significa menos que dois ciclos de 60Hz para estabilizar o sinal medido.

Esse comportamento é 30% mais rápido que os valores obtidos com o transdutor apresentado em [2], [4] mostrando que ambos, o design mecânico e a rápida interrogação foram importantes para alcançar esse desempenho.

4.2.7 MEDIDAS DE MAGNETOSTRIÇÃO

Com os dados adquiridos durante a bateria de testes com o protótipo desenvolvido foi possível também extrair a curva de magnetostricção do material. Foram escolhidas cinco curvas que estão representadas na Figura 4.20.

Os valores da deformação mecânica do núcleo não foram calculados por não fazerem parte do objetivo do trabalho. Os valores mostrados abaixo no eixo Y da Figura 4.20 correspondem aos valores de tensão RMS obtidos através da saída do sensor.

Comparando os dados obtidos no gráfico abaixo e o seu equivalente fornecido no datasheet do material, Figura 1.12, observamos que o sensor desenvolvido pode medir correntes ainda maiores, pois o material satura com aproximadamente 240.000 A/m e o máximo que foi possível aplicar com o setup de teste montado foi de aproximadamente 14.000 A/m. Em outras palavras, isso significa que o protótipo montado ainda esta muito longe da saturação do núcleo magnetostritivo, como explicado anteriormente, essa faixa dinâmica de teste limitada aconteceu devido ao setup montado que restringiu o fundo de escala em apenas 900A.

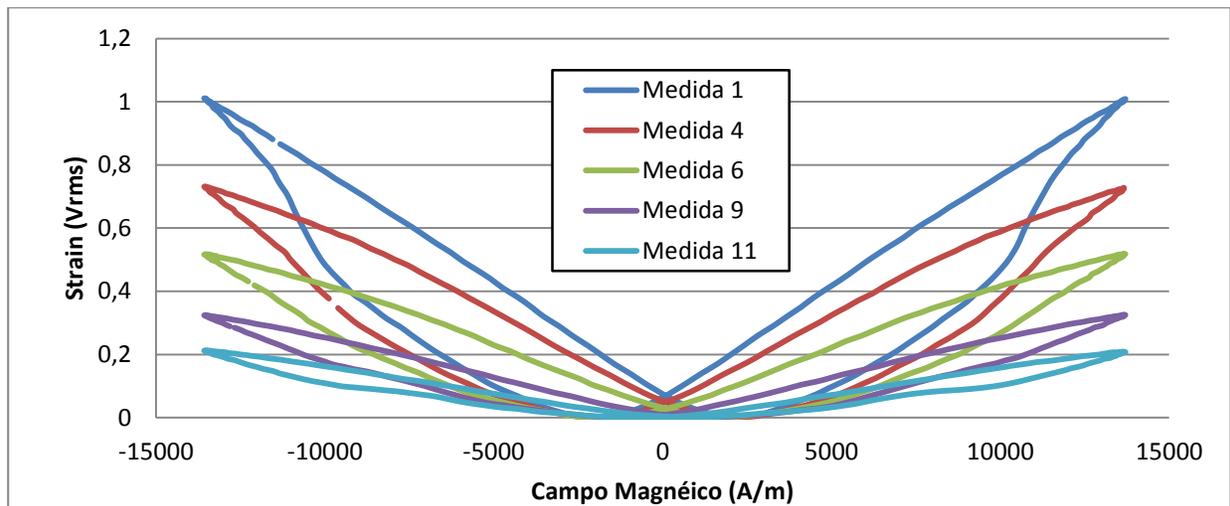


Figura 4.20 – Curva de Magnetostricção do Material

Os resultados em geral, apresentados nesse capítulo mostraram que o conceito e o protótipo são promissores e com um bom potencial para serem considerados em uma aplicação comercial.

Capítulo 5

Conclusão

A proposta de um Transdutor de Corrente Elétrica para Alta Tensão, utilizando Terfenol-D e grade de Bragg em fibra óptica foi, projetada, desenvolvida, implementada e testada em laboratório.

A nova abordagem utilizando um núcleo magnetostritivo toroidal sem utilizar as convencionais polarizações magnéticas DC para transformar a resposta unipolar em bipolar, mostrou que é possível desenvolver um sensor óptico de corrente, simples, robusto e de baixo custo.

