



**INSTITUTO FEDERAL**  
**CEARÁ**  
Campus Fortaleza



Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Telecomunicações  
PPGET - IFCE

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

**MANOEL HENRIQUE BEZERRA JÚNIOR**

**ESTUDO DE APLICABILIDADE DE UMA CERÂMICA PZT COMO SENSOR  
DE CORRENTES PARA MONITORAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO  
DE ENERGIA.**

FORTALEZA – CE

2015

**MANOEL HENRIQUE BEZERRA JÚNIOR**

**ESTUDO DE APLICABILIDADE DE UMA CERÂMICA PZT COMO SENSOR  
DE CORRENTES PARA MONITORAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO  
DE ENERGIA**

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

Orientador: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes

Co-Orientador: Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra

FORTALEZA – CE  
2015

*Catálogo na fonte: Biblioteca Waldyr Diogo de Siqueira*

B574e Bezerra Júnior, Manoel Henrique.

*Estudo de aplicabilidade de uma cerâmica PZT como sensor de correntes para monitoramento de linha de transmissão de energia /*  
Manoel Henrique Bezerra Júnior - Fortaleza: IFCE, 2015.

78 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações).

Orientador: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes

1. CORRENTE ELÉTRICA. 2. PIEZOELETRICIDADE. 3. SENSOR.  
I.Título.

CDD 621.319

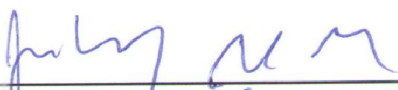
**MANOEL HENRIQUE BEZERRA JÚNIOR**

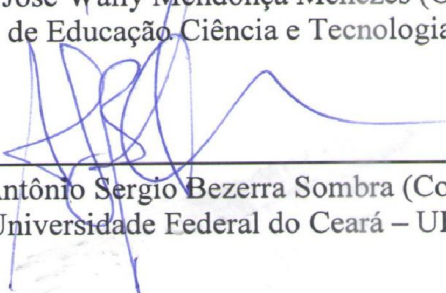
**ESTUDO DE APLICABILIDADE DE UMA CERÂMICA PZT COMO SENSOR  
DE CORRENTES PARA MONITORAMENTO DE LINHA DE TRANSMISSÃO  
DE ENERGIA**

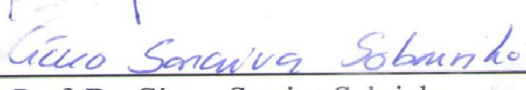
Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações como requisito final para a obtenção do grau de mestre em Engenharia de Telecomunicações.

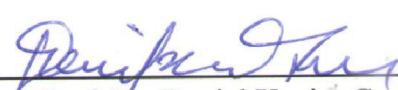
Área de Concentração: Micro-ondas e óptica Integrada

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes (Orientador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra (Co-orientador)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cícero Saraiva Sobrinho  
Universidade da Integração da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, Aquele que me gerou e pensou em mim antes de todas as coisas, pela força nos momentos delicados e pelo seu amor derramado sobre mim todos os dias.

Aos meus pais, Manoel Henrique e Júlia Alves, e à minha irmã, Maria Gabriela, que me acompanham e dividem comigo todos os momentos desde os primórdios da minha existência.

À minha namorada, Laura Carolina, pelo amor, carinho e compreensão dispensados em todos os momentos, ensinando-me que amar é doar-se ao outro sem nada reter.

Ao prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes pela sua paciência e dedicação demonstradas em todas as situações, motivando-me sempre a compreender que a vida se porta como nós a enfrentamos.

Aos caros professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do IFCE por toda a contribuição e atenção dedicadas.

Ao Prof. Dr. Antonio Sergio Bezerra Sombra, pela co-orientação e disponibilização dos espaços do LOCEM (Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Telecomunicações / UFC). Além dos amigos, Agliberto Bastos e Jefferson Sales, pelo apoio dado às atividades de pesquisa desta dissertação.

Por fim, aos meus queridos companheiros de trabalho do IFCE Campus Canindé. Em especial, os nobres colegas do Eixo de Informação e Comunicação: Barbosa, Stelio, Daniel Brito, Carlos Eugênio, Clauson, Carlos Henrique, Rodrigo Costa, Paulo Renato, Alisson Linhares e Allyson Bonetti.

Muito obrigado a todos.

# RESUMO

O setor elétrico mundial necessita, cada vez mais, de mecanismos precisos e confiáveis para monitoramento de correntes e tensões que circulam em suas linhas de transmissão e em suas subestações. Com esta motivação, foi desenvolvido um sensor baseado no efeito piezoelétrico que permite a medição de altas e baixas correntes, e que podem substituir ou auxiliar os transformadores de correntes tradicionais ou outros dispositivos de sensoriamento auxiliar quando utilizados em regime de medição de corrente. Esta aplicabilidade foi possível com o uso de uma placa cerâmica PZT( Titanato - Zirconato de Chumbo) que possui a propriedade de converter deformações mecânicas sofridas por ela em sinais elétricos que podem ser coletados em seus terminais de saída. Com vistas a implementação e validação da proposta de estudo apresentada neste trabalho, construímos, em bancada, um experimento sensor piezoelétrico e utilizamos para comprovação da proposta outros equipamentos e dispositivos. Para a verificação experimental dos resultados esperados com base na bibliografia consultada, foram realizados testes baseados na alteração de variáveis importantes no processo de sensoriamento, como: o valor das correntes elétricas medidas e a distância estabelecida entre o dispositivo sensor e o objeto de sensoriamento. Por meio da tecnologia implementada e dos resultados auferidos, confirmou-se a viabilidade da verificação dos valores de correntes elétricas que são conduzidas por linhas de transmissão e com a apresentação das seguintes vantagens: peso reduzido, baixo custo de produção, facilidade de replicação e produção, exatidão, menores riscos de operação para equipamentos e operadores, linearidade na obtenção de medidas de alta e baixa corrente e possibilidade de monitoramento remoto.

**Palavras-chave:** Corrente Elétrica; Piezoeletricidade; Sensor.

# ABSTRACT

The global power sector needs accurate and reliable mechanisms for monitoring voltages and currents in their transmission lines and substations. With this motivation, we developed a sensor based on the piezoelectric effect which allows the measurement of high and low currents, and could replace or assist the traditional current sensing transformers or other devices when used in current measurement system. This applicability is possible using a ceramic plate PZT (Lead zirconate titanate). It has the property of converting mechanical deformations into electrical signals that can be collected on their output terminals. Viewing the implementation and validation of the proposed study, we built a piezoelectric sensor experiment and use other equipment and devices to confirm the proposal. For experimental verification of the expected results based on bibliography, tests were performed based changing key sensing process variables, such as the value of electric current measured and the distance established between the sensor device and sensing object. Through the technology implemented and accrued results, We confirmed the feasibility of checking the electrical current values that are conducted by transmission lines and the following advantages: low weight, low production cost, ease of replication and production , accuracy, lower operation risks to operators and equipments, linearity of high and low current and the possibility of remote monitoring.

**Keywords:** Electric Current; Piezoelectricity; Sensor.

# Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 2.1</b> – Transformadores para instrumentos. (a) Transformador de corrente. (b) Transformador de Potencial .....                                        | 5  |
| <b>Figura 2.2</b> – Esquema básico TP capacitivo.....                                                                                                             | 6  |
| <b>Figura 2.3</b> – Diagrama representativo de um TC .....                                                                                                        | 7  |
| <b>Figura 2.4</b> – Curva típica dos TCs. ....                                                                                                                    | 8  |
| <b>Figura 3.1</b> – Efeito piezoelétrico direto .....                                                                                                             | 12 |
| <b>Figura 3.2</b> – Efeito piezoelétrico inverso. ....                                                                                                            | 12 |
| <b>Figura 3.3</b> – Estrutura Atômica do PZT. (a) Estado Tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico. ....                                                           | 13 |
| <b>Figura. 3.4</b> – Polarização do PZT. (a) Material sem polarização; (b) Durante a aplicação do campo elétrico; (c) Após a polarização.....                     | 14 |
| <b>Figura 3.5</b> – Ciclo de histerese de uma cerâmica piezoelétrica.....                                                                                         | 16 |
| <b>Figura 3.6</b> – Gráfico de histerese deformação x campo elétrico.....                                                                                         | 16 |
| <b>Figura 3.7</b> – Sistema ortogonal utilizado. A direção da polarização é dada pela direção do eixo 3. ....                                                     | 18 |
| <b>Figura 3.8</b> – Material piezoelétrico cerâmico. (a) Campo elétrico e polarização em sentidos opostos (b) Campo elétrico e polarização no mesmo sentido ..... | 22 |
| <b>Figura 3.9</b> – Oscilações planares de um disco piezoelétrico. ....                                                                                           | 25 |
| <b>Figura 3.10</b> – Método tradicional para produção de PZT. ....                                                                                                | 26 |
| <b>Figura 4.1</b> – Placa piezoelétrica com o ímã instalado em sua extremidade livre. ....                                                                        | 28 |
| <b>Figura 4.2</b> – Osciloscópio digital Tektronix TDS 2022B. ....                                                                                                | 29 |
| <b>Figura 4.3</b> – VARIAC TDGC2-30. ....                                                                                                                         | 30 |
| <b>Figura 4.4</b> – Vista superior do sensor piezoelétrico.....                                                                                                   | 31 |
| <b>Figura 4.5</b> – Vista frontal do sensor piezoelétrico. ....                                                                                                   | 32 |
| <b>Figura 4.6</b> – Visão esquemática da bancada utilizada para os experimentos.....                                                                              | 33 |
| <b>Figura 4.7</b> – Diagrama de Blocos esquemático da bancada experimental.....                                                                                   | 34 |

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 4.8</b> - Ação do campo magnético sobre o ímã permanente a uma distancia “c” da bobina, a qual gera uma perturbação na haste ”e”.                            | 35 |
| <b>Figura 4.9</b> – Gráfico que relaciona a faixa de baixa corrente medida com a amplitude do sinal de saída do sensor variando a distância entre condutor e sensor.   | 36 |
| <b>Figura 4.10</b> – Gráfico de colunas distância entre medidas x diferença entre respostas do sensor para a distância de 2,5cm na faixa de baixas correntes.          | 37 |
| <b>Figura 4.11</b> – Gráfico que relaciona a medição de alta corrente com a amplitude do sinal de saída do sensor variando a distância entre condutor e sensor.        | 37 |
| <b>Figura 4.12</b> – Gráfico de colunas distância entre medidas x diferença entre respostas do Sensor para a distância de 2,5cm na faixa de altas correntes.           | 38 |
| <b>Figura 4.13</b> – Gráfico que relaciona a corrente medida com a amplitude do sinal de saída do sensor variando a distância entre condutor e sensor.                 | 39 |
| <b>Figura 4.14</b> – Gráfico de colunas: distância entre medidas x diferença entre respostas do Sensor para a distância de 2,5cm na faixa de baixas e altas correntes. | 40 |
| <b>Figura 4.15</b> – Gráfico que apresenta a resposta do sensor à variação da distância para corrente fixa de 80A.                                                     | 42 |
| <b>Figura 4.16</b> – Gráfico de colunas: distância entre medidas x diferença em módulo entre medidas para a corrente de 80 A.                                          | 43 |
| <b>Figura 4.17</b> – Gráfico que apresenta a resposta do sensor à variação da distância para corrente fixa de 40A.                                                     | 43 |
| <b>Figura 4.18</b> – Gráfico de colunas distância entre medidas x diferença em módulo entre medidas para a corrente de 40 A.                                           | 44 |
| <b>Figura 4.19</b> – Resposta temporal do sensor à variação da distância entre condutor e sensor para corrente de 40A.                                                 | 45 |
| <b>Figura 4.20</b> – Resposta temporal do sensor à variação da distância entre condutor e sensor para corrente de 80A.                                                 | 45 |

# Índice de Tabelas

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 3.1:</b> Principais Materiais Piezoelétricos comerciais e suas constantes.....                                                     | 25 |
| <b>Tabela 4.1:</b> Variação da sensibilidade do sensor de acordo com a distância do condutor.....                                            | 41 |
| <b>Tabela 4.2:</b> Variação da sensibilidade de sensor óptico de acordo com a distância do condutor para medição de correntes elétricas..... | 41 |

# Lista de Acrônimos

**PZT** - Titanato-Zirconato de Chumbo

**PbTiO<sub>2</sub>** - Titanato de Chumbo

**TI** - Transformadores para Instrumentos.

**TP** - Transformadores de Potencial.

**TC** - Transformadores de Corrente.

**FCRp** - Fator de correção de relação percentual do TC

**FCTp** - Fator de correção de transformação percentual do TC

**FCT** - Fator de correção de transformação

**MnO** - Óxido de Manganês

**Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** – Pentóxido de Nióbio

**CaO** – Óxido de Cálcio

**Sb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>** – Pentóxido de Antimônio

**AC** - Corrente Alternada

# SUMÁRIO

|                                                   |           |
|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....</b> | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivações do Trabalho .....                  | 2         |
| 1.2 Objetivos .....                               | 3         |
| 1.2.1 Objetivo Geral .....                        | 3         |
| 1.2.2 Objetivos Específicos .....                 | 3         |
| <b>2. TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS.....</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1 Transformador de Potencial .....              | 5         |
| 2.1.1 Definição .....                             | 5         |
| 2.2 Transformador de Corrente .....               | 6         |
| 2.2.1 Definição .....                             | 6         |
| 2.2.2 Classificação de serviço para TCs .....     | 7         |
| 2.2.3 Erros dos TCs .....                         | 8         |
| 2.3 Limitações e dificuldades .....               | 10        |
| <b>3. PIEZOELETRICIDADE.....</b>                  | <b>11</b> |
| 3.1 Histórico .....                               | 11        |
| 3.2 Efeito Piezoelétrico .....                    | 12        |
| 3.3 Histerese .....                               | 15        |
| 3.4 Equações Básicas .....                        | 17        |
| 3.4.1 Sistema de Coordenadas utilizado .....      | 17        |
| 3.4.2 Strain(Deformação Mecânica) .....           | 18        |
| 3.4.3 Stress (Tensão Mecânica) .....              | 19        |
| 3.4.4 Lei de Hooke Generalizada .....             | 19        |
| 3.4.5 Equações Constitutivas .....                | 20        |
| 3.5 Principais Coeficientes .....                 | 22        |
| 3.5.1 Coeficientes Piezoelétricos .....           | 22        |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.5.2 Coeficientes Elásticos.....                                                                              | 23        |
| 3.5.3 Coeficientes Dielétricos.....                                                                            | 24        |
| 3.5.4 Fator de Acoplamento .....                                                                               | 24        |
| 3.6 Fabricação de Piezocerâmicas .....                                                                         | 26        |
| <b>4. EXPERIMENTO E RESULTADOS .....</b>                                                                       | <b>27</b> |
| 4.1 Materiais e Métodos .....                                                                                  | 27        |
| 4.1.1 Equipamentos utilizados .....                                                                            | 27        |
| 4.1.2 Metodologia utilizada .....                                                                              | 30        |
| 4.2 Resultados e Discussão .....                                                                               | 35        |
| <b>5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS .....</b>                                                                      | <b>47</b> |
| 5.1 Conclusões .....                                                                                           | 47        |
| 5.2 Perspectivas para trabalhos futuros .....                                                                  | 48        |
| 5.3 Trabalhos decorrentes desta dissertação .....                                                              | 48        |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>                                                                         | <b>49</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                                                                            | <b>52</b> |
| ANEXO A – Formulário de Divulgação de Invenção .....                                                           | 53        |
| ANEXO B – Resultado da busca no banco de dados do INPI/BR e em bases de bancos de patentes internacionais..... | 56        |
| ANEXO C – Artigo a ser submetido .....                                                                         | 57        |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO E ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A piezoelectricidade é uma propriedade que foi descoberta pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, em 1880 [1], e que pode ser encontrada em um grupo seleto de materiais, como os cristais de quartzo, turmalina, dentre outros. Existem ainda os materiais piezoelétricos sintéticos que não possuem a propriedade piezoelétrica no seu estado natural, mas são submetidos a um processo de polarização para passarem a apresentar essa característica. Este é o caso do Titanato-zirconato de chumbo(que, em inglês, possui a sigla PZT – *Lead Zirconate Titanate*) e do titanato de chumbo ( $\text{PbTiO}_2$ ).

A expressão piezo, derivada do grego, significa pressionar. Assim, o efeito piezoelétrico possibilita a geração de um sinal elétrico a partir de uma tensão mecânica aplicada sobre o material, constituindo, assim, o efeito piezoelétrico direto. Mas o efeito piezoelétrico é reversível. Ou seja, há a possibilidade de, ao se aplicar um campo elétrico sobre o material, ele apresentar uma deformação mecânica, constituindo, assim, o efeito piezoelétrico inverso.

Esta dissertação é composta por cinco capítulos que apresentam as etapas de realização e conclusão da pesquisa referente ao sensor em estudo neste trabalho.

No capítulo 2, será apresentada uma abordagem sobre os transformadores para instrumentos (transformadores de corrente e de potencial) e a sua aplicação nas funções de medição, proteção e monitoramento de carga no sistema elétrico brasileiro atualmente. Para isso, foram apresentados cada um desses instrumentos, a partir da sua definição, classificação e principais erros e riscos que eles podem trazer em seu funcionamento. Na conclusão do capítulo, são sintetizadas as principais limitações inerentes ao uso desses dispositivos.

O capítulo 3 está direcionado ao estudo do estado da arte sobre os materiais piezoelétricos. Para esse fim, o capítulo inicia-se com uma análise histórica sobre o desenvolvimento desses materiais. Apresenta-se também, neste capítulo, a descrição e classificação do efeito piezoelétrico, além da histerese existente na utilização desses materiais. Em sequência, é feito um levantamento sobre a formulação matemática do efeito piezoelétrico. Os coeficientes inerentes a esse tipo de materiais também serão discutidos. Para a finalização do capítulo, faz-se uma descrição do processo de fabricação das cerâmicas piezoelétricas.

No capítulo 4, serão descritos os resultados obtidos durante a realização dos testes aplicados. Além disso, serão apresentados os equipamentos utilizados para levantar as medidas em laboratório, a metodologia empreendida na realização dos experimentos práticos, bem como as abordagens relacionadas com a proposta de

sensoriamento e os resultados alcançados a fim de fortalecer a aplicabilidade deste dispositivo de sensoriamento.

O capítulo 5 encerra-se com as conclusões obtidas durante a realização do trabalho ressaltando as vantagens na utilização do sensor piezoelétrico, além de citar possibilidades de perspectivas de trabalhos futuros.

### **1.1 Motivações do trabalho**

Cada vez mais, o monitoramento e controle dentro das subestações e ao longo das linhas de transmissão das empresas de energia elétrica torna-se algo indispensável para o setor elétrico mundial, pois, por meio desses mecanismos, é possibilitada a manutenção dos sistemas, além de prever possíveis interrupções e falhas que acabam por afetar diversos setores da sociedade e podem trazer consequências muito graves para esses setores, tanto de ordem econômica quanto de segurança e proteção a vidas, tendo em vista que o setor elétrico é um dos que apresentam grandes volumes financeiros em investimentos e importância estratégica para os países.

Atualmente, os transformadores de corrente e de potencial são os principais responsáveis pela função de monitoramento e proteção das redes elétricas de alta tensão. Mas esses equipamentos apresentam uma série de limitações, como: não linearidades (distorção da forma de onda devido à saturação do núcleo), riscos de operação (sujeitos a falhas de isolamento), problemas de segurança para os equipamentos e operadores, processo de instalação complexo devido ao seu tamanho e peso, o acoplamento galvânico entre o secundário e os instrumentos de medição, além do alto custo. Assim, inúmeros estudos vêm sendo empreendidos na busca do desenvolvimento de novas tecnologias de sensoriamento remoto para medir as condições das linhas de distribuição com a mínima quantidade de fatores limitantes.

A partir dessa necessidade, este trabalho visa o estudo de aplicabilidade de uma cerâmica PZT como sensor das correntes que trafegam por linhas de transmissão elétricas baseando-se na característica piezoelétrica apresentada por essas cerâmicas, possibilitando, assim, a substituição dos transformadores de corrente convencionais que atuam na medição de altas e baixas correntes.

O sensor a ser detalhado nesta dissertação apresentará inúmeras vantagens, como peso reduzido, possibilidades para monitoramento remoto, boa sensibilidade, perspectivas de baixo custo de produção e instalação, boa exatidão, menores riscos de operação para equipamentos e operadores, linearidade na utilização para medições de altas e baixas correntes.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Comprovar a aplicabilidade de uma cerâmica PZT como elemento sensor de corrente utilizando a característica piezoelétrica apresentada por esse material.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Identificar distâncias possíveis e seguras entre a placa piezo e a linha de transmissão para aplicabilidade da proposta como elemento sensor;
2. Identificar os níveis de correntes a serem sensoriadas;
3. Comparar os resultados obtidos pelo sensor com os obtidos pelos instrumentos de medição convencionais;
4. Demonstrar a variação de sensibilidade do sensor a partir da variação da distância entre ele e o objeto sensoriado e da variação da corrente a ser medida.

## CAPÍTULO 2

Neste capítulo, será apresentado como se dá o processo de medição, proteção e monitoramento de cargas no sistema elétrico brasileiro através de transformadores para instrumentos, que são os transformadores de potencial e os transformadores de corrente. Para isto, o capítulo inicia com uma abordagem preliminar dos transformadores em geral. Após, serão apresentados os transformador de potencial e, em seguida, o transformador de corrente: sua definição, classificação e os principais erros que podem surgir em seu funcionamento. Para finalizar o capítulo, apresenta-se um resumo com as principais limitações para a utilização desses equipamentos tradicionais, e que foi utilizada como motivação para o estudo proposto neste trabalho.

### TRANSFORMADORES PARA INSTRUMENTOS

Os transformadores para instrumentos (TIs) possuem grande importância para a operação dos sistemas de transmissão de energia. A função destes equipamentos é converter tensões e correntes muito elevadas para valores reduzidos e adequados para alimentar diretamente instrumentos de medição, de proteção, de controle e outros. Assim, os TIs constituem o elo de ligação entre estes dispositivos e o sistema de transmissão.

Em resumo, estes transformadores possuem três utilidades básicas:

1. Medição: Para finalidades de faturamento e transação de energia;
2. Controle e Proteção: Para proteção do sistema, fornecendo informações das condições do sistema para os relés de proteção;
3. Levantamento e monitoramento da carga: para gerenciamento econômico de cargas industriais[2].

Esses dispositivos estão divididos em duas categorias: os Transformadores de Potencial (TPs) e os Transformadores de Corrente (TCs), como podem ser vistos na figura 2.1.



(a)



(b)

**Figura 2.1 – Transformadores para instrumentos. (a) Transformador de corrente. (b) Transformador de Potencial.**

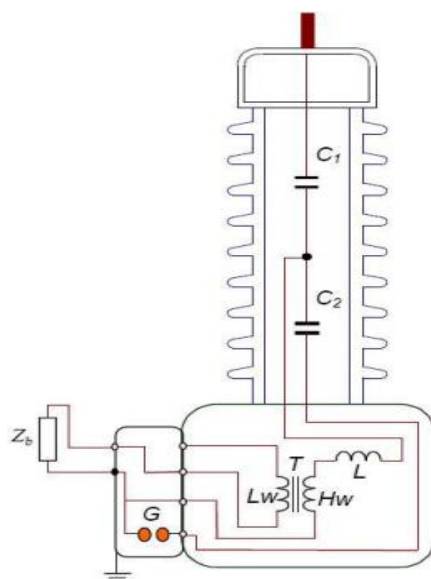
**Fonte:** MARTINS, W. W. M. Sensores ópticos de tensão baseados no efeito eletroóptico em cristais de niobato de lítio, 2006, p. 3

## 2.1 Transformador de Potencial

### 2.1.1 Definição

O Transformador de Potencial é um transformador projetado para ter o enrolamento primário conectado em paralelo com o circuito de alimentação de potência, cuja alta tensão deseja-se medir ou controlar. Já o enrolamento secundário no TP tem um número menor de espiras que o primário e se destina a alimentar bobinas de potencial de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção. O rigor na relação de transformação nominal dos TPs é proporcional à sua categoria de precisão. O TP opera praticamente sem carga, pois as correntes de medição de voltímetros são muito baixas.

Nos TPs, o isolamento é feito de porcelana, dentro do qual há uma pilha (*stack*) de capacitores idênticos, permitindo que a distribuição de tensão seja uniforme do terminal de alta tensão para o terra. Essa pilha de capacitores forma um divisor de tensão que fornece a redução da tensão aplicada no primário do transformador que se encontra na base do TP (veja Figura 2.2). No terminal secundário deste transformador aparece finalmente a tensão de saída do TP[4].



**Figura 2.2 – Esquema básico TP capacitivo**

**Fonte:** MARTINS, W. W. M. Sensores ópticos de tensão baseados no efeito eletroóptico em cristais de niobato de lítio, 2006, p. 5

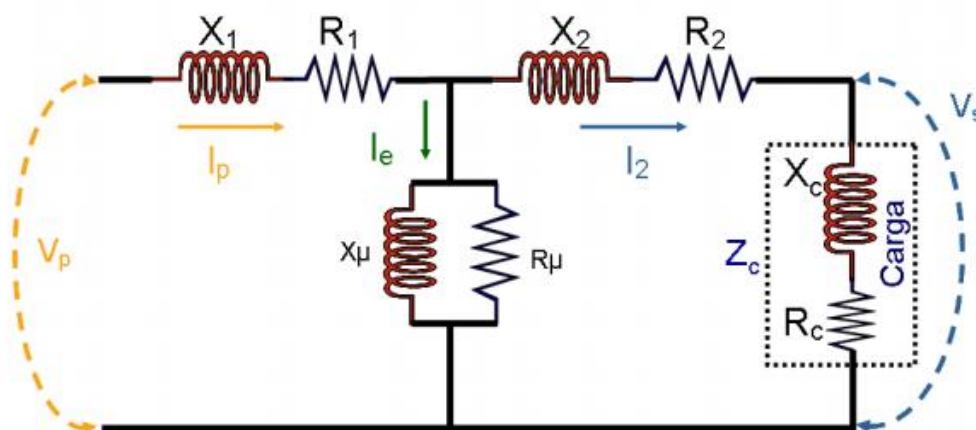
O óleo sintético usado em seu interior possui elevadas propriedades de absorção do gás resultante de descargas parciais. O núcleo deste transformador permanece imerso neste óleo na base do *stack* de capacitores. Este óleo mineral, além de possuir um elevado potencial de isolamento, auxilia no processo de transferência de calor. No entanto, esses sistemas de medição são feitos inteiramente de cobre, cerâmica e ferro, que são materiais pesados, implicando em equipamentos volumosos e robustos. Além disso, o fato dessas estruturas possuírem óleo isolante, em seus espaços vazios, possibilita que, em um caso de curto circuito, sobretensão ou sobrecorrente, eles tendam a explodir sem aviso prévio, resultando na destruição dos equipamentos existentes nas proximidades e colocando em risco os funcionários dentro das subestações. Além disso, por serem equipamentos pesados, as dificuldades de instalação e manutenção também tornam-se uma desvantagem para a utilização desta tecnologia[3].

## 2.2 Transformador de Corrente

### 2.2.1 Definição

Os transformadores de corrente (TCs) são equipamentos que, em condições normais, fornecem uma corrente secundária proporcional à corrente primária, diferindo em fase por um pequeno ângulo, que é aproximadamente zero para conexões apropriadas. Os transformadores de corrente são utilizados para suprir aparelhos que apresentam baixa resistência elétrica, como amperímetros, relés, medidores de energia e potência, etc. Este dispositivo transforma a corrente que circula no enrolamento primário, através de um acoplamento magnético, em uma corrente induzida no secundário.

O número de espiras do enrolamento primário é denotado como  $N_1$  e o número de espiras do enrolamento secundário por  $N_2$ . O circuito equivalente de um TC está apresentado na figura 2.3, em que a resistência e a reatância primárias estão definidas como  $R_1$  e  $X_1$ , a resistência e a reatância secundárias estão definidas como  $R_2$  e  $X_2$  e o ramo magnetizante está caracterizado pelos seus dois parâmetros, isto é, a resistência  $R_\mu$ , que é responsável pelas perdas ôhmicas, e  $X_\mu$  responsável pela corrente reativa devido à circulação das mesmas linhas de fluxo no circuito magnético[5].



**Figura 2.3 – Diagrama representativo de um TC.**

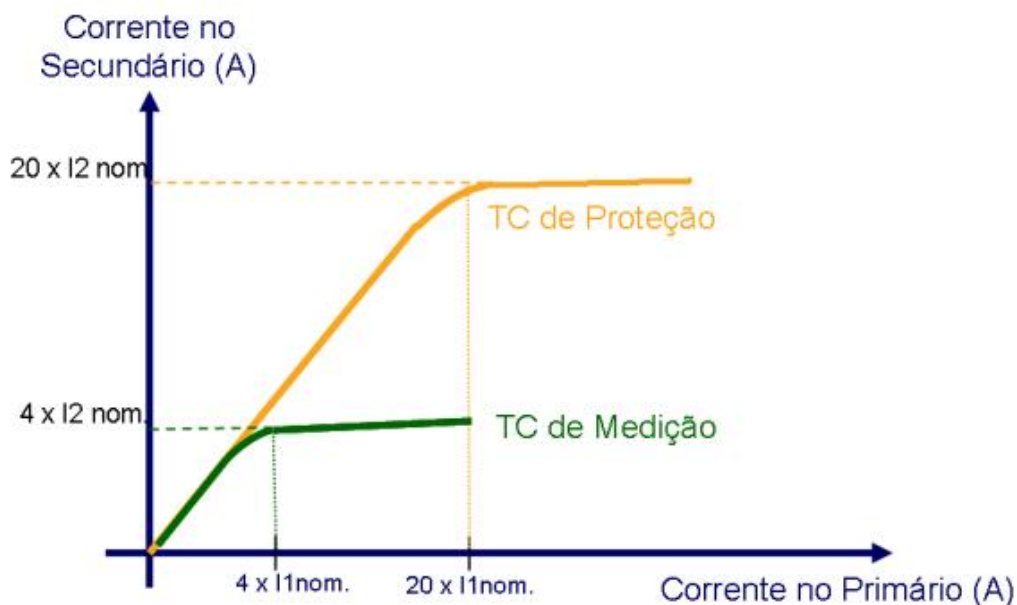
**Fonte:** LACHMAN, M. Sistema de monitoração remota e avaliação do estado operativo de transformadores de potencial capacitivo (TPCs) instalados em subestações em operação, 2007, pag. 8

### 2.2.2 Classificação de serviço para TCs

Os transformadores de corrente são classificados em dois tipos de acordo com sua função:

- Transformadores de Corrente para serviços de medição: São TCs capazes de transformar as correntes do sistema em correntes no secundário com elevada exatidão para os instrumentos medidores, sem que estes estejam em ligação direta com o circuito primário da instalação.
- Transformadores de Corrente para serviços de proteção: São TCs capazes de transformar elevadas correntes de sobrecarga ou de curto-circuito em correntes compatíveis com os relés de proteção. Ao contrário dos transformadores de corrente para medição, os TCs para serviço de proteção não devem saturar para correntes de elevada magnitude como no caso de um curto-circuito no sistema. Este fator evita que as correntes recebidas pelos relés estejam incorretas causando uma operação inadequada do sistema de proteção.

Assim, os transformadores de corrente para serviço de proteção apresentam um nível de saturação elevado, igual a vinte vezes a corrente nominal, considerando a carga padronizada conforme mostra a curva amarela presente na Figura 2.4[2].



**Figura 2.4 – Curva típica dos TCs.**

**Fonte:** LACHMAN, M., Sistema de monitoração remota e avaliação do estado operativo de transformadores de potencial capacitivo (TPCs) instalados em subestações em operação, 2007, pag. 12.

Na figura 2.4, destaca-se o gráfico típico de funcionamento dos TCs, onde  $I_{1\text{nom}}$  e  $I_{2\text{nom}}$  representam a corrente nominal no primário e no secundário do transformador respectivamente. A curva traçada em amarelo representa o regime que pode ser adotado pelo transformador de corrente quando ele estiver sendo usado para efeitos de proteção do sistema elétrico e a linha verde designa o regime que deve ser seguido pelo transformador quando ele for usado para fins de medição das correntes atuantes no sistema monitorado. Como visto na figura 2.4, em regime de proteção, o TC só irá saturar quando estiver recebendo uma corrente superior a vinte vezes a corrente nominal do primário, reforçando a teoria de que eles não devem saturar para correntes de alta magnitude, como no caso de um curto-circuito.

### 2.2.3 Erros dos TCs

Para os transformadores de corrente, é essencial, entre outros elementos, a relação de transformação nominal e real. A primeira é indicada pelo fabricante do equipamento e exprime o valor da relação entre as correntes primária e secundária para a qual o equipamento foi projetado. A segunda exprime a relação entre as correntes primária e secundária que se obtém realizando medidas precisas em laboratório. Essas

medidas dependem do estado do equipamento, ou seja, quanto mais desgastado ou danificado esteja esse material, a diferença entre as duas relações deve aumentar. Além disso, essa pequena diferença se deve à influência do material ferromagnético de que é construído o núcleo do TC. Portanto, este valor é de grande importância, quando se trata de transformadores de corrente destinados à medição[5].

Para os transformadores de corrente que se destinam à medição de correntes, é importante que se conheça as incertezas relacionadas à relação de transformação e a defasagem da corrente em relação à tensão para conhecer o erro do ângulo de fase ( $\beta$ ) que o TC vai introduzir nos valores medidos. Em geral, os erros de relação e de defasagem dependem do valor da corrente primária do TC, do tipo de carga ligada no seu secundário e da frequência do sistema, a qual é normalmente desprezada, devido a sua variação ser praticamente nula[6].

Entre os principais erros relacionados aos TCs, é possível citar:

- Erro de relação de transformação: Este tipo de erro é registrado na medição de corrente com TC, onde a corrente primária não corresponde exatamente ao produto da corrente lida no secundário pela relação de transformação nominal[6].

O fator de correção de relação também pode ser definido como sendo aquele que deve ser multiplicado pela relação de transformação de corrente nominal,  $RTC$ , para se obter a verdadeira relação de transformação,  $RTCr$ , ou seja, sem erro. Esse fator de correção de relação pode ser dado pela equação 2.1:

$$FCR_r = \frac{RTCr}{RTC} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Onde:

$RTCr$  = relação de transformação de corrente real;

$RTC$  = relação de transformação de corrente nominal.

- Erro de ângulo de fase: Este erro é ocasionado pela defasagem existente entre a corrente fasorial primária e o inverso da corrente fasorial secundária de um transformador de corrente. É dado pelo ângulo de fase  $\beta$  (em minutos) que possui seus valores limites positivos e negativos expressos na equação 2.2:

$$\beta = 26 \times (FCRp - FCTp) \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

$FCRp$  = fator de correção de relação percentual do TC em questão;

$FCTp$  = fator de correção de transformação percentual do TC em questão;

O  $FCT$  é definido como o fator que deve ser multiplicado pela leitura registrada por um aparelho de medição (wattímetro, varímetro, etc.) ligado aos terminais de um

TC, para corrigir o efeito combinado do ângulo de fase  $\beta$  e do fator de correção de relação percentual (FCRp)[2].

### **2.3 Limitações e dificuldades**

Considerando os pontos apresentados nos tópicos anteriores e pelas referências destacadas sobre transformadores para instrumentos, destacam-se as seguintes limitações na utilização de transformadores de potencial e transformadores de correntes[7]:

- Limitação na resposta aos transientes;
- Acoplamento galvânico entre o secundário e os instrumentos de medição;
- Suscetibilidade aos problemas de compatibilidade eletromagnética;
- Não linearidades (distorção da forma de onda devido à saturação do núcleo);
- Riscos de operação (sujeitos a falhas de isolamento) e problemas de segurança para os equipamentos e operadores;

Por todas essas limitações e dificuldades apresentadas na utilização desses tipos de transformadores, discute-se, nessa dissertação, a viabilidade de medições de corrente elétrica através da utilização do efeito piezoelétrico.

## CAPÍTULO 3

Neste capítulo, serão abordados conceitos necessários à compreensão do funcionamento dos sensores piezoelétricos. Inicialmente, haverá uma breve revisão histórica sobre o desenvolvimento desses materiais, seguido da descrição e tipificação do efeito piezoelétrico. A histerese relacionada a este tipo de material também será discutida. Posteriormente, serão apresentadas as equações e a descrição matemática relacionada com o sensoriamento piezoelétrico. Em seguida, serão apresentados os coeficientes utilizados para caracterização correta de um sensor piezoelétrico. E Finalmente, será descrito o processo de fabricação de uma cerâmica piezoelétrica similar à que foi utilizada nessa dissertação.

### PIEZOELETRICIDADE

#### 3.1 Histórico

O termo piezoelectricidade deriva da palavra grega “piezein”, que significa pressionar. O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie [1]. Seus experimentos resultaram em uma medida conclusiva de cargas superficiais que surgiam em cristais especialmente preparados quando submetidos ao estresse mecânico (turmalina, quartzo, topázio, cana de açúcar e sal Rochelle, entre outros). Mas eles não demonstraram a existência do efeito piezoelétrico direto ou inverso, fato este que somente foi apresentado por Lippmann em 1881.

A descoberta dos irmãos Curie foi utilizada em uma aplicação prática, pela primeira vez, por Paul Langevin, no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial, por volta do ano 1917. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventando o transdutor tipo Langevin) para criar um sonar que pudesse medir a profundidade do mar através de ondas de ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz's[8].

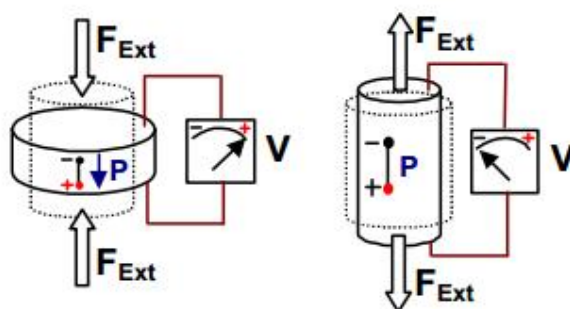
Após a primeira guerra mundial, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. Tal desenvolvimento teve como motivação a dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo e por estes demandarem geradores de alta tensão. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento, nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas PZT's pelos EUA [9,10].

O desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas foi revolucionário, pois elas apresentam melhores propriedades que os cristais após “polarizadas”, por oferecem geometrias e dimensões flexíveis e por serem fabricadas através da sinterização de pós cerâmicos conformados via prensagem ou extrusão. Atualmente, as cerâmicas piezoelétricas tipo PZT, em suas diversas variações, são as cerâmicas predominantes no mercado. Também podemos encontrar outros materiais, como por exemplo, o PT

( $\text{PbTiO}_3$ ) e o PMN ( $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ), utilizados em dispositivos que exigem propriedades especiais e muito específicas, como transdutores para alta temperatura[11].

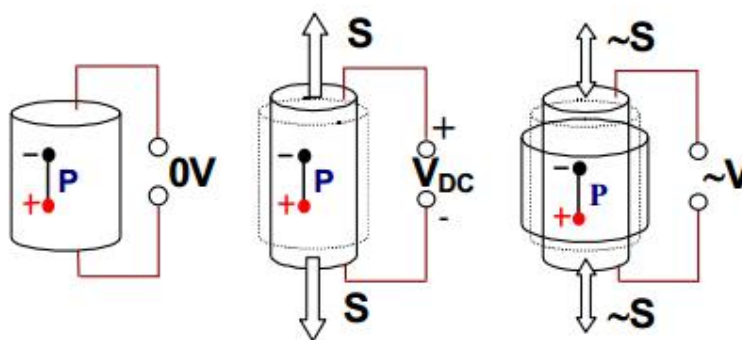
### 3.2 Efeito Piezoelétrico

Como pode ser visto na figura 3.1, os materiais piezoelétricos apresentam uma geração de cargas elétricas em sua superfície, ao serem submetidos a alguma pressão ou tensão mecânica. Já na figura 3.2, os mesmos materiais piezoelétricos sofrem deformação ao serem submetidos à aplicação de um campo elétrico. Estas duas situações caracterizam o efeito piezoelétrico direto e o efeito piezoelétrico inverso, respectivamente.