A técnica desenvolvida é especialmente adequada para aplicações em altas voltagens, onde a introdução de uma polarização magnética DC é difícil de realizar.

O sistema de interrogação utilizado apresenta alta sensibilidade (uma vez que ele trabalha na inclinação positiva do perfil da FBG) e é capaz de compensar a variação DC do ponto de operação da FBG causada pela variação de temperatura no transdutor.

Alta sensibilidade e alta estabilidade a temperatura foram obtidos com um projeto simples o qual requer somente um circulador óptico e uma FBG.

O protótipo foi testado em um range de 200 a 900A e apresentou uma excelente linearidade especialmente entre 320 a 900A.

Um erro de 1,2% foi observado entre 200 a 320A enquanto que na operação entre 320 a 900A o erro calculado foi menor que 0,6%.

A resposta a transiente do transdutor de corrente mostrou que o sistema necessita de menos que dois ciclos de 60Hz para alcançar o novo estado estacionário após um aumento de 150% na corrente medida pelo sensor. Essa resposta é mais rápida que valores reportados previamente na literatura, e isto possivelmente foi alcançado devido a nova abordagem de detecção magnetostritiva com formato toroidal onde uma única peça de Terfenol-D foi utilizada como núcleo magnético.

O algoritmo de cálculo do valor RMS da saída pode ser realizado com somente um ciclo de 60Hz indicando que o sensor pode ser efetivamente utilizado não somente para estados estacionários de medida como também ele pode ser uma ferramenta poderosa para detectar e medir condições de falha e uma linha de transmissão.

O protótipo desenvolvido foi testado em presença de uma variação de temperatura na ordem de 15°C e com isso foi possível observar que a técnica de interrogação funciona perfeitamente mantendo o ponto apropriado de operação da FBG. O erro medido durante essa variação de temperatura foi de somente 2% para uma corrente constante de 800A aplicada ao sensor. Esse erro é causado pelo comportamento já conhecido do Tefenol-D, novas investigações serão conduzidas para observar a repetitividade desse comportamento e então implementar uma solução utilizando uma tabela de calibração para calcular o valor RMS da corrente sendo medida.

Além das investigações referentes ao comportamento do material frente a variação de temperatura, futuros trabalhos serão desenvolvidos para otimizar a lógica utilizada no sistema de interrogação incluindo no micro controlador os cálculos das medidas RMS, Isso irá proporcionar ao sensor, maior robustez.

Por fim, os resultados mostraram que o conceito e o protótipo são promissores e com um bom potencial para serem considerados em uma aplicação comercial.

Referências Bibliográficas

1. CAZO, R. M. et al. Sensor de deformação usando grades de bragg. **Revista Científica Periódica - Telecomunicações**, v. III, n. 1, p. 76-79, Dezembro 2000. ISSN 1516-2338.
2. DEBASHIS, S.; MOORE, J. A.; G. ENNIS, M. Desing of a Terfenol-D based fiber-optic current transducer. **IEEE Sensors Journal**, v. V, n. 5, p. 1057-1065, October 2005. ISSN 1530-437X.
3. DIAS, J. A. S.; LEITE, R. L.; FERREIRA, E. C. Electronic technique for temperatura compensation of fibre Bragg grattings sensors. **ELSEVIER, International Journal AEU of Electronics and Communications**, 2008. 72-76.
4. KERSEY ALAN, D. **Optical sensor system utilizing bragg grating sensors**. US Patent Nr: WO98/00740, 8 Jan 1998.
5. PÉREZ-MILLÁN, P. et al. A fiber-optic current sensor with frequency-codified output for high-voltage systems. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. XIV, n. 9, p. 1339-1341, September 2002. ISSN 1041-1135.
6. LEE, B. Review of the present status of optical fiber sensors. **Optical Fiber Technology**, v. I, n. I, p. 57-79, September 2003.
7. LIEHR, S. **Optical measurement of currents in power converters**. Royal Institute of Technology. Stockholm. 2006.
8. OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and applications in Telecommunications and Sensing**. I. ed. Norwood, MA: Artech House, v. I, 1999.
9. KOSTE, G. P. et al. **System and method for current sensing**. US Patent Nr: 2008/0042636 A1, 21 Feb 2008.
10. NATIONAL INSTRUMENTS. Fundamentals of FBG Optical Sensing. **National Instruments**, 2011. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/11821>>. Acesso em: 16 Julho 2011.
11. COSTA, E. F. **Nova técnica eletrônica para medida de temperatura com resolução de 0,5m°C usando sensores de fibras ópticas com grades de bragg**. UNICAMP. Campinas, SP. 2009.
12. LEITE, R. L. **Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas**. UNICAMP. Campinas, SP. 2006.
13. FEISEL, L. D. **The Electrical Engineering Handbook, Section V - Electrical Effects and Devices**. I. ed. New York: CRC Press LLC, v. I, 2000.