**Figura 3.1 – Efeito piezoelétrico direto.**

**Fonte:** CARAZO, A. V., Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements, 2000, p. 31



**Figura 3.2 – Efeito piezoelétrico inverso.**

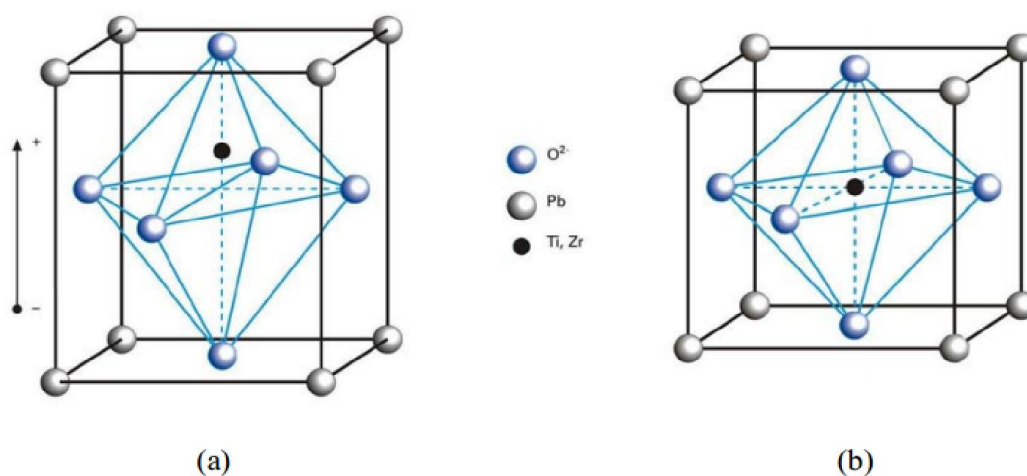
**Fonte:** CARAZO, A. V., Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements, 2000, p. 32

A origem da piezoeletricidade em todos os tipos de materiais está relacionada com a assimetria na célula unitária, o que gera dipolos elétricos devido à distorção mecânica que conduz a uma polarização na superfície do material. Esse efeito é praticamente linear, ou seja, a polarização varia diretamente com a tensão aplicada e

dependente da direção, de modo que a compressão ou a tração vai gerar campos elétricos e, portanto, voltagens de polaridade oposta. Isso é recíproco, isto é, se o material está exposto a um campo elétrico, ele irá experimentar uma deformação elástica que aumenta ou diminui sua extensão de acordo com a polaridade do campo[8].

Alguns materiais não exibem polarização quando o campo elétrico ou mecânico externo é removido. Ao contrário, outros materiais mostram uma polarização remanescente sem qualquer estresse externo. Além disso, a direção de polarização poderia ser invertida por aplicação de um campo elétrico inverso. Neste caso, surge um campo de histerese e o material é classificado como ferroelétrico[8].

O PZT é composto por domínios (blocos microscópicos) como os apresentados na figura 3.4(a). Estes domínios são, por sua vez, constituídos por células unitárias tetragonais distorcidas quando estão abaixo da temperatura Curie semelhantes às apresentadas na figura 3.3(a). Devido à posição deslocada do íon de titânio ou zircônio, surge um dipolo elétrico em uma célula unitária e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezoelétricas macroscópicas como pode ser percebido na figura 3.4 (a). Entretanto, pode-se polarizar o PZT de maneira que este passe a proporcionar o efeito piezoelétrico. Neste procedimento, aquece-se o material acima da temperatura Curie, para que as células unitárias do material passem a apresentar simetria cúbica, visualizada na figura 3.3(b)[12].



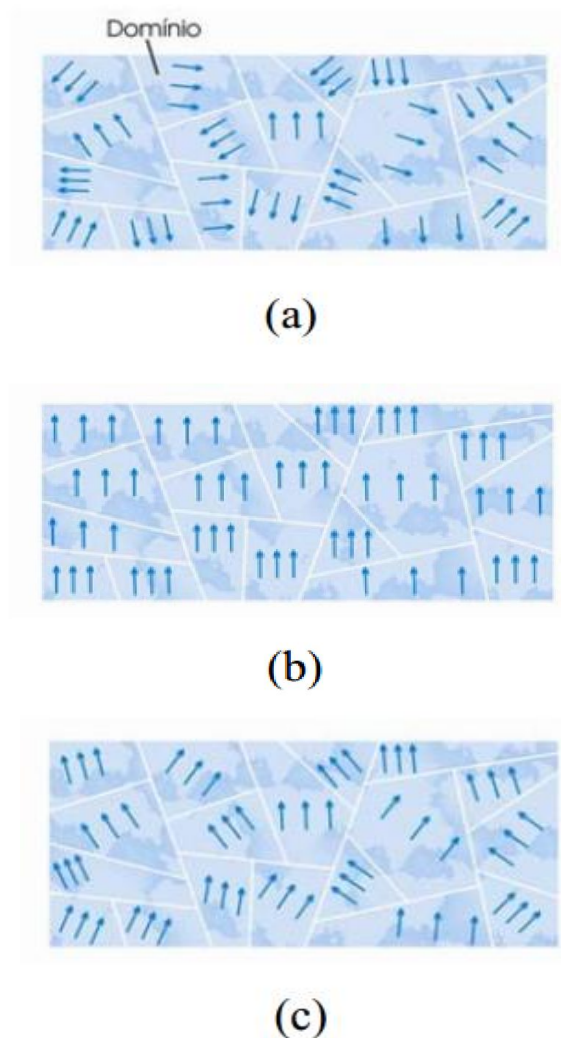
**Figura 3.3 – Estrutura Atômica do PZT .**

**(a) Estado Tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico**

**Fonte:** SAKAMOTO, J. M. S., Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexensionais, 2006, p. 66.

Depois de aquecido, o material sofre a aplicação de um campo elétrico intenso (acima de 2kV/mm) e as células unitárias se expandem na direção deste campo,

visualizado na figura 3.4 (b). Após o resfriamento do material e a retirada do campo elétrico, as células unitárias mantêm o alinhamento, porém não completamente, como mostra a figura 3.4 (c). Contudo, o alinhamento remanescente é suficiente para que PZT passe a exibir o efeito piezoelétrico.



**Figura. 3.4 – Polarização do PZT.**  
**(a) Material sem polarização; (b) Durante a aplicação do campo elétrico; (c) Após a polarização.**

**Fonte:** SAKAMOTO, J. M. S., Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexensionais, 2006, p. 67.

O PZT apresenta muitas vantagens para a realização de sensoriamentos, como: altos coeficientes eletromecânicos, o que garante que a deformação do material é bem sensível à variação do campo elétrico ao qual ele está submetido e vice-versa; Temperatura de Curie mais elevada para a maioria das composições práticas ( $T_c \sim 360^\circ \text{C}$ ), o que permite que este material possa ser submetido a altas temperaturas sem perder

a sua característica piezoelétrica; não necessita do processo de polarização, já que as versões comercializadas já são polarizadas e permite a possibilidade de incorporação de uma grande variedade de dopantes, o que possibilita a alteração de forma controlada de muitas de suas propriedades eletromecânicas. Assim, muitos trabalhos de pesquisa [17] foram desenvolvidos para aperfeiçoar ou controlar as propriedades ferroelétricas e eletromecânicas do PZT, através da adição de óxidos de cátions de bi a pentavalentes em substituição ao Pb, Zr ou Ti, o que permitiu o surgimento da série PZT4, -5, -6, -7 e -8 (patente da Clevite Corporation)[16].

### 3.3 Histerese

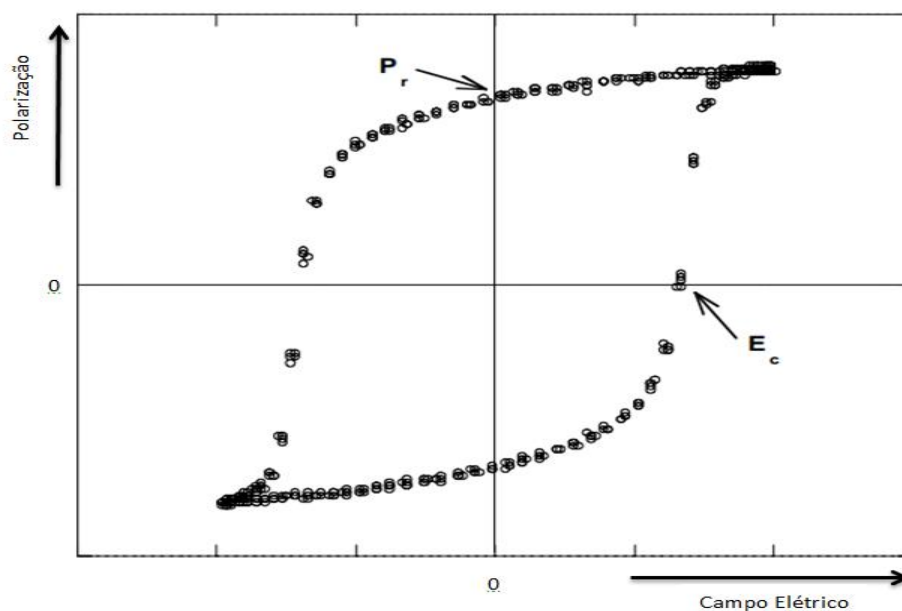
Sabendo que os materiais piezoelétricos são materiais ferroelétricos, é necessário desenvolver uma abordagem sobre a histerese apresentada por esses materiais. Um material ferroelétrico possui uma polarização espontânea, que pode ser revertida através da aplicação de um campo elétrico acima de algum intervalo de temperatura. A oposição apresentada pelo material piezoelétrico à alteração da sua polarização é chamada histerese.

O deslocamento elétrico **D** é dado em função da polarização **P** e do campo elétrico **E** aplicado como visto na eq. 3.1. Vale ressaltar que a polarização **P** é uma função não-linear do campo elétrico **E** aplicado, o que fica claro na fig. 3.5.

$$\mathbf{D} = \mathbf{P} + \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Sendo a permissividade no espaço livre dada por  $\epsilon_0 = (8.85 \times 10^{-12} \text{ C/Vm})$ .

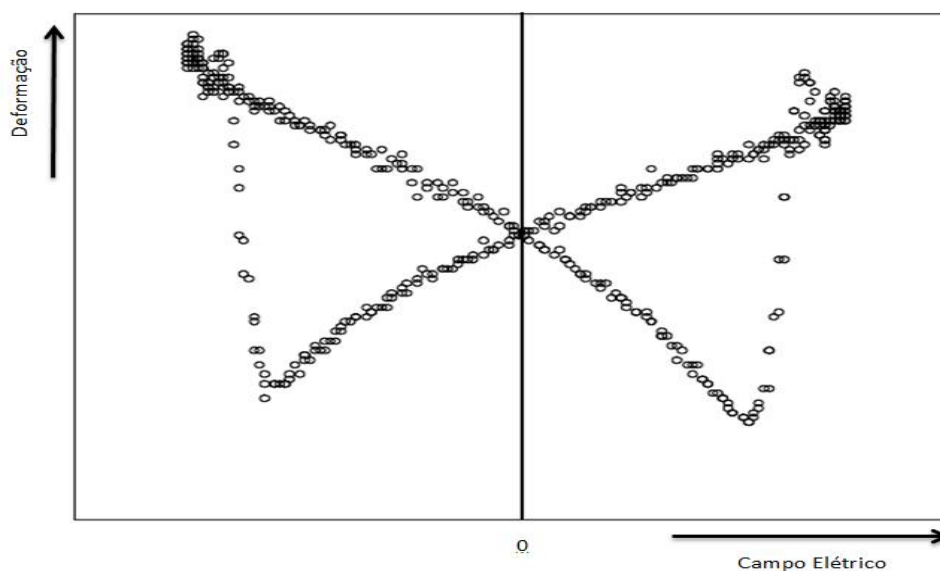
O ciclo **P-E** resalta duas características importantes nos materiais piezoelétricos: o campo coercitivo **E<sub>c</sub>** e a polarização remanescente **P<sub>r</sub>**. **E<sub>c</sub>** é o campo apresentado pelo material quando a sua polarização for nula e **P<sub>r</sub>** é a polarização apresentada pelo material quando o campo ao qual ele está submetido é nulo. Esses valores podem ser determinados através do ciclo **P-E** apresentando na figura 3.5 quando houver uma situação de saturação.



**Figura 3.5 – Ciclo de histerese de uma cerâmica piezoelétrica.**

**Fonte:** JORDAN, T. L., OUNAIES, Z., Piezoelectric Ceramics Characterization, 2011, p. 5.

A comutação da polarização leva à histerese deformação - campo elétrico, como visto na figura 3.6. Assim, à medida que o campo elétrico é aplicado, o efeito piezoelétrico inverso faz com que surja uma deformação no material. Ao passo em que o campo aumenta de magnitude, a deformação deixa de ser linear com o campo e começa a haver a comutação nas paredes do domínio. Este fenômeno gera um gráfico como o da figura 3.6 conhecido como ciclo borboleta.



**Figura 3.6 – Gráfico de histerese deformação -campo elétrico.**

**Fonte:** JORDAN, T. L., OUNAIES, Z., Piezoelectric Ceramics Characterization, 2011, p. 6.

A área interna da curva apresentada na figura 3.5 corresponde à energia dissipada na forma de calor, devido às perdas mecânicas e dielétricas. A partir da área da curva de histerese, estabelece-se uma das principais classificações dos materiais piezoelétricos, onde são denominados como materiais “Hard” aqueles que apresentam uma curva de histerese “fechada” e, portanto, área pequena, e como materiais “Soft”, aqueles que apresentam uma curva de histerese “aberta”, com área expressiva. Os materiais “Hard” também são denominados Materiais de Alta potência e os “Soft” de Materiais de Alta Sensibilidade.

A marinha americana subdivide os materiais “Hard” e “Soft” nos seguintes sub-grupos, [19]:

**Navy Type I (“Hard”)**: Recomendado para aplicações de média e alta potência em condições de uso contínuo e repetitivo. É capaz de gerar altas amplitudes de vibração mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas. Muito aplicado a sistemas de limpeza por ultra-som e sonares.

**Navy Type II (“Soft”)**: Materiais que possuem alta sensibilidade, ideal para dispositivos de transmissão e recepção de baixa potência. Apresenta perdas dielétricas e mecânicas que inviabilizam a excitação contínua com alta intensidade. São muito aplicados em dispositivos para NDT, hidrofones e acelerômetros.

**Navy Type III (“Hard”)**: Similar, mas menos sensível que o Navy Type I; é capaz de converter o dobro de potência mantendo perdas mecânicas e dielétricas pequenas. Recomendado para aplicações de alta potência. As suas principais aplicações são sistemas de solda por ultra-som e processamento de materiais.

**Navy Type IV (“Soft”)**: Adequado para aplicações de média potência. Tornou-se obsoleto com o advento dos PZT’s, sendo substituído principalmente pelo Navy Type I. Muito utilizados na manutenção de equipamentos antigos.

**Navy Type V (“Soft”)**: Adequado para aplicações que requerem altas energias e diferença de potencial. Principais aplicações: detonadores de impacto e magic clicks.

**Navy Type VI (“Soft”)**: Adequado para aplicações que requerem grandes deformações mecânicas ( $\Delta l$ ). São muito aplicados em posicionadores e atuadores.

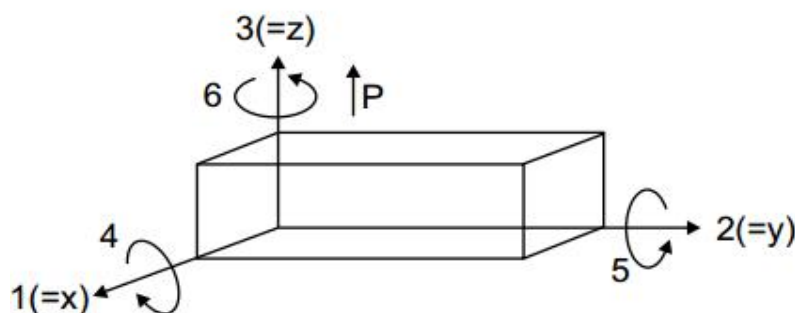
Apesar desse critério de classificação da Marinha Americana, neste trabalho, foi utilizado o critério de classificação de Morgan, tendo em vista que o critério de Morgan é o mais utilizado comercialmente e foi utilizado para construir a tabela 3.1.

### 3.4 Equações Básicas

#### 3.4.1 Sistema de coordenadas utilizado

No caso das cerâmicas piezoelétricas, são utilizados três eixos ortogonais (1,2 e 3) para referenciar as direções no qual as tensões são aplicadas como pode ser observado na figura 3.7. Já os outros índices (4, 5 e 6) representam um movimento de

cisalhamento em torno dos eixos 1, 2 e 3 respectivamente. A relação entre as grandezas elétricas e mecânicas, presentes no efeito piezoelétrico, é dada através dos índices subscritos, como no caso de  $S_{ij}$ , onde o primeiro índice (i) indica a direção em que a excitação é realizada sobre a cerâmica e o segundo índice apresenta a direção da resposta do sistema à excitação realizada.



**Figura 3.7** – Sistema ortogonal utilizado. A direção da polarização é dada pela direção do eixo 3.

**Fonte:** BRÜNAHL, J, Physics of Piezoelectric Shear Mode Inkjet Actuators, 2003, p. 29.

Vale ressaltar que o eixo 3 ou eixo polar, está em paralelo com a direção de polarização da cerâmica como visualizado na figura 3.7.

### 3.4.2 Deformação Mecânica (*Strain*)

A deformação mecânica (*Strain*) é uma grandeza que serve para medir o deslocamento relativo de partículas em um meio material. Assim, é uma grandeza adimensional. O *Strain* é um tensor de segunda ordem simétrico e pode ser representado em forma matricial[14]:

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Pela notação de índices reduzidos, onde associam-se os índices (11) → 1, (22) → 2, (33) → 3, (23) → 4, (13) → 5, (12) → 6, tem-se que  $S_{11} = S_1$ ,  $S_{22} = S_2$ ,  $S_{33} = S_3$ ,  $S_{23} = S_4$ ,  $S_{13} = S_5$ , e  $S_{12} = S_6$ . Assim, pode-se reescrever a matriz de *strain* [S] na notação matricial reduzida:

$$[S] = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

### 3.4.3 Tensão Mecânica (*Stress*)

A tensão mecânica (*stress*) é um tensor de segunda ordem, cuja dimensão é força por unidade de área ( $\text{N/m}^2$ ). Quando o meio está em equilíbrio de rotação, ou seja, com torque externo nulo, o tensor é simétrico. Este tensor, assim como o tensor *stress*, pode ser representado em sua forma matricial de índices reduzidos [14]:

$$[T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

### 3.4.4 Lei de Hooke Generalizada

A lei de Hooke estabelece a relação entre tensão (*stress*) e deformação mecânica (*strain*) para materiais com anisotropia mecânica arbitrária. Neste caso, considera-se também que o meio material comporta-se linearmente sob o ponto de vista elástico [14]. No caso de materiais não piezoelétricos tem-se que:

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

onde  $c_{ijkl}$  é um tensor de quarta ordem que corresponde às constantes elásticas de rigidez do meio, cuja unidade é  $\text{N/m}^2$ . A rigidez corresponde à força capaz de produzir uma unidade de deformação na direção especificada e os valores da matriz a ela associada dependem do material utilizado [12].

Por ser um tensor de quarta ordem, o tensor  $c_{ijkl}$  possui, originalmente,  $3^4 = 81$  elementos. Mas, considerando a simetria molecular e a notação de índices reduzidos, este número pode ser reduzido. Assim, por exemplo, no caso de materiais isotrópicos tem-se a lei de Hooke generalizada na forma matricial [14]:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

$$\text{Onde } c_{44} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12}). \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Como ela não leva em conta as contribuições do campo elétrico  $\vec{E}$  e do deslocamento elétrico  $\vec{D}$ , a lei de Hooke não é suficiente para descrever as propriedades de deformação de um material piezoelétrico.

### 3.4.5 Equações Constitutivas

As relações constitutivas válidas para materiais piezoelétricos são dadas por [15]:

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{ijk} E_k \quad (\text{Eq.3.8})$$

$$D_i = e_{ijk} S_{jk} + \varepsilon_{ij}^S E_j \quad (\text{Eq.3.9})$$

onde  $c_{ijkl}^E$  refere-se às constantes elásticas de rigidez com campo elétrico constante ou nulo,  $\varepsilon_{ij}^S$  corresponde à permissividade dielétrica com deformação constante ou nula e  $e_{ijk}$  é o tensor piezoelétrico.

Utilizando as equações inversas das equações anteriores:

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{ijk} E_k \quad (\text{Eq.3.10})$$

$$E_i = -h_{ikl} S_{kl} + \psi_{ik}^S D_k \quad (\text{Eq.3.11})$$

Onde  $s_{ijkl}^E$  refere-se às constantes elásticas de flexibilidade (inversa da rigidez),  $h_{ikl}$  relaciona campo com deformação,  $d_{ijk}$  relaciona deformação com campo elétrico e  $\psi_{ik}^S$  é a impermeabilidade dielétrica (inversa da permissividade).

A Eq. 3.10 pode ser descrita de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.12})$$

As matrizes  $S_{ijkl}^E$  e  $d_{ijk}$  para o PZT foram transcritas de[15].

Quando o material não sofre tensões mecânicas externas,  $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0$ , a matriz acima torna-se:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Desta forma, com a matriz acima, pode-se caracterizar o comportamento mecânico do PZT em resposta às direções em que o campo é aplicado. Na figura 3.8, ilustra-se uma piezocerâmica, os eixos coordenados e a polarização elétrica. Convencionou-se o eixo paralelo à polarização elétrica com o índice 3.

Se o campo elétrico for aplicado no eixo de polarização 3, obtêm-se a seguinte configuração:

$$E_1 = E_2 = 0 \quad (\text{Eq. 3.14})$$

$$E_3 \neq 0 \quad (\text{Eq. 3.15})$$

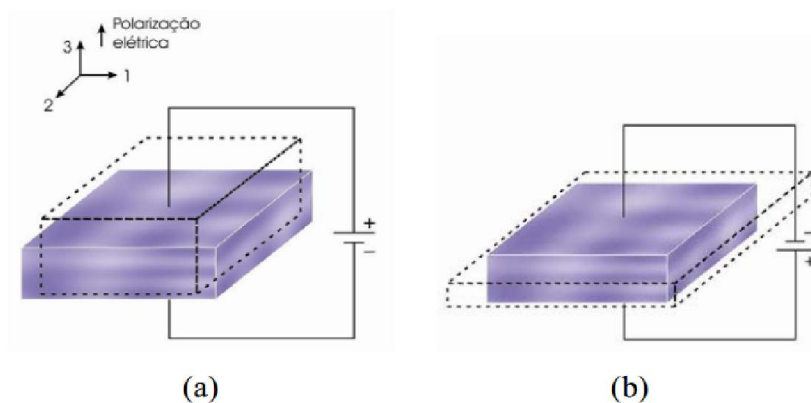
Inserindo as eq. 3.14 e 3.15 na equação matricial 3.13, obtêm-se os seguintes resultados:

$$S_1 = d_{31}E_3 \quad (\text{Eq. 3.16})$$

$$S_2 = d_{31}E_3 \quad (\text{Eq. 3.17})$$

$$S_3 = d_{33}E_3 \quad (\text{Eq. 3.18})$$

$$S_4 = S_5 = S_6 = 0 \quad (\text{Eq. 3.19})$$



**Figura 3.8 – Material piezoelétrico cerâmico.**

**(a) Campo elétrico e polarização em sentidos opostos**

**(b) Campo elétrico e polarização no mesmo sentido**

**Fonte:** SAKAMOTO, J. M. S., Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexensionais, 2006, p. 71.

Para PZT's comerciais, o coeficiente  $d_{33}$  possui sempre valores positivos e o coeficiente  $d_{31}$  possui sempre valores negativos. Assim, pelas eq. 3.8, 3.9 e 3.10, percebe-se que, com o aumento do campo elétrico na direção 3, a cerâmica expande-se na mesma direção de S3, e contrai-se nas direções 1 e 2 simultaneamente. A fig. 3.8 (b) retrata a realidade quando se aplica um campo negativo no eixo 3.

Quando o campo elétrico for aplicado na direção 1 ou 2 (conforme Figura 3.8) individualmente, tem-se:

$$S_1 = S_2 = S_3 = 0 \quad (\text{Eq. 3.20})$$

$$S_4 = d_{15}E_2 \quad (\text{Eq. 3.21})$$

$$S_5 = d_{15}E_1 \quad (\text{Eq. 3.22})$$

$$S_6 = 0 \quad (\text{Eq. 3.23})$$

### 3.5 Principais Coeficientes

#### 3.5.1 Coeficientes Piezoelétricos

À temperatura constante, os coeficientes piezoelétricos são dados por [8]:

- Coeficiente de carga piezoelétrico(d): Relaciona a geração de cargas e as tensões mecânicas aplicadas (efeito piezoelétrico direto) e a deformação em função de um campo elétrico aplicado (efeito piezoelétrico inverso).

$$d_{ij}^{\theta} = \begin{cases} = \left[ \frac{\partial S_j}{\partial E_i} \right]_{D, \theta = cte} \left[ \frac{m}{V} \right] & \text{Efeito inverso} \\ = \left[ \frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right]_{S, \theta = cte} \left[ \frac{C}{N} \right] & \text{Efeito Direto} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.24})$$

- Coefficiente de Tensão piezoelétrica(g): Informa a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para uma cerâmica com comprimento de 1 metro.

$$g_{ij}^{\theta} = \begin{cases} = \left[ \frac{\partial S_j}{\partial D_i} \right]_{E, \theta = cte} \left[ \frac{m^2}{C} \right] & \text{Efeito inverso} \\ = \left[ -\frac{\partial E_i}{\partial T_j} \right]_{S, \theta = cte} \left[ \frac{V.m}{N} \right] & \text{Efeito Direto} \end{cases} \quad (\text{Eq. 3.25})$$

Como os coeficientes piezoelétricos estão relacionados a uma grandeza elétrica e uma grandeza mecânica, o primeiro índice subscrito indica a direção da grandeza elétrica considerada (deslocamento ou campo elétrico) e o segundo indica o sentido da grandeza mecânica considerada (estresse ou tensão). O índice sobrescrito refere-se a uma quantidade que permanece constante. O índice sobrescrito  $\theta$  significa que esses coeficientes são assim definidos quando a temperatura permanece constante.

### 3.5.2 Coeficientes Elásticos

As constantes elásticas estabelecem uma proporcionalidade entre a deformação e a tensão aplicada. São as “constantes de mola” do material. A partir das constantes elásticas, podemos estimar variações dimensionais em função de pressões estáticas [11]. Os coeficientes elásticos podem ser divididos em dois tipos: o coeficiente de complacência elástico e o coeficiente de rigidez elástica.

O coeficiente de complacência elástico, que relaciona a deformação sofrida por um material piezoelétrico a partir de uma tensão aplicada sobre ele, a um campo elétrico ou cargas elétricas constantes, podem ser dado, respectivamente, por[8]:

$$S_{ij}^{E, \theta} = \left[ \frac{\partial S_i}{\partial T_j} \right]_{E, \theta = cte} \left[ \frac{m^2}{N} \right] \quad (\text{Eq. 3.26})$$

$$S_{ij}^{D, \theta} = \left[ \frac{\partial S_i}{\partial T_j} \right]_{D, \theta = cte} \left[ \frac{m^2}{N} \right] \quad (\text{Eq. 3.27})$$

Onde o primeiro índice refere-se à direção da deformação e o segundo refere-se à direção da tensão aplicada.

O coeficiente de rigidez elástico, que representa a resistência de um determinado material piezoelétrico a sofrer deformação, a um campo elétrico ou cargas elétricas constantes, podem ser dado, respectivamente, por[8]:

$$c_{ij}^{E,\theta} = \left[ \frac{\partial T_j}{\partial S_i} \right]_{E,\theta=cte} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (\text{Eq. 3.28})$$

$$c_{ij}^{D,\theta} = \left[ \frac{\partial T_j}{\partial S_i} \right]_{D,\theta=cte} \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (\text{Eq. 3.29})$$

### 3.5.3 Coeficientes Dielétricos

A permissividade absoluta (ou constante dielétrica) estabelece uma proporcionalidade entre o deslocamento elétrico e o campo elétrico aplicado.

A permissividade elétrica, na situação de deformação zero ou deslocamento livre, é dada por[8]:

$$\varepsilon_{ij}^{S,\theta} = \left[ \frac{\partial D_i}{\partial E_j} \right]_{S,\theta=cte} \left[ \frac{F}{m} \right] \quad (\text{Eq. 3.30})$$

$$\varepsilon_{ij}^{T,\theta} = \left[ \frac{\partial D_i}{\partial E_j} \right]_{T,\theta=cte} \left[ \frac{F}{m} \right] \quad (\text{Eq. 3.31})$$

Onde o primeiro índice refere-se à direção do deslocamento elétrico e o segundo refere-se à direção do campo elétrico.

### 3.5.4 Fator de Acoplamento

Como os materiais piezoelétricos acoplam energia elétrica e mecânica, é necessário haver uma forma de medir a efetividade com que a energia mecânica converte-se em elétrica e vice-versa. O coeficiente que permite essa medição é o fator de acoplamento  $K_{\text{eff}}$  que é definido da seguinte forma[8]:

$$K_{\text{eff}}^2 = \frac{\text{energia convertida}}{\text{energia aplicada ao sistema}} \quad (\text{Eq. 3.32})$$

- No caso do efeito piezoelétrico direto:

$$K_{\text{effd}}^2 = \frac{\text{energia elétrica}}{\text{energia mecânica aplicada ao sistema}} \quad (\text{Eq. 3.33})$$

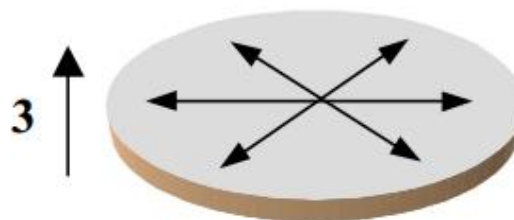
- Já para o efeito piezoelétrico inverso:

$$K_{\text{effi}}^2 = \frac{\text{energia mecânica}}{\text{energia elétrica aplicada ao sistema}} \quad (\text{Eq. 3.34})$$

Existem 2 tipos especiais de fator de acoplamento: o fator de acoplamento planar  $K_p$  e o fator de acoplamento de espessura  $K_t$ .

O fator de acoplamento planar  $K_p$  de um disco fino representa o acoplamento entre o campo elétrico na direção 3 (paralela ao eixo do disco) e efeitos mecânicos nas

direções concorrentes ao eixo desse disco, levando em conta a configuração dessas direções como estão apresentadas na figura 3.9.



**Figura 3.9 – Oscilações planares de um disco piezoelétrico.**

**Fonte:** CARAZO, A. V., Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements, 2000, p. 44

O fator de acoplamento de espessura  $K_t$  está relacionado ao acoplamento entre o campo elétrico e as vibrações mecânicas (ambos na direção 3) sobre um fino objeto planar de contorno arbitrário (objeto cujas dimensões da superfície são muito maiores que a sua espessura).

Esses coeficientes e alguns outros relacionados às placas de cerâmicas piezoelétricas podem ser vistos na tabela 3.1:

**Tabela 3.1:** Principais Materiais Piezoelétricos comerciais e suas constantes.

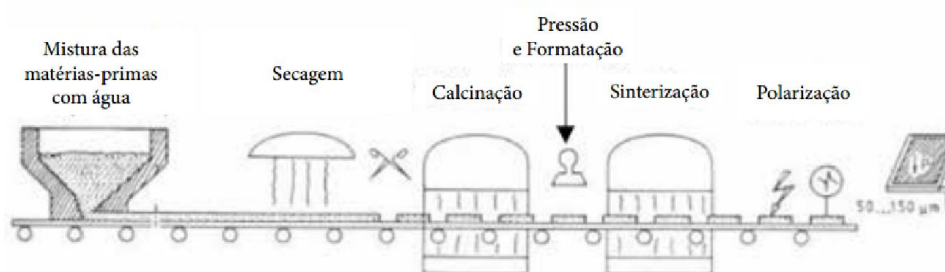
| Material                                          | PZT- 4 | PZT- 8 | PZT- 5A | PZT- 5J | PZT- 5H |
|---------------------------------------------------|--------|--------|---------|---------|---------|
| $k_p$                                             | 0,60   | 0,50   | 0,61    | 0,60    | 0,63    |
| $k_{33}$                                          | 0,68   | 0,63   | 0,70    | 0,71    | 0,73    |
| $d_{33}$                                          | 300    | 215    | 400     | 460     | 550     |
| $d_{31}$                                          | -11.5  | - 9.5  | - 170   | - 210   | - 265   |
| $g_{33}$                                          | 26     | 25     | 25      | 22      | 19      |
| $g_{31}$                                          | -11    | -11    | -11     | -9      | -9      |
| $s_{11}^E$ (x $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)       | 12     | 11     | 19      | 23      | 21      |
| $s_{33}^E$ ( x $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /N)      | 16     | 14     | 16      | 16      | 15      |
| Fator de dissipação<br>$\tan\delta$ (baixo campo) | 0,004  | 0,004  | 0,02    | 0,02    | 0,02    |
| Densidade (kg/m <sup>3</sup> )                    | 7600   | 7600   | 7650    | 7500    | 7500    |
| Temperatura de Curie (°C)                         | 325    | 330    | 360     | 260     | 190     |
| Tipo                                              | Hard   | Hard   | Soft    | Soft    | Soft    |

**Fonte:** Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades (2010).

Na tabela 3.1, o fator de dissipação elétrica é uma medida adimensional das perdas dielétricas do sinal e a Temperatura de Curie é o valor, em graus Celsius, no qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas. Depois de ultrapassada este valor de temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida tornando-se inútil para a utilização como elemento transdutor de energia elétrica em mecânica.

### 3.6 Fabricação de Piezocerâmicas

Algumas formações policristalinas anisotrópicas artificiais apresentam propriedades piezoelétricas. Titanato de bário e de materiais semelhantes, por exemplo, exibem propriedades ferroelétricas em policristalino preparados por processos convencionais de cerâmica. Estes materiais são muito interessantes graças às dificuldades e ao custo de certos cristais individuais.



**Figura 3.10 – Método tradicional para produção de PZT.**

**Fonte:** CARAZO, A. V., Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements, 2000, p. 47

A figura 3.10 apresenta o processo de fabricação de PZT. Neste processo, inicialmente, misturam-se quantidades apropriadas de Chumbo, Zircônio e os Óxidos de Titânio, juntamente com uma pequena percentagem de aditivos modificadores tais como  $MnO$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $CaO$  ou  $Sb_2O_5$  e a quantidade adequada de água. Em um segundo momento, esta mistura será seca e passará pelo processo de calcinação a temperaturas entre  $800^{\circ}C$  -  $1000^{\circ}C$ . Após a adição de ligantes orgânicos, a pasta resultante passa pelo processo de sinterização, onde as cerâmicas são pressionadas e aquecidas, geralmente entre 1 e 2 horas a temperaturas entre  $1100^{\circ}C$ - $1300^{\circ}C$ . O processo é finalizado pela polarização para que a amostra permaneça com a polarização remanescente [8].

## CAPÍTULO 4

Neste capítulo, serão apresentados o modelo, a metodologia utilizada para a realização do experimento e os resultados alcançados. Inicialmente, serão descritos o sensor utilizado e os equipamentos utilizados na pesquisa. Além disso, ao longo do texto, é discutida a metodologia dos testes que foram utilizados para mostrar como a teoria piezoelétrica pode ser verificada através de experimentos práticos. Em seguida, serão apresentados os resultados alcançados e as condições sob as quais eles foram obtidos para ressaltar a verdadeira aplicabilidade deste dispositivo sensor para uma grande quantidade de situações, o que se constitui em uma das vantagens do nosso objeto de estudo em questão.

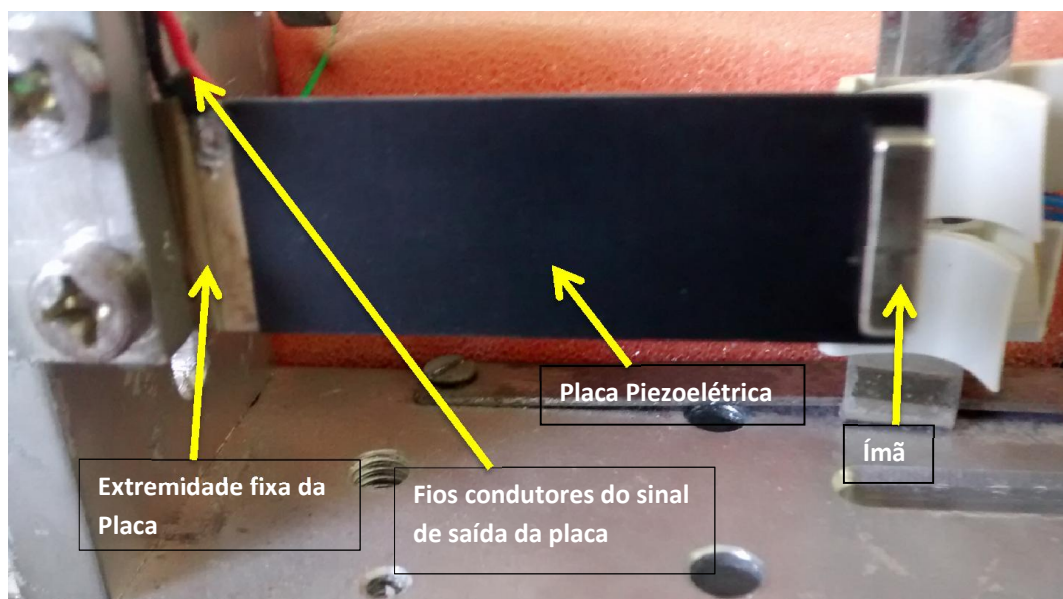
### EXPERIMENTO E RESULTADOS

#### 4.1 Materiais e Métodos

Para o estudo e aplicação da placa piezoelétrica como sensor de corrente, realizaram-se testes experimentais nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do IFCE e no Laboratório de Telecomunicações e Ciência e Engenharia de Materiais (LOCEM/UFC) e que objetivavam verificar o perfeito funcionamento dos equipamentos bem como aumentar a experiência no manuseio deste sensor. Os ensaios consistiram em comparar os resultados obtidos com o sensor piezoelétrico com os obtidos utilizando equipamentos de medidas tradicionais (osciloscópios, alicate amperímetro, volímetros). Como ressaltado por diversas literaturas, a principal diferença nos resultados está relacionada à calibração dos equipamentos de medidas utilizados, da placa piezoelétrica e da distância de aproximação entre o sensor e a linha de transmissão de energia, que nesta dissertação foi representada pela bobina cilíndrica de fio condutor alimentado pelo variac.

##### 4.1.1 Arranjo Experimental

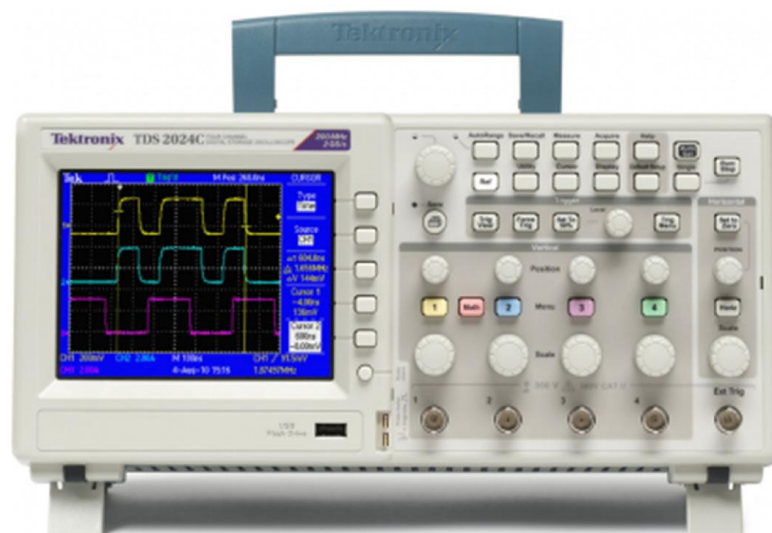
O sensor de corrente em questão é construído a partir de uma placa piezoelétrica com um ímã preso à sua extremidade livre que pode ser visualizada na figura 4.1 subsequente:



**Figura 4.1** – Placa piezoelétrica com o ímã instalado em sua extremidade livre.

Na figura 4.1, podem ser visualizados a placa piezoelétrica com um ímã instalado na sua extremidade livre. Este ímã é fundamental para o bom funcionamento do sensor, pois, ao ser atraído pelo campo magnético induzido pelo campo elétrico gerado pela corrente medida, ele origina a compressão e descompressão da placa piezoelétrica. Por sua vez, esta placa, ao ser deformada, gera um sinal elétrico que será analisado através de um osciloscópio. Neste trabalho, foi utilizado o osciloscópio digital modelo TDS 2022B da marca Teltronix visualizado na figura 4.2 e que possui as seguintes características[20]:

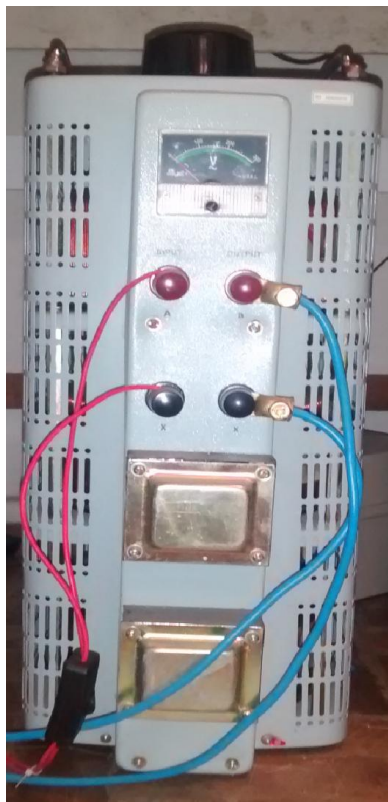
- Largura de Banda: 200MHz
- Taxa de amostragem: 2GS/s
- Quantidade de canais: 2
- Máxima tensão de entrada: 300 Vrms
- Impedância de entrada: 1 MΩ



**Figura 4.2** – Osciloscópio digital Tektronix TDS 2022B.

Para simular as correntes que serão medidas em uma linha de transmissão, foi utilizado um VARIAC capaz de gerar diferentes magnitudes de correntes senoidais na frequência de 60Hz. Esta corrente é aplicada sobre a bobina cilíndrica de fio condutor, com o intuito de produzir campos magnéticos induzidos de diferentes intensidades. O VARIAC utilizado é do modelo TDGC2-30 (visto na figura 4.3) e que possui as características descritas abaixo[2]:

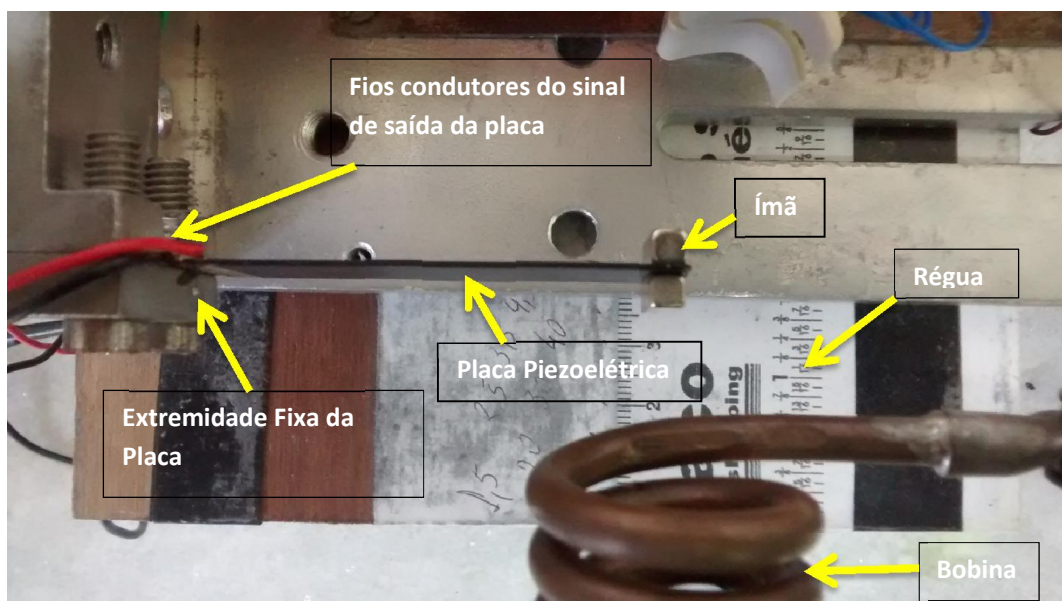
- Entrada: 127/220Vca
- Capacidade: 15KVA/220Vca.
- Saída: 0-140Vca/0-250Vca
- Corrente de saída: 120 A



**Figura 4.3 – VARIAC TDGC2-30.**

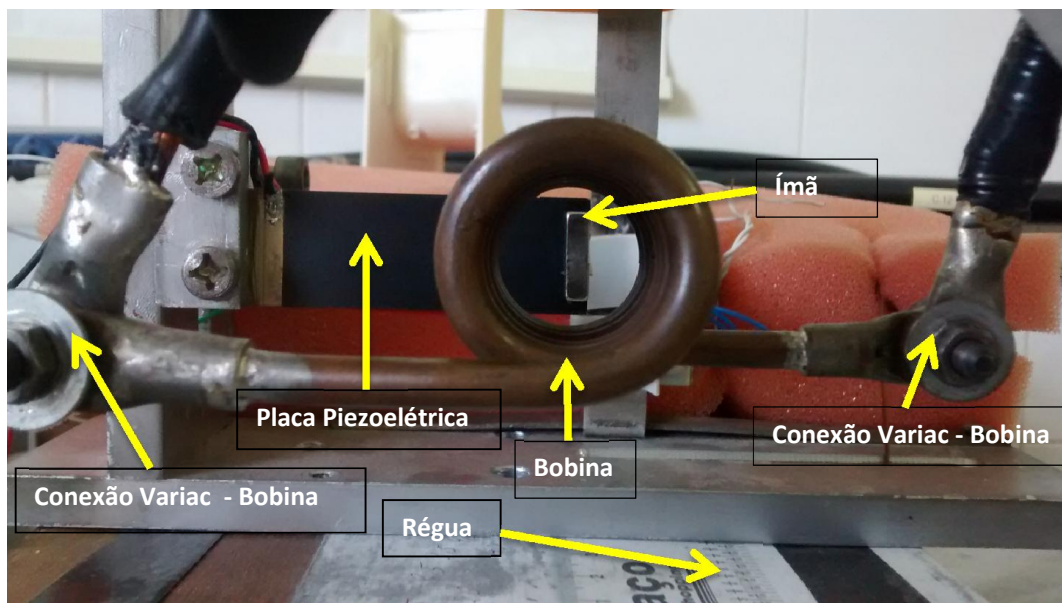
#### **4.1.2 Metodologia Utilizada**

O funcionamento desse mecanismo de sensoriamento é garantido pelo fenômeno da indução eletromagnética. Neste caso, a corrente elétrica que circula na bobina cilíndrica produz um campo elétrico que, por sua vez, induz campos magnéticos induzidos de diferentes magnitudes capazes de atrair ou repelir o ímã que está preso à extremidade livre da placa piezoelétrica. Esta movimentação faz com que a placa utilizada, como a apresentada nas figuras 4.4 e 4.5 vistas, gere sinais elétricos na sua saída.



**Figura 4.4** – Vista superior do sensor piezoelétrico.

Na figura 4.4, pode-se visualizar a bobina cilíndrica que representa a linha de transmissão na execução desta pesquisa, sabendo-se que ela está ligada a um VARIAC responsável por gerar a corrente que nela se propaga. Há, na base da nossa bancada, uma régua instalada que permitiu o controle preciso da distância existente entre o ímã na extremidade livre da placa e a bobina, tendo em vista que esta distância é uma variável relevante para os resultados obtidos, o que pode ser comprovado pela equação. 4.2. A placa piezoelétrica, que possui o ímã preso na sua extremidade livre, está conectada ao osciloscópio através dos fios vermelho e preto vistos na imagem acima, de forma que o sinal elétrico gerado na saída da placa, devido à compressão ou descompressão da mesma, possa ser visualizado por meio do osciloscópio.



**Figura 4.5** – Vista frontal do sensor piezoelétrico.

Na figura 4.5 apresentada, é importante destacar o posicionamento centralizado do ímã em relação à bobina, já que, durante a realização dos testes, foi diagnosticado que, caso esse posicionamento não seja centralizado, os resultados perdem sua exatidão. Além disso, a figura 4.5 permite uma melhor visualização dos conectores que ligam a bobina cilíndrica ao VARIAC que é o responsável pela geração das correntes que irão ser conduzidas à bobina cilíndrica.

O ímã presente na extremidade livre da placa possui magnetização orientada pela direção perpendicular ao plano das espiras da bobina indutora magnética, a qual tem sua indução quantificada pela lei de Biot-Savart, expressa na equação 4.1:

$$B = \frac{\mu_0 N i R^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

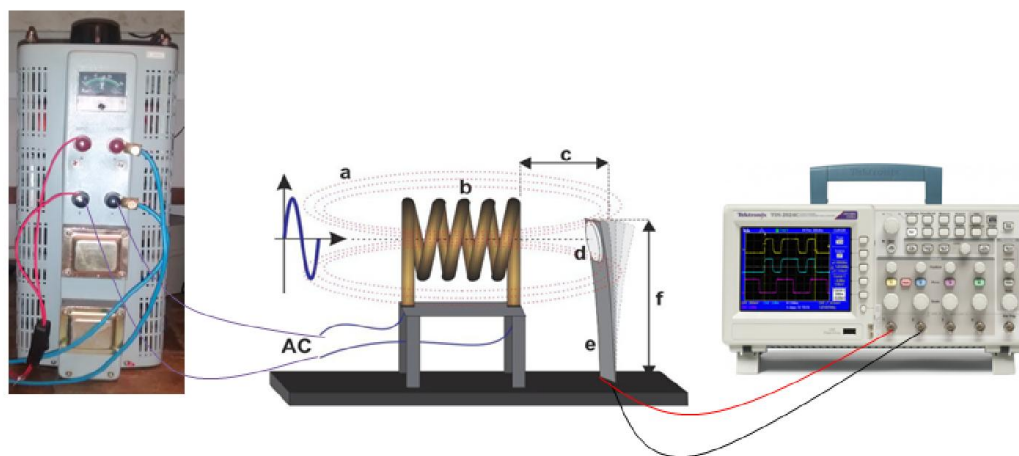
onde  $B$  é a quantificação da indução magnética na bobina no eixo  $z$  da bobina,  $\mu_0$  a permissividade do meio,  $N$  o número de espiras da bobina,  $i$  a corrente na bobina,  $R$  o raio das espiras da bobina,  $z$  é o eixo da bobina perpendicular ao plano  $xy$  e que passa pelo centro da espira [22].

As perturbações sofridas pelo ímã promovem uma compressão e decompressão da haste que, por sua vez, gera uma tensão de saída visualizada no osciloscópio utilizado. Este sinal produzido pela placa piezoelétrica é proporcional à intensidade da corrente de entrada e dado em função da corrente  $i$  que se propaga pelo condutor e pela distância  $D$  existente entre o sensor e a bobina utilizada, como visto na equação 4.2 que determina a Força aplicada sobre o ímã.

$$\vec{F} = VB_M \frac{I}{2\pi D^2} \vec{a}_r \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde  $I$  é a corrente que circula na bobina indutora magnética e  $\vec{a}_r$  é o vetor unitário, indicando a direção radial a partir das espiras da bobina.  $D$  é a distância entre a bobina e o sensor.  $V$  e  $B_M$  são o volume e a magnetização do ímã permanente, respectivamente.

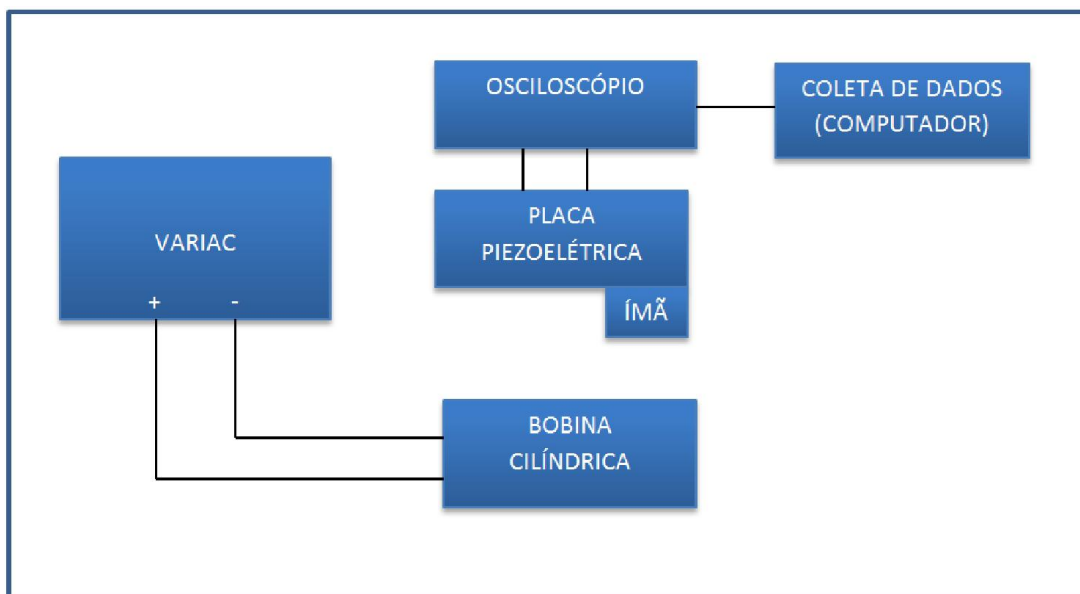
Assim, o nosso experimento foi montado em uma bancada como a visualizada na figura 4.6 e que possui a seguinte composição:



**Figura 4.6** – Visão esquemática da bancada utilizada para os experimentos.

- VARIAC responsável pela geração de correntes AC de diferentes magnitudes;
- Bobina cilíndrica por onde se propagam as correntes elétricas geradas pelo VARIAC e que são medidas pelo sensor;
- Ímã fixado à extremidade livre da placa piezoelétrica para fazer com que o campo magnético induzido pelas correntes que se propagam na bobina possa levar a placa piezoelétrica a sofrer o processo de compressão e descompressão;
- Placa piezoelétrica que sofrerá o processo de deformação por meio do ímã que está preso a ela e enviará ao osciloscópio um sinal elétrico proporcional à intensidade da corrente medida;
- Osciloscópio que coletará o sinal gerado na saída da placa piezoelétrica e o apresentará em sua tela.

O diagrama de blocos da figura 4.7 apresenta os componentes da bancada utilizada para a realização dos experimentos, além de ressaltar o funcionamento esquemático do sensor.



**Figura 4.7** – Diagrama de Blocos esquemático da bancada experimental.

Baseado na fundamentação teórica sobre piezoeletricidade e no sistema de medição trabalhado, foram realizados quatro experimentos principais para caracterizar o sensor:

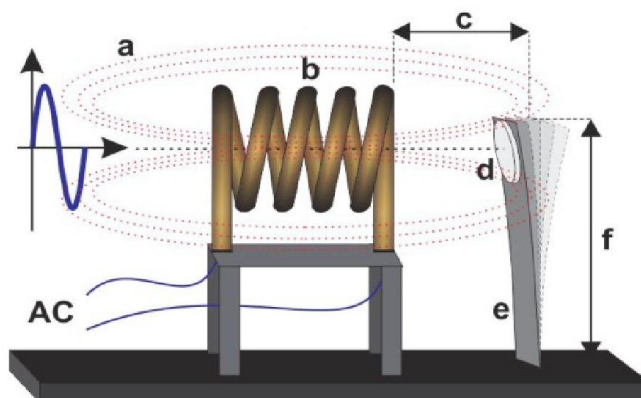
- 1) Variando a distância entre o sensor e a bobina cilíndrica entre os valores de 1,5cm; 2,5cm e 4 cm, foram medidas correntes que estão na faixa entre 15 e 60A (baixo valor de corrente) mantendo a diferença de 5 A entre duas medidas consecutivas.
- 2) Adotando os valores de 2,5cm e 5 cm para a distância entre o sensor e a bobina cilíndrica, foram medidas correntes que estão na faixa entre 65 e 110A( alto valor de corrente) respeitando a diferença de 5 A entre duas medidas consecutivas.
- 3) Mantendo-se fixo o valor da corrente a ser medida fixa em um valor considerado baixo (40 A), variou-se a distância entre a bobina e o sensor na faixa entre 1,5cm e 5 cm, respeitando a variação de 0,5cm entre duas medidas consecutivas.
- 4) Mantendo-se fixo o valor da corrente a ser medida fixa em um valor considerado alto (80 A), variou-se a distância entre a bobina e o sensor na faixa entre 1,5cm e 5 cm, respeitando a variação de 0,5cm entre duas medidas consecutivas.

A partir dos resultados obtidos através destes experimentos que serão exibidos no próximo tópico desta dissertação, pode-se observar o funcionamento deste sensor e

as vantagens que ele apresenta na medição das correntes que são conduzidas por linhas de transmissão elétricas.

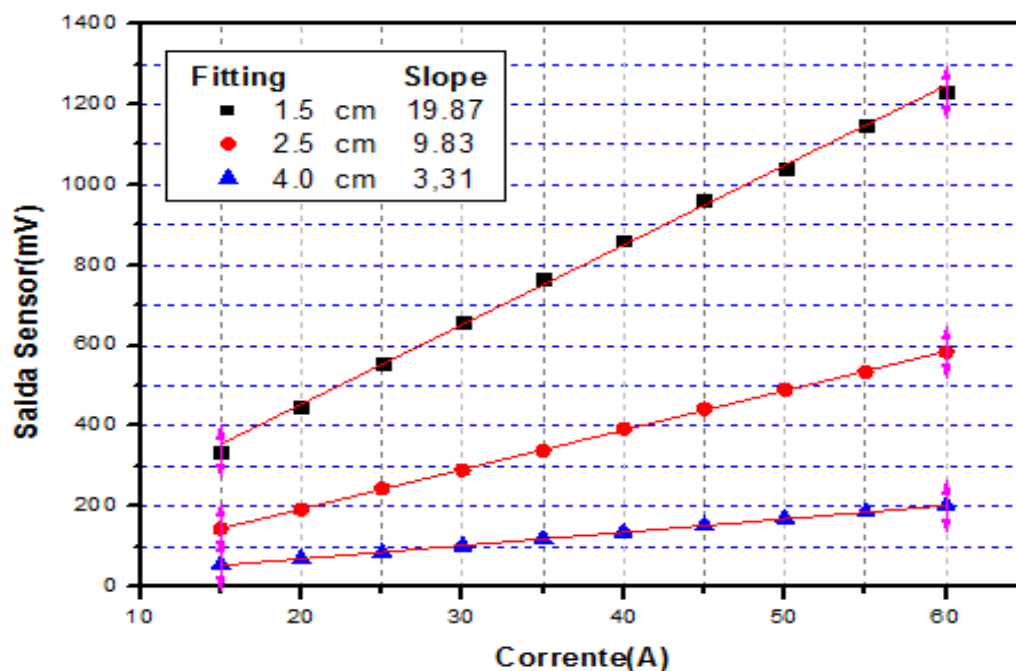
#### 4.2 Resultados e Discussão

A figura 4.8 ilustra a forma de atuação deste sensor, onde o campo magnético variável gerado em torno da bobina por onde passa a corrente elétrica induz um campo magnético que sensibiliza o ímã que está fixado na extremidade livre de uma placa flexível piezoelétrica. A cada deformação sofrida pela placa, devido à interação entre o ímã e o campo magnético envolvido, é gerado um sinal elétrico.



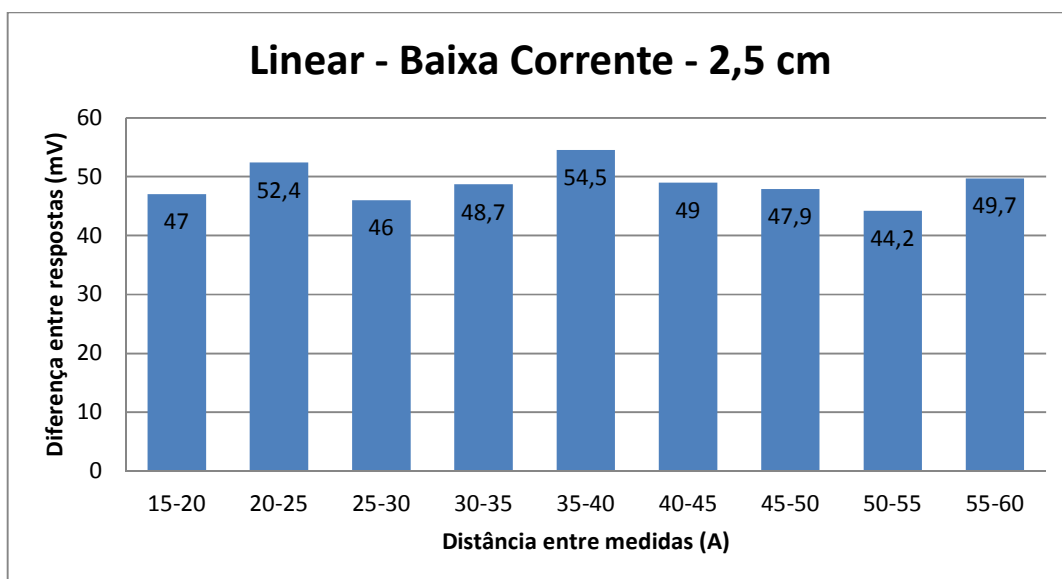
**Figura 4.8** - Ação do campo magnético sobre o ímã permanente a uma distância “c” da bobina, a qual gera uma perturbação na haste “e”.

Os resultados dos experimentos de funcionamento do sensor para a medição de baixas correntes podem ser visualizados na figura 4.9. Para fazer o sensoriamento dessas correntes, foram adotadas três distâncias entre o sensor e a bobina cilíndrica: 1,5cm; 2,5cm e 4cm. Destaque-se a dificuldade de realizar medidas com distâncias superiores a 4 cm, tendo em vista que a magnitude do sinal elétrico gerado pela placa piezoelétrica decai com o aumento da distância. Vale ressaltar que, neste trabalho, a faixa de correntes entre 15 a 60A foi considerada como baixa corrente. As medidas foram realizadas dentro de toda essa faixa mantendo a diferença de 5 A entre duas medidas consecutivas.