14. ETREMA PRODUCTS INC. Terfenol-D datasheet. **Etrema Products**, 31 Março 2011. Disponível em: <<http://www.etrema-usa.com/documents/Terfenol.pdf>>. Acesso em: 31 Março 2011.
15. G. ENGBAHL, E. **Handbook of Giant Magnetostrictive Materials**. New York: Academic, 2000.
16. NATIONAL INSTRUMENTS. NI USB-6008/6009 OEM device. **National Instruments**, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/371728b.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2011.
17. NATIONAL INSTRUMENTS. <http://www.ni.com/labview/>. **Labview**, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/>>. Acesso em: 25 May 2011.
18. AUTODESK. Autodesk. **Inventor**, 2011. Disponível em: <<http://usa.autodesk.com/autodesk-inventor/>>. Acesso em: 26 May 2011.
19. BAUER SPRING. Bauer Spring. **Precision Disc Spring made with super alloy**, 2011. Disponível em: <http://eng.bauer-spring.com/text.php?nav_id=3&pos=3&sf=16>. Acesso em: 10 jun. 2011.
20. QUINTERO, S. M. M. et al. A magnetostrictive composite-fiber bragg grating sensor. **Sensors**, v. I, n. 1, p. 8119-8128, November 2010. ISSN 1424-8220.
21. KOVANKO, T. E. et al. **Current Sensor**. US Patent Nr: 2005/0134253 A1, 23 Jun 2005.
22. BOSSELLMAN, T. Electric and magnetic field sensing for high voltage applications. **Proc. SPIE**, v. 3099, p. 305-316, 1997.
23. ZHANG, X. et al. **Experimental investigation on optical spectral deformation of embedded FBG sensors**. ITF Laboratories. Montreal, Quebec, Canada. 2007.
24. KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. 1^a. ed. London, UK: Academic Press, v. I, 1999.
25. K. B. ROCHFORD, A. H. R. A. G. W. D. Magneto-optic sensors based on iron garnets. **IEEE Trans. Magn.**, v. 32, n. 5, p. 4113-4117, Sep 1996.
26. B., B. Terfenol and Galferols: Smart magnetostrictive metals for intelligent transduction. **India Institute of Technology Kanpur**, v. II, n. 2, July 2005.

Apêndice

5.1 Desenho da bobina

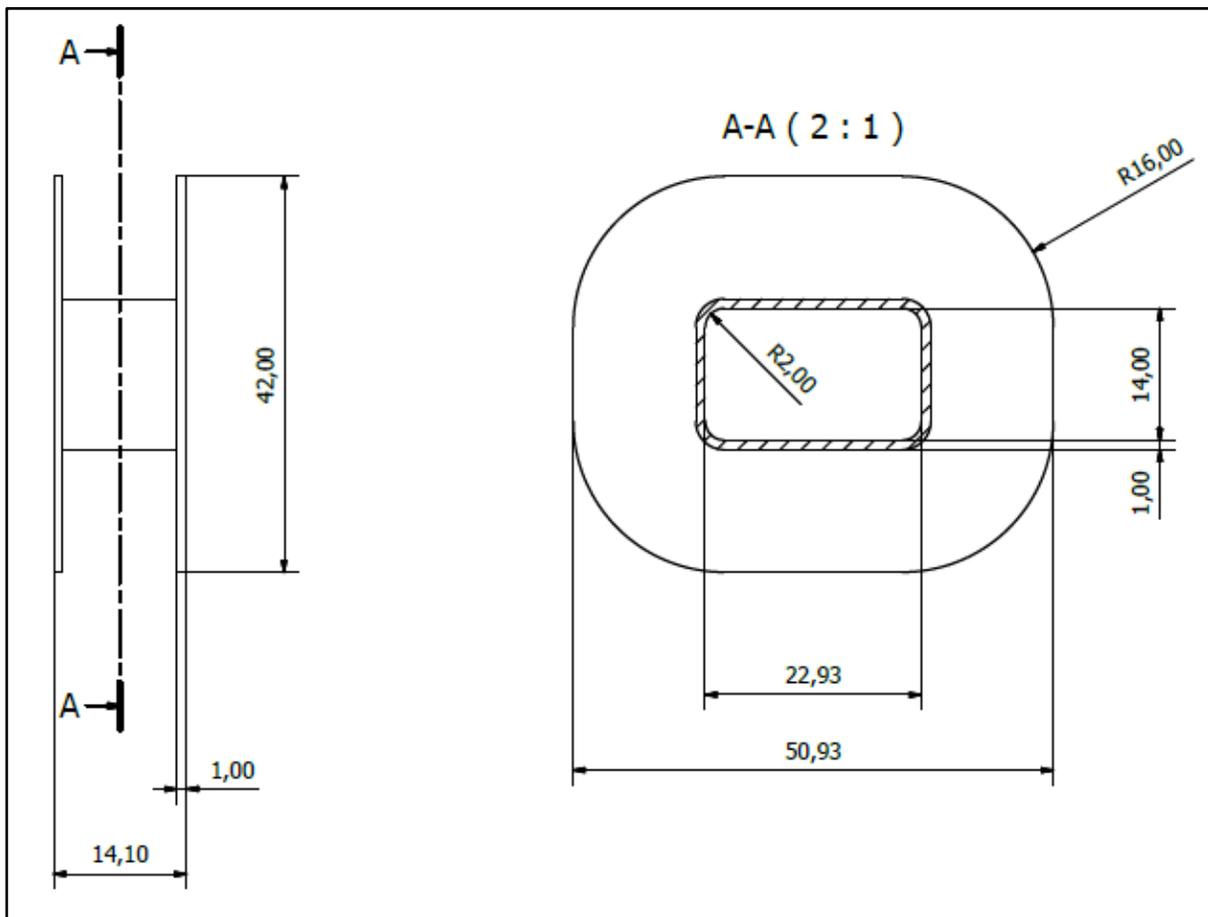


Figura 5.1 – Desenho da bobina

5.2 Detalhes do Amplificador de Instrumentação