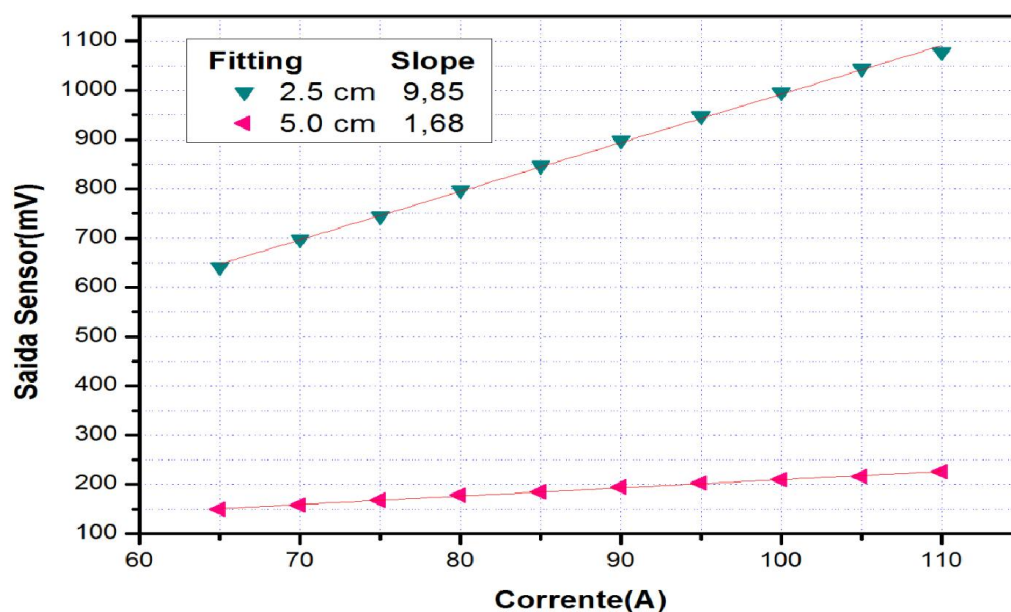
**Figura 4.9** – Gráfico que relaciona a faixa de baixa corrente medida com a amplitude do sinal de saída do sensor variando a distância entre condutor e sensor.

A variação numérica das respostas consecutivas do sensor ao passo em que a corrente medida aumenta para a medição de baixa corrente está apresentada na figura 4.10. Neste caso, compreende-se que, a cada variação de 5 A na corrente monitorada, há um valor médio das variações aproximado de 49mV no sinal gerado pela placa piezoelétrica. Esta variação aproximadamente constante entre uma medida e outra confirma, empiricamente, a proporcionalidade direta existente entre a corrente medida e a força exercida sobre a placa piezoelétrica conforme previsto na equação 4.2 disposta anteriormente.



**Figura 4.10**– Gráfico de colunas distância entre medidas x diferença entre respostas do sensor para a distância de 2,5cm na faixa de baixas correntes.

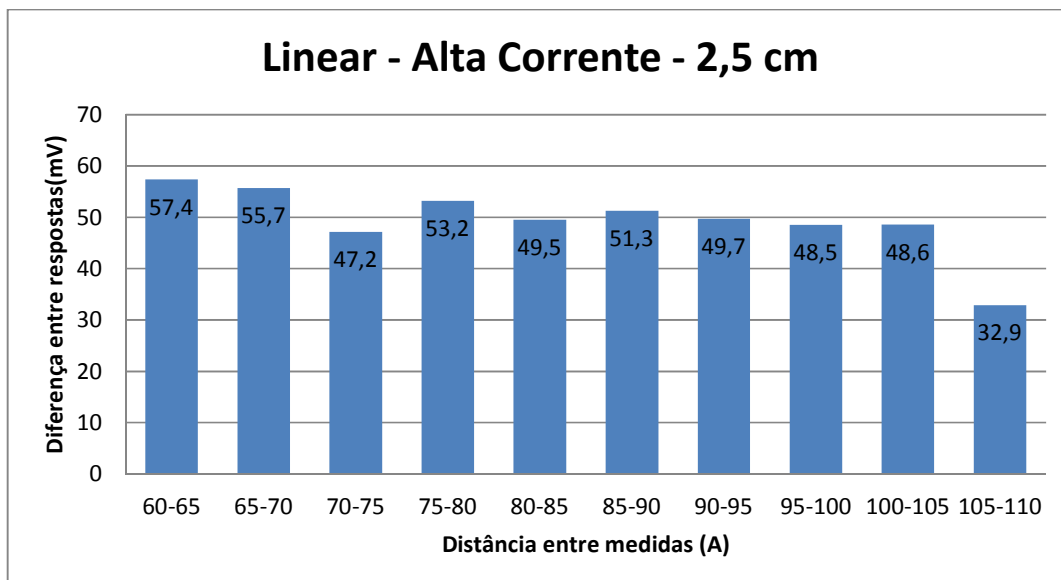
Para o caso de sensoriamento de alta corrente, os resultados das simulações de funcionamento do sensor podem ser observados na figura 4.11. Para monitorar essas correntes, foram adotadas duas distâncias entre o sensor e a bobina cilíndrica: 2,5cm e 5cm.



**Figura 4.11** – Gráfico que relaciona a medição de alta corrente com a amplitude do sinal de saída do sensor variando a distância entre condutor e sensor.

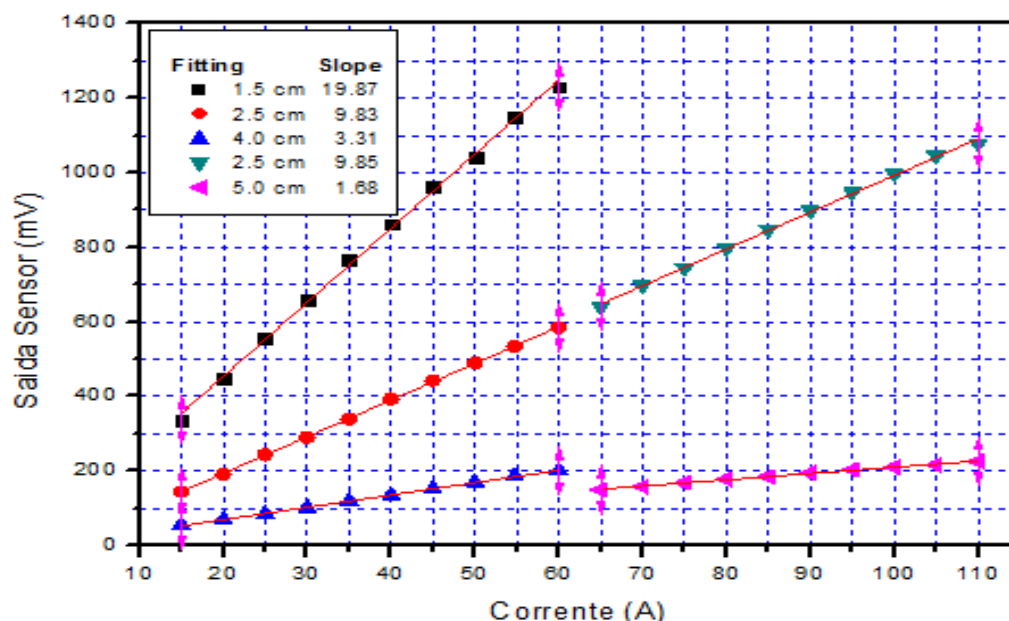
A variação numérica das respostas consecutivas do sensor ao passo em que a corrente medida aumenta para o caso da medição de alta corrente está apresentada no

gráfico 4.12. A cada variação de 5 A na corrente monitorada, há uma variação média próxima a 49mV no sinal gerado pela placa piezoelétrica. Esta variação é a mesma encontrada no caso da medição de baixa corrente. Isto, além de comprovar novamente a relação de proporcionalidade expressa na equação 4.2, ressalta a linearidade dos sinais emitidos pelo sensor em questão.



**Figura 4.12**– Gráfico de colunas distância entre medidas x diferença entre respostas do Sensor para a distância de 2,5cm na faixa de altas correntes.

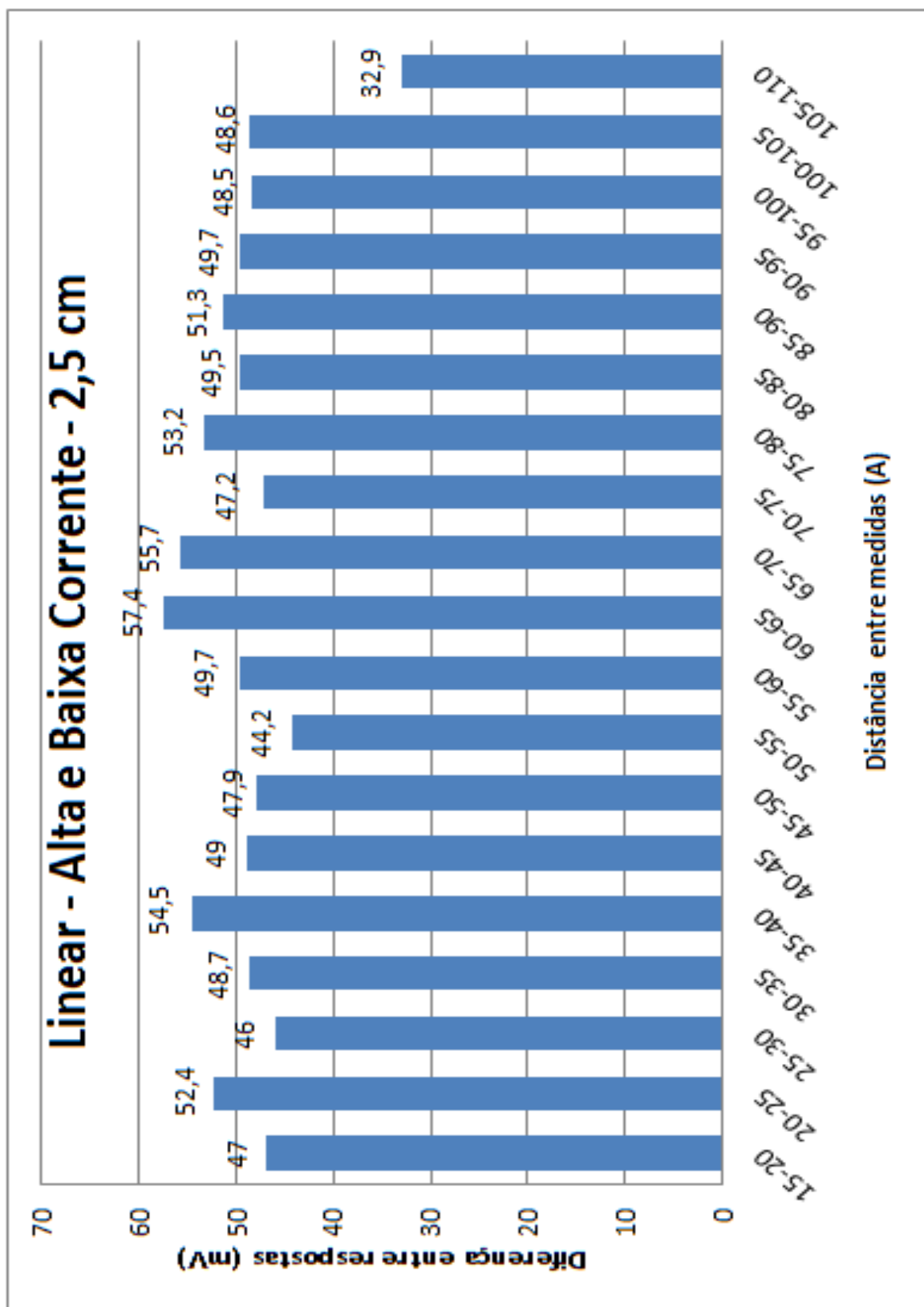
Na figura 4.13, estão expressas as curvas que representam as respostas do sensor mediante a variação da distância entre o sensor e a bobina e da corrente que circula na bobina utilizada. Para a construção desse gráfico, altas e baixas correntes foram medidas, ou seja, foram realizadas medidas em toda a faixa de correntes utilizada (15 a 110 A). Para a realização das medidas, foram utilizadas como distâncias entre o condutor e o sensor piezoelétrico: 1,5 cm; 2,5 cm e 4,0 cm para as baixas correntes (15 a 60 A) e 2,5cm e 5,0 cm para as altas correntes (65 a 110 A).



**Figura 4.13** – Gráfico que relaciona a corrente medida com a amplitude do sinal de saída do sensor variando a distância entre condutor e sensor.

Vale destacar que a distância de 2,5 cm foi utilizada para mensurar toda a escala, ou seja, alta e baixa corrente (15 a 110 A) na intenção de mostrar a linearidade da resposta do sensor à variação da corrente que está sendo sensoriada. Isto implica a viabilidade da utilização deste tipo de sensor para medições em sistemas elétricos que operem com uma ampla gama de valores de corrente. Outro fator motivador para a escolha do valor de 2,5cm em detrimento de valores de distância menores e que apresentam até uma maior sensibilidade que a apresentada para a distância de 2,5 cm (como a resposta do sensor para a distância de 1,5 cm, por exemplo) é a maior segurança, já que ela permite um maior distanciamento entre a linha de transmissão e o sensor sem comprometer, contudo, a linearidade e exatidão das respostas do sensor.

A variação numérica das respostas consecutivas do sensor à medida que a corrente monitorada aumenta para o caso da medição de baixa e alta corrente está apresentada no gráfico 4.13. A cada variação de 5 A na corrente monitorada, há uma variação média aproximada a 49mV no sinal gerado pela placa piezoelétrica, reforçando, assim, a linearidade dos sinais emitidos pelo sensor em questão.



**Figura 4.14**– Gráfico de colunas distância entre medidas x diferença entre respostas do Sensor para a distância de 2,5cm na faixa de baixas e altas correntes.

A tabela 4.1 demonstra que a sensibilidade do sensor varia com as distâncias da seguinte forma: 1,5 cm  $\approx$  19.87mV/A, 4.0 cm  $\approx$  3,31 mV/A, 5,0 cm  $\approx$  1,68 mV/A. É interessante perceber que não há variação no coeficiente de linearidade da reta para a distância de 2,5 cm que tem valores de 9,83 mV/A na baixa corrente e 9,85 mV/A na alta corrente. Além disso, o sensor pode ser utilizado para medições de alta corrente sem sofrer efeito de saturação, o que fortalece a utilidade deste sensor para medição de diferentes valores de corrente elétrica.

**Tabela 4.1:** Variação da sensibilidade do sensor de acordo com a distância do condutor

| D(cm)                         | 1,5cm | 2,5cm | 4cm  | 5cm  |
|-------------------------------|-------|-------|------|------|
| Sensibilidade do Sensor(mV/A) |       |       |      |      |
| <b>15A – 60A</b>              | 19.87 | 9.83  | 3.31 |      |
| <b>65A – 110A</b>             |       | 9.85  |      | 1.68 |

Na tabela 4.2, são apresentados os resultados relacionados à sensibilidade de um sensor óptico [23-36] aplicado para a medição de correntes elétricas em linha de transmissão. A metodologia do sensor do referido trabalho utiliza-se de um interferômetro Mach-Zender para obter esses valores.

**Tabela 4.2:** Variação da sensibilidade de sensor óptico de acordo com a distância do condutor para medição de correntes elétricas.

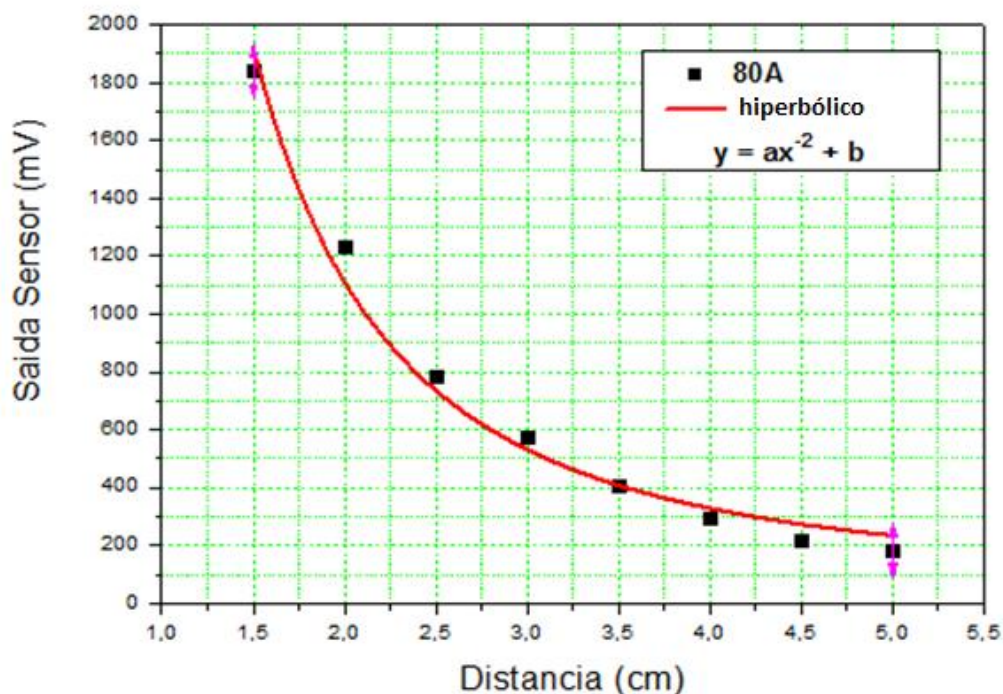
| D (cm)                        | 1,5 cm | 2,5 cm | 4 cm | 5 cm |
|-------------------------------|--------|--------|------|------|
| Sensibilidade do Sensor(mV/A) |        |        |      |      |
| <b>10 A – 60 A</b>            | 1,54   | 1,27   | 0,79 |      |
| <b>65 A – 110 A</b>           |        | 1,06   |      | 0,77 |

**Fonte:** Hybrid Opto-Mechanical Current Sensor Based on a Mach-Zehnder Fiber Interferometer (2014).

Os valores presentes nas tabelas 4.1 e 4.2 permitem a conclusão de que o sensor piezoelétrico abordado nesta dissertação apresenta uma excelente sensibilidade se comparado à sensibilidade de outros tipos de sensores voltados ao sensoramento de corrente elétrica. Tomando como base a faixa que abrange correntes de 10A até 110A e adotando a distância de 2,5 cm entre o sensor e a linha de transmissão, o sensor óptico apresenta uma sensibilidade média de 1,17 mV/A. Já o sensor piezoelétrico apresenta uma sensibilidade média de 9,84 mV/A para a faixa que abrange correntes entre 15A e 110A e utilizando a mesma distância de 2,5 cm entre o sensor e a linha de transmissão. Ou seja, o sensor piezoelétrico é, aproximadamente, oito vezes mais sensível do que o sensor óptico disponível na literatura[23].

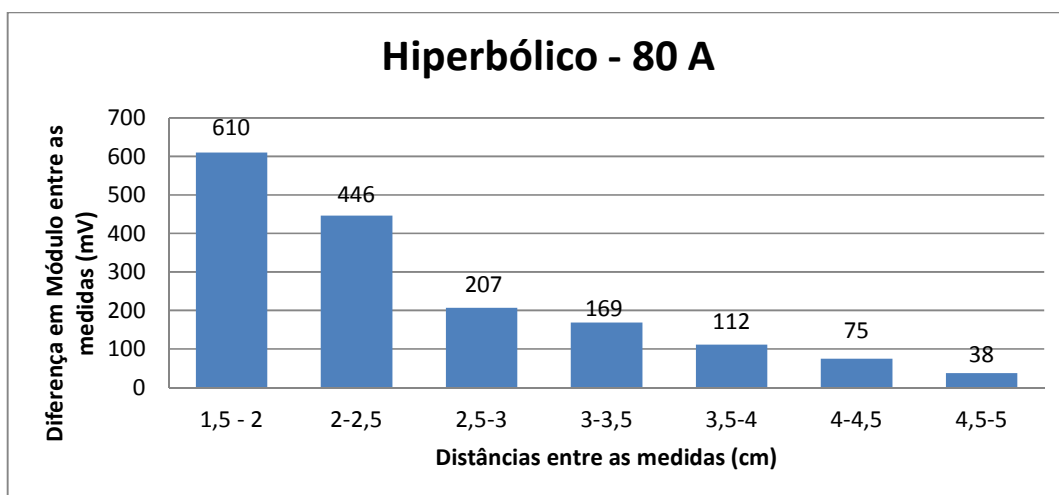
Outro experimento realizado com o sensor consistiu na verificação das respostas do sensor à variação da distância entre o sensor e a linha de transmissão mantendo a corrente sensorizada constante. No caso da figura 4.15, pode-se ver a resposta do sensor à variação da distância entre ele e a bobina cilíndrica quando a corrente permanece fixa no valor de 80 A (valor de alta corrente). Os pontos quadrados pretos são as marcações, no gráfico, dos valores encontrados como saída do sensor em cada distância utilizada

nesta simulação e a linha vermelha representa um ajuste de dados indicando uma hipérbole, tendo em vista que, pela Eq. 4.2, a força exercida sobre o sensor é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o sensor e o condutor do corrente monitorada.