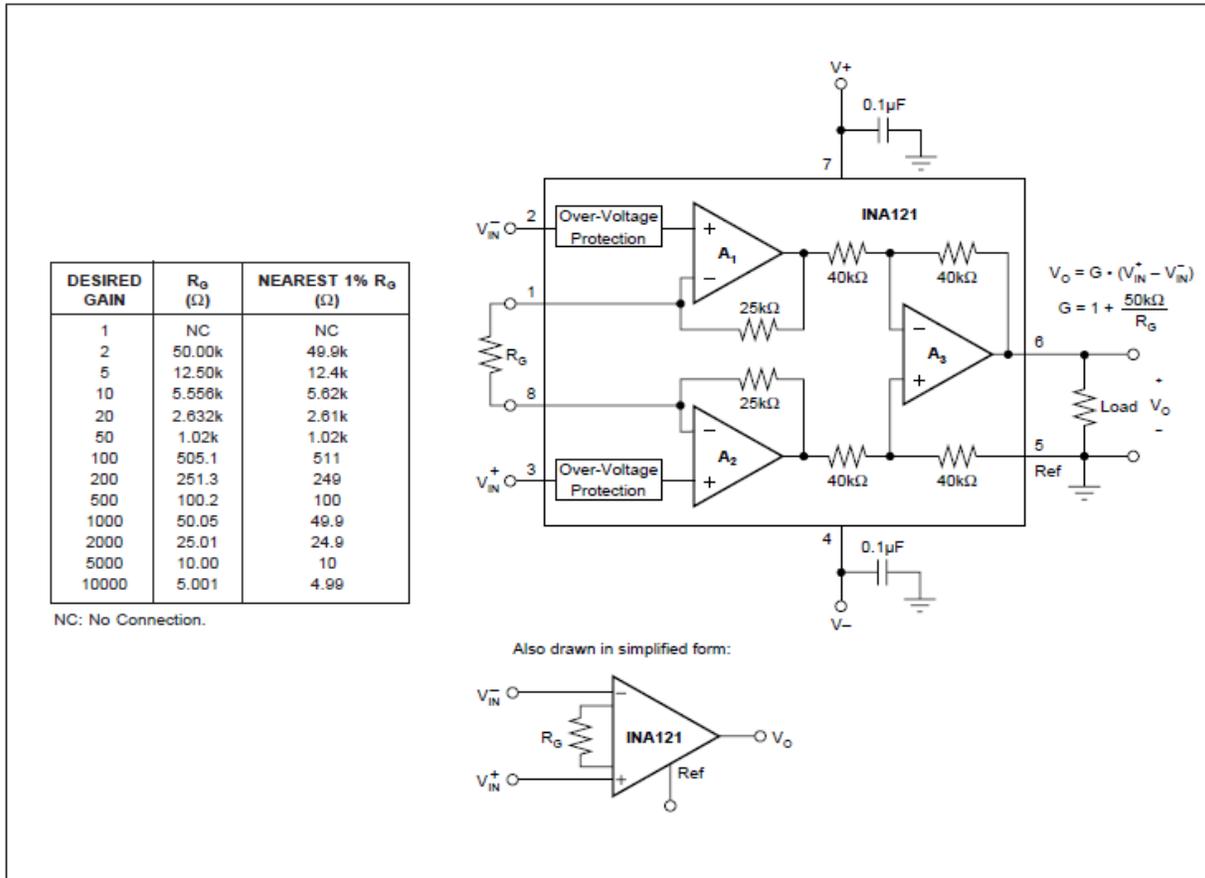


FIGURE 1. Basic Connections.

Figura 5.2 – Detalhes sobre o amplificador de instrumentação INA121.

5.3 Código Fonte, Software da Montagem 1 com Extensômetro

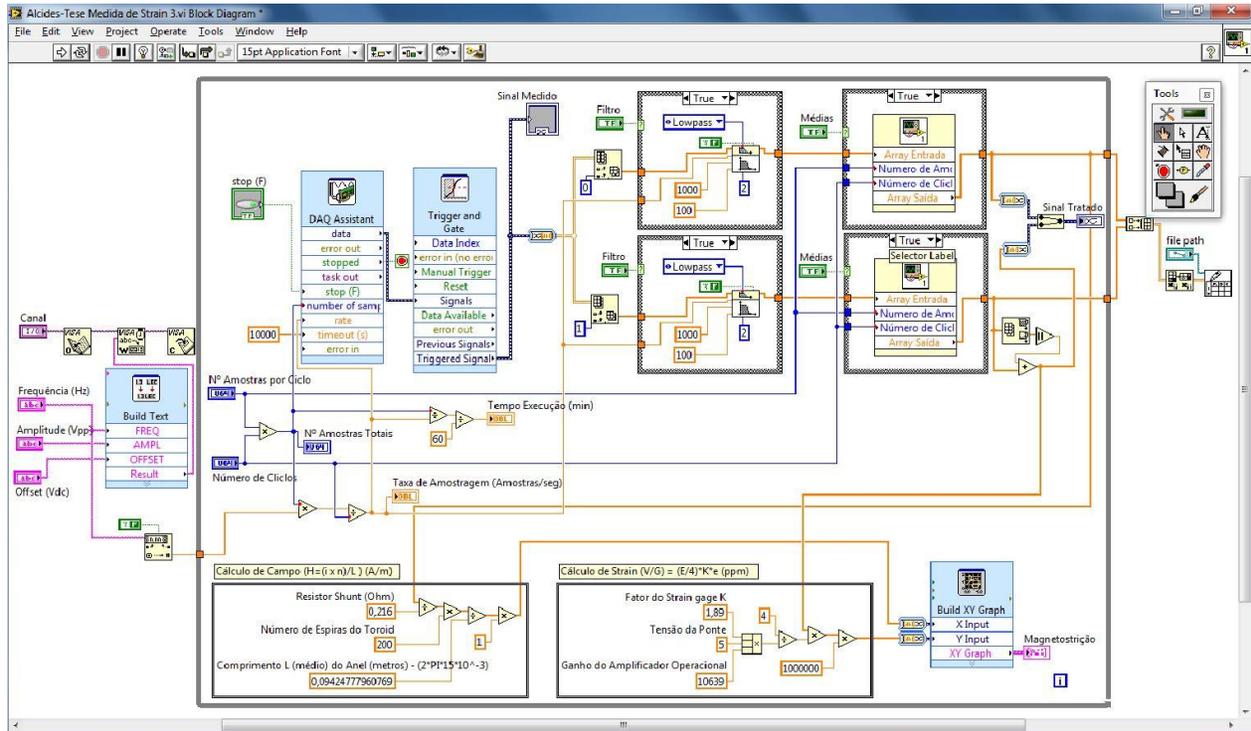


Figura 5.3 – Código em LabVIEW utilizado para o Software da montagem 1.

5.4 Código Fonte, Software da Montagem 2 com FBG

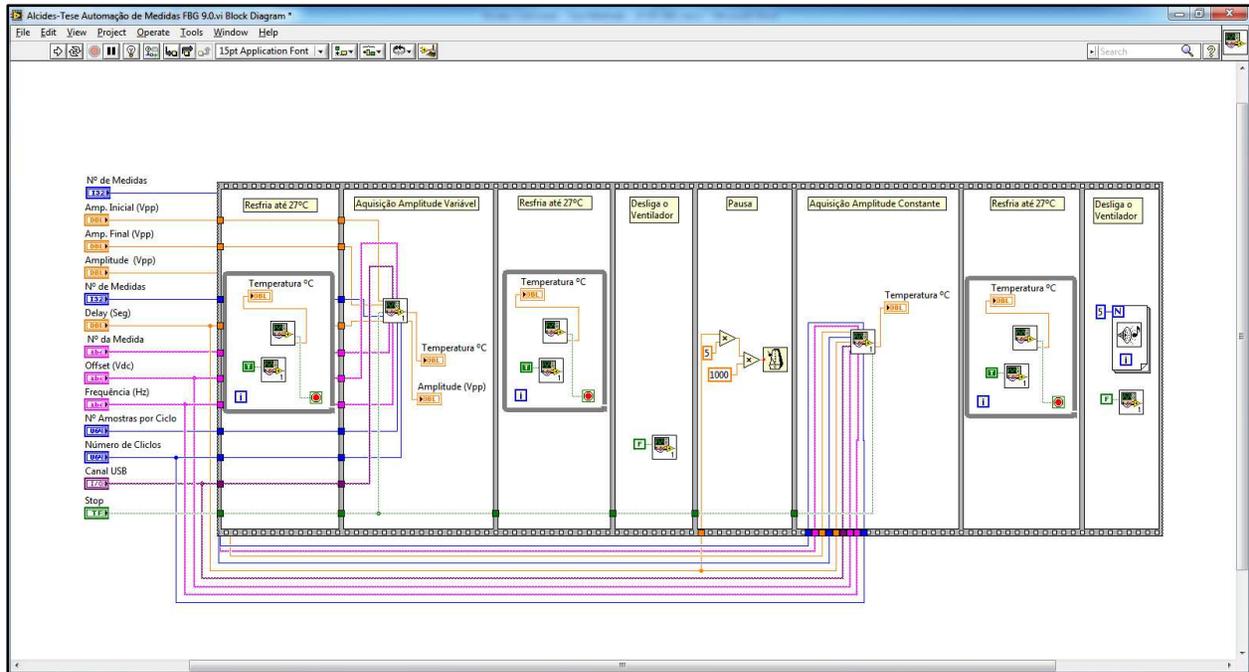


Figura 5.4 – Código em LabView da Automação da aquisição de dados, montagem 2.