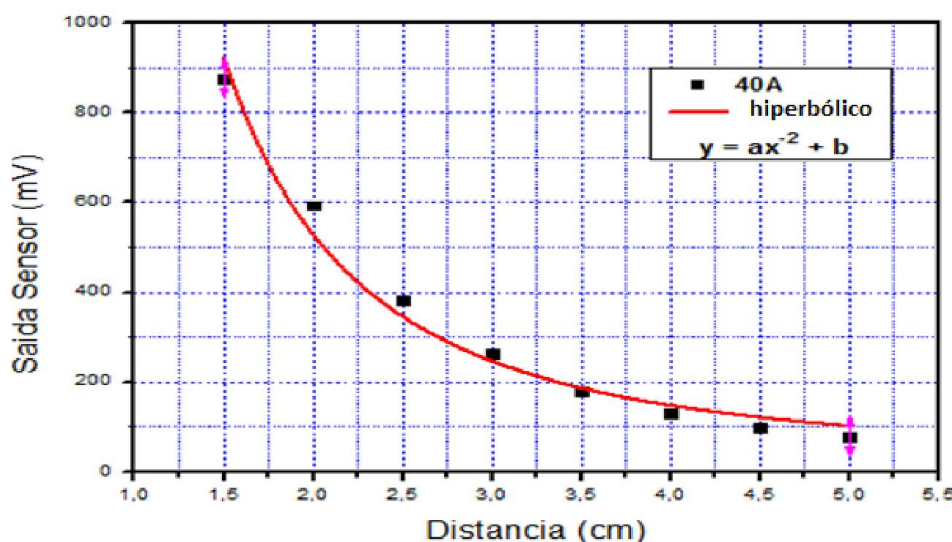
**Figura 4.15** – Gráfico que apresenta a resposta do sensor à variação da distância para corrente fixa de 80A.

A variação numérica das respostas consecutivas do sensor ao passo em que a distância entre ele e a linha de transmissão varia, sabendo-se que a corrente medida permanece fixa no valor de 80 A, é apresentada na figura 4.16. Entre cada medida e a sua subsequente é mantida uma variação constante no valor de 0,5 cm na faixa de distâncias entre 1,5 cm a 5 cm. O gráfico 4.16 apresenta também, como o gráfico 4.15, um perfil hipérbólico, confirmando a tese de que saída do sensor é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre sensor e dispositivo sensoriado.



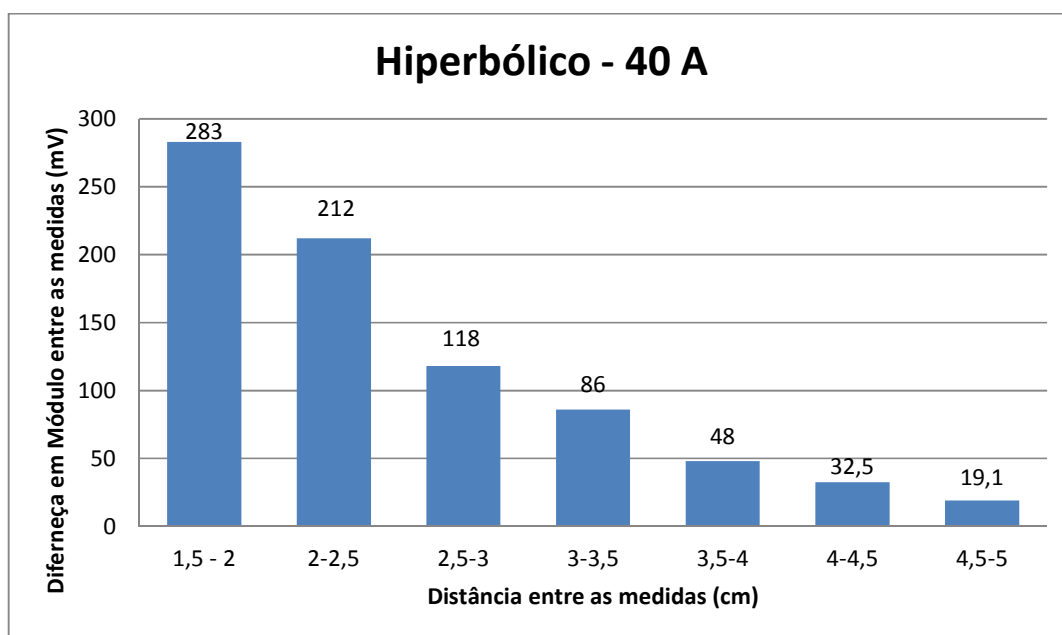
**Figura 4.16** – Gráfico de colunas: distância entre medidas x diferença em módulo entre medidas para a corrente de 80 A.

Na figura 4.17, visualiza-se a resposta do sensor à variação da distância entre ele e a bobina cilíndrica quando a corrente permanece fixa no valor de 40 A (valor de baixa corrente). Os pontos quadrados pretos são as marcações, no gráfico, dos valores encontrados como saída do sensor em cada distância utilizada no experimento e a linha vermelha representa o ajuste de dados indicando uma hipérbole, tendo em vista que, pela Eq. 4.2, a força exercida sobre o sensor é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o sensor e o condutor do corrente medida. Este comportamento hiperbólico do gráfico para a corrente de 40 A é semelhante ao encontrado no gráfico obtido quando fixa-se a corrente no valor de 80 A. Isto mostra que o sensor possui funcionamento semelhante quando está verificando alta e baixa corrente.



**Figura 4.17** – Gráfico que apresenta a resposta do sensor à variação da distância para corrente fixa de 40A.

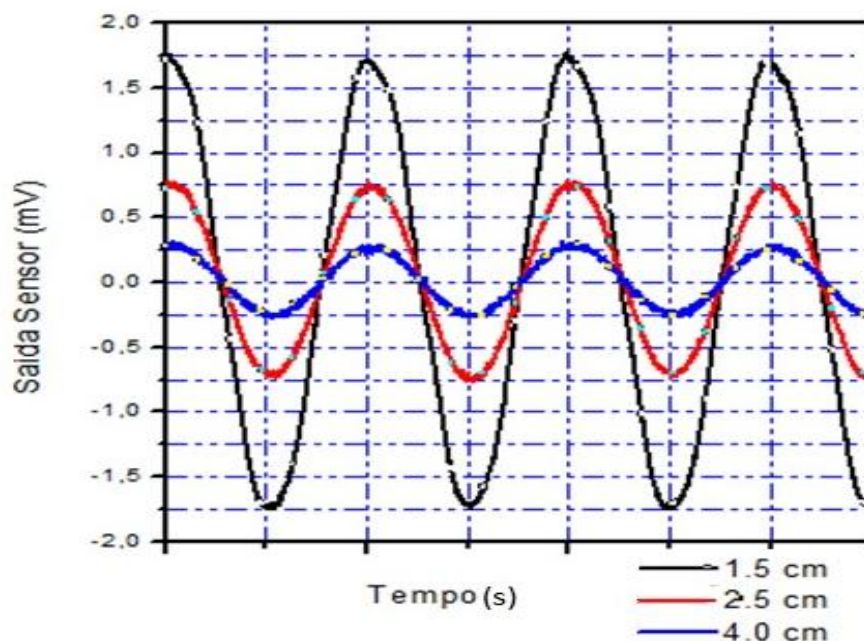
Na figura 4.18, é demonstrada a variação numérica das respostas consecutivas do sensor, com a corrente que circula na bobina fixada no valor de 40 A, enquanto a distância entre o sensor piezoelétrico e a bobina cilíndrica varia respeitando a variação de 0,5 cm entre uma medida e outra na faixa de distâncias que abrange valores entre 1,5 cm a 5 cm. Além disso, pode-se constatar que esse gráfico de colunas possui o mesmo comportamento hiperbólico do gráfico 4.17, ressaltando a confirmação da proporcionalidade inversa entre a saída do sensor e o quadrado da distância entre ele e a linha de transmissão.



**Figura 4.18**– Gráfico de colunas: distância entre medidas x diferença em módulo entre medidas para a corrente de 40 A.

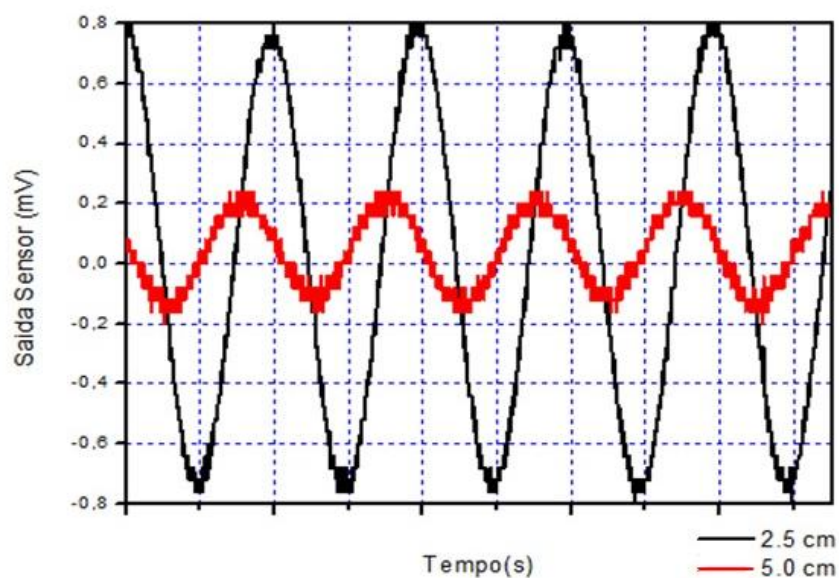
Além disso, os gráficos presentes nas figuras 4.9 e 4.11 permitem a validação dos dados obtidos no gráfico da figura 4.15 e 4.17 por meio da técnica de cruzamento de dados. Por exemplo, no gráfico da figura 4.9, vê-se que, a uma distância de 2,5 cm entre condutor e sensor, uma corrente de 40A levará o sensor piezoelétrico a produzir um sinal de saída de 400mV aproximadamente. Já no gráfico da figura 4.17 observa-se que uma corrente de 40A, a uma distância de 2,5 cm entre condutor e sensor, levará o sensor piezoelétrico a produzir também um sinal de saída de 400mV aproximadamente.

Na figura 4.19, tem-se o perfil temporal obtido pelo sensor a partir da medição da corrente de 40A (baixa corrente) a partir da variação da distância D (1,5 cm; 2,5 cm e 4 cm) entre a bobina e o ímã permanente na extremidade livre da placa piezoelétrica. Assim, este gráfico mostra o comportamento do sinal produzido pelo sensor piezoelétrico nas três distâncias utilizadas para avaliar as baixas correntes ao longo do tempo.



**Figura 4.19** – Resposta temporal do sensor à variação da distância entre condutor e sensor para corrente de 40A.

A figura 4.20 representa o perfil temporal apresentado pela medição da corrente de 80 A (alta corrente) quando a distância  $D$  assume os valores de 2,5cm e 5 cm. Desta forma, este gráfico mostra o comportamento do sinal gerado pela placa piezoelétrica nas duas distâncias utilizadas para avaliar as altas correntes ao longo do tempo.



**Figura 4.20** – Resposta temporal do sensor à variação da distância entre condutor e sensor para corrente de 80A.

Os dois gráficos presentes nas figuras 4.19 e 4.20 também contribuem para a conclusão de que a amplitude do sinal de resposta do sensor diminui quando a distância entre a linha de transmissão e o sensor aumenta.

## CAPÍTULO 5

O presente trabalho investigou a possibilidade de aplicação de uma cerâmica PZT para medições de correntes em sistemas elétricos utilizados pelas empresas geradoras ou transmissoras de energia elétrica. Para tanto implementou-se, em laboratório, uma configuração que possibilitasse o uso de uma placa piezoelétrica como elemento sensor de forma a verificar através de experimentos em bancada uma série de medidas e testes de confiabilidade para adequada avaliação e utilização da cerâmica piezoelétrica como elemento sensor.

A seguir apresentaremos as conclusões sobre o trabalho proposto e as perspectivas relacionadas ao trabalho

### CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusões

Neste trabalho, através da utilização de cerâmicas piezoelétricas, foi demonstrada a aplicação de uma cerâmica PZT para sensoriamento de altas e baixas correntes, no limiar de 15 a até 110A, e que poderá ser utilizado em linhas de transmissão das companhias de energia elétrica, possibilitado um mecanismo de sensoriamento de corrente elétrica em linhas de transmissão de energia.

Através dos resultados obtidos em experimentos laboratoriais, comprovou-se que o sinal de resposta da placa piezoelétrica é diretamente proporcional à corrente monitorada e inversamente proporcional ao quadrado da distância existente entre o sensor e o condutor da corrente monitorada, conforme a Eq. 4.2.

A partir dos resultados obtidos, nos testes em laboratório, foram construídos, primeiramente, gráficos que relacionam a saída do sensor à variação da corrente mantendo fixas as distâncias entre a placa piezoelétrica e a bobina condutora. Os gráficos obtidos após esses testes apresentaram um comportamento linear tanto para altas e baixas correntes, e mostraram para todos os casos analisados, que os resultados estão em concordância com o comportamento sugerido pela literatura.

Outros resultados, expressos em gráficos apresentados nessa dissertação, foram obtidos a partir da resposta do sensor à variação da distância entre o dispositivo sensor e a linha de transmissão de energia, de modo a sensoriar a corrente elétrica que circula pela bobina utilizada, mantendo o valor de corrente constante. Estes resultados, por sua vez, apresentaram um comportamento hiperbólico para todas as correntes monitoradas, confirmando, assim, a proporcionalidade inversa existente entre o valor de saída do sensor e o quadrado da distância entre ele e o condutor por onde a corrente monitorada circula e os resultados já esperados baseando-se na literatura correlata.

Mantendo a corrente fixa e variando a distância entre o sensor e a bobina utilizada, foram traçados gráficos, sendo um para alta corrente e outro para baixa

corrente, onde os mesmos apresentaram um comportamento hiperbólico conforme a eq. 4.2 determina.

Desta forma, comprovou-se a eficácia da utilização de cerâmicas de PZT em dispositivos destinados ao sensoriamento de correntes que circulam nas linhas de transmissão do sistema elétrico brasileiro e, além disso, aproveitam-se as inúmeras vantagens trazidas por esse tipo de material para a função de sensoriamento elétrico, como: boa sensibilidade, peso reduzido, baixo custo de produção e instalação, exatidão, menores riscos de operação para equipamentos e operadores, linearidade na utilização de medidas de altas e baixas correntes.

### **Perspectivas para trabalhos futuros**

Como perspectivas para trabalhos futuros, apresentamos as seguintes propostas:

- 1) Desenvolvimento de um sistema de comunicação à distância sem fio para permitir o monitoramento remoto das correntes que circulam na rede elétrica que está sendo sensoriada, o que possibilitaria maior agilidade na detecção de falhas do sistema e a possibilidade de evitar que essas falhas causem maiores prejuízos aos sistemas elétricos das operadoras de energia.
- 2) Transformar este sensor em um produto comercial, dando-lhe, além de um sistema de comunicação sem fio, uma estrutura protetora. Este processo já foi iniciado como se vê na requisição de patente e no resultado das buscas em bancas de patente nacionais e internacionais presente nos anexos. Além disso, devem ser realizados outros testes necessários para que o sensor tenha aplicação comercial e/ou industrial, como provas de conceito, testes de fadiga, entre outros.

### **5.2 Trabalhos decorrentes desta dissertação**

- Anexo A: Formulário de Divulgação de Invenção.
- Anexo B: Resultado da busca no banco de dados do INPI/BR e em bases de bancos de patentes internacionais.
- Anexo C: Artigo a ser submetido.

## REFERÊNCIAS

- [1] CURIE, J.; CURIE, P. Development par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées, *Bulletin de la Société Mineralogique de France*, Paris, 3, p. 90-93, 1880.
- [2] LACHMAN, M. *Sistema de Monitoração Remota e Avaliação do Estado Operativo de Transformadores de Potencial Capacitivo(TPCs) Instalados em Subestações em Operação*. 2007. 110f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC, 2007.
- [3] MARTINS, W. W. M. *Sensores ópticos de tensão baseados no efeito eletroóptico em cristais de niobato de lítio*. 2006. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira – SP, 2006.
- [4] RIBEIRO, B. A. *Transformador de potencial óptico baseado em fbg-pzt com demodulação por redes gêmeas e filtro de fabry-perot*. 2011. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ, 2011.
- [5] FILHO, J. M. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [6] CLARK, H. K. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Santa Maria: Edições UFSM, 1983.
- [7] ZIMMERMANN, A. C.; ULIANA, P. B.; WENDHAUSEN, M.; NICOLodi, R. Transdutor Híbrido de Corrente e Tensão para Monitoração Linhas de Transmissão de 138 Kv. In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 4, 2007, Araxá – MG.
- [8] CARAZO, A. V. *Novel piezoelectric transducers for high voltage measurements*. 2000. 216f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2001.
- [9] SUSLICK, K.S. The Chemical Effects of Ultrasound. *Scientific American*. 1989.
- [10] CADY, W. G. *Piezoelectricity: an Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*. New York: Dover Press, 1964. Vol. II
- [11] PEREIRA, A. H. A. *Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades*. ATCP Engenharia Física. 2010.

- [12] SAKAMOTO, J. M. S. *Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos flexionais*. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista(UNESP), Ilha Solteira – SP, 2006.
- [13] JORDAN, T. L., OUNAIES, Z. *Piezoelectric Ceramics Characterization*. Virginia: ICASE - NASA Langley Research Center. 2001.
- [14] KINO, G. S. *Acoustic waves: devices, imaging and analog signal processing*. New Jersey: Prentice-Hall, 1987. 601p.
- [15] ROSEMBAUM, J. F. *Bulk acoustic wave theory and devices*. London: Artech House, 1988. 462 p.
- [16] ADAMOWSKI, J. C. *Sensores: Teoria e Aplicações*. São Paulo: Escola Politécnica da USP. 50 p.
- [17] TAKAHASHI, M. Electrical Resistivity of Lead Zirconate Titanate Ceramics Containing Impurities. *Jap. J. Appl. Phys.*, v. 10, n. 5 .1971.
- [18] BRÜNAHL, J. *Physics of Piezoelectric Shear Mode Inkjet Actuators*. 2003. 93f. Tese (Doutorado em Física da Matéria Condensada). - Royal Institute of Technology, Stockholm. 2003.
- [19] ATCP do Brasil. *Materiais piezoelétricos: principais propriedades, classificação dos materiais comerciais, limitações e testes*. São Carlos. 2004.
- [20] Digital Storage Oscilloscopes. TDS1000B Series e TDS2000B Series. Disponível em: [http://www2.tek.com/cmsreplive/psrep/13295/3GM\\_19558\\_2\\_2011.02.10.07.25.34\\_13295\\_ES-MX.pdf](http://www2.tek.com/cmsreplive/psrep/13295/3GM_19558_2_2011.02.10.07.25.34_13295_ES-MX.pdf). Acesso em: 10 de fev. 2015
- [21] Regulador de Tensão (VARIAC) – TDGC. Características Técnicas. Disponível em: <http://www.jng.com.br/CERTIFICADOS/Regulador%20e%20estabilizador.pdf>. Acesso em: 12 de fev. de 2015.
- [22] RENATO DI MARZO, G. *Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Análise de Tensões Induzidas em Cabos Umbilicais*. 2010. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia de Energia e Automação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2010.
- [23] BASTOS, A. M.; MENEZES, J. W. M.; SOMBRA, A. S. B.; KAMSHILIN, A. A. Hybrid Opto-Mechanical Current Sensor Based on a Mach-Zehnder Fiber Interferometer. *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, n. 4, p. 1056 -1060, 2014.
- [24] NING, Y.N.; WANG, Z.P.; PALMER, A.W.; GRATTAN, K.T.V.;

JACKSON, D. A. Recent progress in optical current sensing techniques. *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 66, n. 5, p. 3097–3111, 1995.

[25] MALMEDAL, K.; SEN, P. K. Potential of massively deployed sensors applications in substation engineering. *Proc. IEEE 39th NAPS*, p. 259–265, 2007.

[26] ZU, P.; CHAN, C. C.; LEW, W. S.; JIN, Y.; ZHANG, Y.; LIEW, H. F. et al. Magneto-optical fiber sensor based on magnetic fluid. *Opt. Lett.*, vol. 37, n. 3, p. 398–400, 2012.

[27] HRABLIUK, J. D. P. Optical current sensors eliminate CT saturation. *Proc. IEEE PES Winter Meeting*, vol. 2., p. 1478–1481, 2002,

[28] SUN, L.; JIANG, S.; MARCIANTE, J. R. All-fiber optical magnetic-field sensor based on Faraday rotation in highly terbium-doped fiber,” *Opt. Express*, vol. 18, n. 6, p. 5407–5412, 2010.

[29] MACLEAN, E.; JAIN, V. K.; A power transmission line fault distance estimation VLSI chip: Design and defect tolerance. *Proc. IEEE Int. Symp. DFT VLSI Nanotechnol. Syst.*, p. 243–251, 2011.