5.5 Cola utilizada para a Fixação da Fibra

		EPO-TEK® 301 Technical Data Sheet For Reference Only <i>Spectrally Transparent Epoxy</i>	
Number of Components:	Two	Minimum Bond Line Cure Schedule*:	
Mix Ratio By Weight:	20:5	65°C	1 Hour
Specific Gravity:		23°C	24 Hours
Part A	1.15		
Part B	0.87		
Pot Life:	1 - 2 Hours		
Shelf Life:	One year at room temperature		
<small>Note: Container(s) should be kept closed when not in use. For filled systems, mix contents of each container (A & B) thoroughly before mixing the two together. *Please see Applications Note available on our website. - MIXED VOLUME SHOULD NOT EXCEED 26 GRAMS -</small>			
Product Description: EPO-TEK® 301 is a two component, room temperature curing epoxy featuring very low viscosity, and excellent optical-mechanical properties.			
EPO-TEK® 301 Advantages & Suggested Application Notes: <ul style="list-style-type: none"> • Semiconductor: optical glob top or underfill; adhesion to common wafer passivation, solder mask and flex circuits; compatible with LED die, Si, GaAs. • PCB: general potting and protection over FR4, flex, or ceramic PCBs. • Medical: <ul style="list-style-type: none"> ○ It is NONTOXIC—complying with USP Class VI Biocompatibility standards. Suggested for medical devices such as catheters, hand and tooling, dental, and endoscopic products; adhesion to stainless steel, titanium, and most plastics; resisting sterilizing techniques like ETO, gamma, and autoclave; resisting X-ray radiation; potting and protection of scintillator crystals; CT Detector packaging; adhesive for the optical beam pathway in photo-diode arrays. • Fiber Optic: adhesive for glass and plastic fibers; wicking into fiber bundles used in patch cords, endoscopes or sensor devices; adhesive/seal/encapsulant used for fiber packaging and components; transmission of IR up to 2500 nm; terminating fibers into ferrules; fiber coupling and splicing. • Opto-electronic: <ul style="list-style-type: none"> ○ LCD/LED adhesive for laminating glass layers; adhesion to PET plastic; general potting, encapsulation, and protection; spectral transmission in VIS and IR light; adhesive / encapsulant for VCSEL's packaged devices; resisting yellowing per ASTM D1925; adhesive for precision optics including lens, prism, beam splitter cubes, mirrors, and diodes, found in medical, university, or research communities. 			
Typical Properties: <i>(To be used as a guide only, not as a specification. Data below is not guaranteed. Different batches, conditions and applications yield differing results. Cure condition: varies as required. * denotes test on lot acceptance basis)</i>			
Physical Properties:			
*Color: Part A: Clear/Colorless Part B: Clear/Colorless	Die Shear Strength @ 23°C: ≥ 10 Kg / 3400 psi		
*Consistency: Pourable liquid	Degradation Temp. (TGA): 430°C		
*Viscosity (@ 100 RPM/23°C): 100 – 200 cPs	Weight Loss:		
Thixotropic Index: N/A	@ 200°C: 0.12%		
*Glass Transition Temp.(Tg): ≥ 65°C (Dynamic Cure	@ 250°C: 0.13%		
20–200°C /ISO 25 Min; Ramp -10–200°C @ 20°C/Min)	@ 300°C: 0.39%		
Coefficient of Thermal Expansion (CTE):	Operating Temp:		
Below Tg: 39 x 10 ⁻⁶ in/in/°C	Continuous: - 55°C to 200°C		
Above Tg: 98 x 10 ⁻⁶ in/in/°C	Intermittent: - 55°C to 300°C		
Shore D Hardness: 85	Storage Modulus @ 23°C: 327,463 psi		
Lap Shear Strength @ 23°C: > 2,000 psi	*Particle Size: N/A		
Optical Properties @ 23°C:			
Index of Refraction @ 23°C: 1.519 @ 589 nm	Spectral Transmission: > 98% @ 400-700nm > 97% @ 700-2500nm		
Electrical & Thermal Properties:			
Thermal Conductivity: N/A	Volume Resistivity @ 23°C: ≥ 1 x 10 ¹³ Ohm-cm		
Dielectric Constant (1 KHz): 4.00	Dissipation Factor (1 KHz): 0.016		
EPOXY TECHNOLOGY, INC. 14 Fortune Drive, Billerica, MA 01821-3972 Phone: 978.667.3805 Fax: 978.663.9782 www.EPOTEK.com <i>Epoxyes and Adhesives for Demanding Applications™</i> <small>This information is based on data and tests believed to be accurate. Epoxy Technology, Inc. makes no warranties (expressed or implied) as to its accuracy and assumes no liability in connection with any use of this product.</small>			
Rev. V 10/2006			

Figura 5.5 – Cola utilizada para a fixação da fibra no núcleo