[30] LANGENHORST, R.; EISELT, M.; PIEPER, W.; GROSSKOPF, G.; LUDWIG R.; KULLER, L. et al. Fiber loop optical buffer. *J. Lightw. Technol.*, vol. 14, n. 3, p. 324–335, 1996.

[31] VIAWAN, F. A.; WANG, J.; WANG, Z.; YANG, W.-Y. Effect of current sensor technology on distance protection. *Proc. IEEE PSCE*, p. 1–7. 2009.

[32] WANG, C.; SCHERRER, S. T. Fiber loop ringdown for physical sensor development: Pressure sensor. *Appl. Opt.*, vol. 43, n. 35, p. 6458–6464, 2004.

[33] GUERREIRO, H.; REAL, R. P.; CALEYA, R. F.; ROSA G. Magnetic field biasing in Faraday effect sensors. *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, n. 24, p. 3702–3704, 1999.

[34] NI, X.-J.; HUANG, M. Faraday effect optical current/magnetic field sensors based on cerium-substituted yttrium iron garnet single Crystal. *Proc. IEEE APPEEC*, p. 1–4, 2010.

[35] MAYSTRE F.; BERTHOLDS, A., Magneto-optic current sensor using a helical-fiber Fabry–Pérot resonator. *Opt. Lett.*, vol. 14, n. 11, p. 587–589, 1989.

[36] HAAPALAINEN, M.; DI GIROLAMO, S.; SOMBRA, A. S. B.; KAMSHILIN, A. A. Novel fiber-optic sensor of high electrical alternating currents. *Proc. AIP Conf.*, p. 107–114, 2013.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – Formulário de Divulgação da Invenção.



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação  
Núcleo de Inovação Tecnológica - NIT

| FORMULÁRIO DE DIVULGAÇÃO DA INVENÇÃO.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |         |                   |                                                                                      |                 |                                | Processo No. (para uso do NIT)<br><b>053/2014</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1. Título da Invenção                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |         |                   |                                                                                      |                 | 2. Campo da Invenção           |                                                   |
| Sensor de Corrente com Perturbação Magnética em Piezoelétrico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |         |                   |                                                                                      |                 | Sensor de Corrente             |                                                   |
| 3. Pesquisador Responsável<br>Agliberto Melo Bastos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |         |                   |                                                                                      |                 |                                |                                                   |
| 4. Nomes dos Inventores / Endereço Residencial                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Unidade | Grupo de Pesquisa | Laboratório                                                                          | Telefone        | E-mail                         |                                                   |
| Agliberto Melo Bastos /<br>Joelma Gomes, 39, Cajazeiras,<br>Fortaleza, CE.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | IFCE    | Materiais         | Fotônica do<br>Programa de Pós-<br>Graduação em<br>Engenharia De<br>Telecomunicações | 85-<br>99947501 | aglibertoamb@<br>gmail.com     |                                                   |
| Antônio Jefferson Manguiera Sales /<br>Rua Cruzeiro do Sul, 821, Carlito<br>Pamplona, Fortaleza, CE.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | UFC     | Materiais         | LOCEM                                                                                | 85-<br>88272922 | jeffsales.brasil<br>@gmail.com |                                                   |
| Cauhy Amorim Rodrigues Junior /<br>Rua Antonina do Norte, 750, São<br>Gerardo, Fortaleza, CE.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | UFC     | Materiais         | LOCEM                                                                                | 85-<br>87091313 | cauby@fisica.br                |                                                   |
| Mucio Costa Campos Filho /<br>Rua Dep. Paulino Rocha, 1001, Bl. G,<br>Quadra Oeste, AP 302, Cajazeiras,<br>Fortaleza, CE.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | IFCE    | Materiais         | LOCEM                                                                                | 85-<br>99324495 | muciney@gmail<br>.com          |                                                   |
| Jose Wally Mendonça Menezes /<br>Rua Úrsula Garcia, 132, Demócrito<br>Rocha, Fortaleza, CE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | IFCE    | Materiais         | Fotônica do<br>Programa de Pós-<br>Graduação em<br>Engenharia De<br>Telecomunicações | 85-<br>99986485 | josewallymm@<br>gmail.com      |                                                   |
| Manuel Henrique Bezerra Júnior /<br>Rua General Alípio dos Santos, 273-<br>Quintino Cunha – Fortaleza - CE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | IFCE    | Materiais         | Fotônica do<br>Programa de Pós-<br>Graduação em<br>Engenharia De<br>Telecomunicações | 85-<br>85155477 | henrique.engtel<br>e@gmail.com |                                                   |
| Antônio Sérgio Bezerra Sombra /<br>Rua Joaquim Nabuco, 2576, Apto<br>701, Dionizio Torres, Fortaleza, CE.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | UFC     | Materiais         | LOCEM                                                                                | 85-<br>99690713 | asbsombra@gm<br>ail.com        |                                                   |
| 5. Antecedentes e Técnica Correlacionada.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |         |                   |                                                                                      |                 |                                |                                                   |
| A. O problema técnico abordado pela invenção:<br>Um desafio a ser vencido atualmente é o monitoramento de corrente e tensão em sistemas de alta tensão, e sistemas em geral, onde altas potências elétricas são utilizadas. Os sensores atualmente utilizados em subestações de alta tensão são bastante seguros, porém, intensamente dispendiosos, o que torna a tecnologia de sensores ópticos e piezoelétricos de corrente e tensão bastante atrativa, tendo em vista que estes dispositivos são vistos como a próxima geração de dispositivos de medida de alta corrente e tensão, substituindo os transformadores convencionais utilizados na indústria de energia elétrica de potência. |         |                   |                                                                                      |                 |                                |                                                   |
| B. A técnica correlacionada mais próxima:<br>A literatura aponta que sensores de correntes com fibras ópticas podem resolver as questões aqui abordadas, porém são muito sensíveis em relação a harmônicos e transientes existentes na rede elétrica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |         |                   |                                                                                      |                 |                                |                                                   |
| C. A vantagem apresentada pela invenção:<br>Apresentamos um sensor praticamente imune aos temperes da rede elétrica, como harmônicos e transientes, comportando-se muito estável.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |                   |                                                                                      |                 |                                |                                                   |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6. Descrição da Invenção. (anexar)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |                                                                                                          |
| <p>Em um estudo anterior, apresentamos excelentes resultados de um sensor baseado em um interferômetro de Mach-Zehnder com fibra óptica acoplada. O esquema apresentado nas figuras 1 e 2 são semelhantes ao esquema de montagem do sensor do trabalho anterior, porém o sensoriamento neste trabalho é realizado pela deflexão de uma haste com material piezoelétrico. Com uso um Variac, foram testadas diferentes magnitudes para corrente senoidal na frequência de 60Hz em uma bobina cilíndrica de fio condutor, com o intuito de ser produzido campos magnéticos induzidos de diferentes intensidades. Os campos magnéticos produzidos pela bobina provocaram perturbações mecânicas sobre um ímã instalado na extremidade livre da haste com material piezoelétrico. Estas perturbações sofridas pelo ímã promoveram uma compressão e decompressão na haste, que por sua vez, gerou uma tensão de saída. Esta tensão gerada pelo material piezoelétrico é proporcional ao valor da corrente de entrada e foi medida por um osciloscópio digital de Tektronix (modelo TDS 2022B, 200 MHz, 2GS/s). O ranger de corrente alternada (AC) usado no experimento variou de 0 a 110 A.</p> |      |                                                                                                          |
| 7. Os desenhos para esta invenção estão disponíveis/não estão disponíveis? Se disponíveis, favor anexar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |                                                                                                          |
| Todos os desenhos estão no anexo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |                                                                                                          |
| 8. A invenção foi sintetizada para execução?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |      |                                                                                                          |
| Sim, foi sintetizada e executada.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |      |                                                                                                          |
| 9. Foram publicados quaisquer artigos? (anexar uma cópia de qualquer artigo publicado)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |      |                                                                                                          |
| Não.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |      |                                                                                                          |
| 10. Existem patentes anteriores depositadas pelo inventor relacionadas a esta tecnologia? (Cite número e título)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |                                                                                                          |
| <p>Patente em processo de finalização de Agliberto Melo Bastos:</p> <p>➤ Número de Protocolo: 026.2012.<br/>Título: Sensor de Corrente Óptico Interferômetro Mach-Zender.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |      |                                                                                                          |
| 11. Status: o invento está concluído e funcionando? Faltam testes e/ou outras providências? Há possibilidade de transferência imediata da tecnologia?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |      |                                                                                                          |
| Sim, concluído e funcionando com facilidade de transferência de tecnologia.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |                                                                                                          |
| 12. Nas buscas de anterioridade, foram encontradas tecnologias semelhantes (acessar os bancos em <a href="http://www.inpi.gov.br">www.inpi.gov.br</a> )?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |                                                                                                          |
| Sim, existem outros sensores com medição de correntes, mas as especificidades deste apresentado não tem similar.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |                                                                                                          |
| 13. São vislumbradas oportunidades no exterior? Se sim, em quais países e empresas?                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |                                                                                                          |
| Em todo o mundo empresas do setor energético tem necessidade de controle da qualidade da energia produzida, transportada e distribuída.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |      |                                                                                                          |
| 14. Essa invenção foi desenvolvida com o subsídio de algum fundo de pesquisa ou empresa? Há outras instituições de ensino e pesquisa envolvidas na pesquisa e desenvolvimento da patente? Indicar se foi firmado contrato ou convênio estabelecendo a titularidade da patente, direitos sobre a exploração comercial e instituição indicada para negociação e licenciamento da patente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |      |                                                                                                          |
| Sem subsídio. IFCE e UFC estão envolvidos nessa patente.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |                                                                                                          |
| Informações exatas e completas dos patrocinadores são necessárias para cumprir obrigações de contratos de pesquisa.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |                                                                                                          |
| 15. Datas de Concepção e de Divulgação ao Público (os dados exatos são essenciais porque a divulgação prévia pode afetar a possibilidade de obter direitos de patente).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Data | Referências / Comentários<br>incluir nomes de jornais e periódicos – use folhas separadas, se necessário |
| A. Primeira publicação contendo descrição suficiente para permitir a uma pessoa hábil nesse campo, compreender, fazer ou usar a invenção (inclua dissertações, teses e a data de submissão de artigos e anais).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |                                                                                                          |
| B. Primeira divulgação oral pública da invenção, suficiente para permitir a uma pessoa hábil nesse campo, compreender, fazer ou usar a invenção.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |      |                                                                                                          |
| C. Se não-publicada e não-divulgada, forneça a data prevista da publicação ou da divulgação oral e submissões feitas para publicação potencial.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |                                                                                                          |
| 16. Declaro que todas as indicações feitas neste documento sobre meu conhecimento são verdadeiras, assim como todas as informações e opiniões.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |      |                                                                                                          |



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação  
Núcleo de Inovação Tecnológica - NIT

Eu (nós) concordo (amos) em atribuir todos os direitos, títulos e interesses desta invenção para o IFCE, assim como concordo (amos) em atribuir ao IFCE, os direitos em qualquer aplicação de patente derivada desta invenção. Concordo (amos) em cooperar com o Núcleo de Inovação Tecnológica do IFCE - NIT - na proteção e comercialização desta invenção. O IFCE compartilhará todos os royalties derivados desta invenção com o inventor, de acordo com a Lei de Propriedade Intelectual (Lei nº 9279/96, art. 88 e com a Lei de Inovação nº 10.973/04, regulamentada pelo Decreto nº 5.563/05). O NIT por sua vez se compromete a manter sigilo do material, exceto quando em conflito com a proteção e comercialização.

|                                                                                                                                             |                                                                                                                                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <br>Agilberto Melo Bastos / 24 de Novembro de 2014         | <br>Antônio Jefferson Maranhão Sales / 24 de Novembro de 2014 |
| <br>Cauby Amorim Rodrigues Junior / 24 de Novembro de 2014 | <br>Manoel Costa Campos Filho / 24 de Novembro de 2014        |
| <br>José Wally Mendonça Menezes / 24 de Novembro de 2014   | <br>Manoel Henrique Bezerra Junior / 24 de Novembro de 2014   |
| <br>Antônio Sérgio Bezerra Sombra / 24 de Novembro de 2014 |                                                                                                                                                 |
| Pré-avaliação da tecnologia por: _____                                                                                                      |                                                                                                                                                 |
| Assinatura: _____                                                                                                                           | Data _____                                                                                                                                      |

## **ANEXO B – Resultado da busca no banco de dados do INPI/BR e em bases de bancos de patentes internacionais.**

### **V) CONSIDERAÇÕES ACERCA DO RESULTADO DA BUSCA**

O resultado desta busca tem o cunho de trazer alguns documentos mais recentes relacionados ao objeto da busca, em particular um sensor de corrente com perturbação magnética em piezoelétrico.

### **VI) CONCLUSÃO**

Entendemos que o DISPOSITIVO, tal como descrito nos documentos fornecidos por esta Universidade, permite concluir pela viabilidade de um depósito de patente, sendo que, determinados equipamento localizados na busca não apontou características construtivas similares a do dispositivo proposto.

### **VII) ENCERRAMENTO:**

Uma vez concluídas as pesquisas, dá-se por encerrado o presente trabalho, consubstanciado em 09 (nove) folhas impressas apenas no anverso, a última delas datada e assinada.

*É importante salientar que particularmente o Brasil mantém em sigilo de 18 meses os documentos depositados. Portanto, não nos responsabilizamos por documentos que, porventura, tiverem sido depositados no prazo acima a contar da entrega deste resultado.*

*Como o INPI em suas buscas oficiais declara que “não se responsabiliza por documentos não encontrados no banco de patentes por motivos alheios e diversos”, somos obrigados a agir da mesma forma.*

São Paulo, 20 de março de 2015.



Maria Sylvia Spessoto Zaroni

Técnica em Propriedade Intelectual (Patentes e Marcas)

# Aplicabilidade de uma Cerâmica PZT como Sensor de Correntes em Linhas de Transmissão de Energia

M. Henrique B. Júnior, Agliberto M. Bastos, A. Jefferson M. Sales, Alexei A. Kamshilin, A. Sergio B. Sombra and J. Wally M. Menezes

**Resumo** – Um sensor de corrente piezoelétrico é proposto neste trabalho. A corrente elétrica em um condutor é sensorizada através de perturbação mecânica em uma cerâmica PZT (Titanato – Zirconato de Chumbo) que apresenta efeito piezoelétrico e está acoplada ao sensor. A corrente alternada promovida pelas perturbações de compressão e descompressão do elemento piezoelétrico mostra-se proporcional à amplitude de corrente que passa no condutor. O sensor foi testado com correntes AC (60Hz) de até 110A. Alterando o arranjo experimental, o sensor poderá ser usado no acompanhamento de baixas e altas amplitudes de corrente. Esta nova geometria de sensor se mostra eficiente e efetiva no acompanhamento da qualidade do sinal elétrico para pequenos e grandes consumidores/geradores de energia elétrica.

**Index Terms**— Corrente Elétrica, Piezoelétrico, Sensor.

## I. Introdução

Um desafio a ser vencido atualmente é o monitoramento de corrente e voltagem em sistemas de alta tensão, e sistemas em geral, onde altas potências elétricas são utilizadas. Os sensores atualmente utilizados em subestações de alta voltagem são bastante seguros, porém intensamente dispendiosos, o que torna a tecnologia de sensores piezoelétricos de corrente e voltagem bastante atrativa, tendo em vista que estes dispositivos são vistos como a próxima geração de dispositivos de medida de alta corrente e voltagem, substituindo os transformadores convencionais utilizados na indústria de energia elétrica de potência [1,2,3].

No caso em questão, utilizamos sensores baseados em cerâmicas piezoelétricas para realizar o monitoramento da corrente elétrica. O efeito piezoelétrico permite a conversão de uma tensão mecânica em eletricidade e vice versa. Este tipo de sensor permite a medida de pressão, aceleração, força etc.[4]

Os sensores piezoelétricos são muito interessantes graças à alta sensibilidade, boa frequência de resposta, fácil construção e baixo custo deste tipo de sensor. Além disso, a ideia original destes sensores é realizar medições com um instrumento de tamanho pequeno e que possibilite uma capacidade de integração. Isto permite que eles sejam utilizados em áreas como transportes, monitoramento industrial, medicina etc[4,5]

## II. Experimental

Em um estudo anterior [7], apresentamos excelentes resultados de um sensor baseado em um interferômetro de Mach-Zehnder com fibra óptica acoplada. O esquema apresentado nas fig. 1 e 2 é semelhante ao esquema de montagem do sensor do trabalho anterior, porém o sensoriamento neste trabalho é realizado pela deflexão de uma haste com uma cerâmica piezoelétrica. Usando um Variac, foram testadas diferentes magnitudes para corrente senoidal com frequência de 60Hz em uma bobina cilíndrica de fio condutor, com o intuito de ser produzido campos magnéticos induzidos de diferentes intensidades. Os campos magnéticos produzidos pela bobina provocaram perturbações mecânicas sobre um ímã instalado na extremidade livre da haste com material piezoelétrico. Estas perturbações sofridas pelo ímã promoveram uma compressão e descompressão da cerâmica PZT que, por sua vez, gerou uma tensão de saída. Esta tensão gerada pelo material piezoelétrico é proporcional ao valor da corrente de entrada e foi medida por um osciloscópio digital de Tektronix (modelo TDS 2022B, 200 MHz, 2GS/s). O range de corrente alternada (AC) usado no experimento variou de 0 a 110 A.

## III. Revisão Teórica

A análise de funcionamento deste sensor deve ser dividida em duas partes. A primeira parte se trata da geração do campo magnético e sua influência na atração e repulsão ao ímã permanente. A geração do campo magnético é produzida nos bornes da bobina magnética de cobre por uma corrente senoidal AC que circula e faz surgir o vetor de indução magnética. O campo perturba um ímã permanente que tem sua magnetização orientada pela direção perpendicular das espiras da bobina indutora magnética e essa bobina tem sua indução quantificada pela lei de Biot-Savart, expressa na equação 1:

$$B = \frac{\mu_0 N i R^2}{2(Z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (1)$$

onde  $B$  é a quantificação da indução magnética na bobina,  $\mu_0$  a permissividade do meio,  $N$  o número de espiras da bobina,  $i$  a corrente na bobina,  $R$  o raio das espiras da bobina,  $Z$  é o eixo da bobina perpendicular ao plano xy e passa pelo centro da espira [6]. Tomando a distância  $D$  entre o ímã e a bobina, a força de Lorentz aplicada ao ímã é dada por:

$$\vec{F} = V B_M \frac{I}{2\pi D^2} \vec{a}_r \quad (2)$$

onde  $I$  é a corrente que circula na bobina indutora magnética e  $\vec{a}_r$  é o vetor unitário, indicando a direção radial a partir das espiras da bobina.  $V$  e  $B_M$  são o volume e a magnetização do ímã permanente, respectivamente. A equação 2 dá-nos a expressão da força da Lorentz que atua sobre o ímã permanente, tal como uma função da corrente  $I$  e da distância  $D$ . A segunda parte da análise do funcionamento deste sensor é o entendimento do efeito piezoelétrico promovido pela haste. A corrente  $I$  que passa pelo

condutor, promove um campo que atrai e repele o ímã permanente da haste que contém o material piezoelétrico. Estas oscilações na haste provocam tensões mecânicas e desencadeia o efeito piezoelétrico. A cerâmica piezoelétrica funciona como um transformador de corrente e seu mecanismo de transformação conta com a combinação mecânica de um atuador piezoelétrico e de um transdutor piezoelétrico. A função de transformação é realizada via acoplamento eletromecânico entre o atuador e o transdutor. O comportamento linear eletromecânico dos materiais piezoelétricos é descrito pela equação:

$$\varepsilon_i = S_{ij}^D \sigma_j + g_{mi} D_m \quad (3)$$

$$E_i = g_{mi} \sigma_i + \beta_{ik}^E D_k \quad (4)$$

onde  $i, j = 1, 2, \dots, 6$ , e  $m, k = 1, 2, 3$  referem-se a diferentes direções dentro do sistema de coordenadas do material,  $\varepsilon$  é o vetor strain,  $S$  é a matriz de coeficientes de conformidade,  $D$  é o vetor de deslocamento elétrico,  $\sigma$  é o vetor stress,  $g$  é a matriz de constantes piezoelétricas,  $E$  é o vetor de campo elétrico aplicado e  $\beta$  é a constante de impermeabilidade. Nessas condições,  $D$ ,  $E$ , e  $\sigma$  representam medições feitas em deslocamento elétrico constante, campo elétrico constante e tensão constante. A equação 3 expressa o efeito piezoelétrico “converse”, que descreve a situação quando o dispositivo está a ser utilizado como um atuador. A equação 4, por outro lado, expressa o efeito piezoelétrico “direct”, onde o transdutor está a ser usado como um sensor. O efeito “converse” é frequentemente utilizado para determinar os coeficientes piezoelétricos. Em forma de matriz, as equações 3 e 4 podem ser escritas como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{31} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11}^\sigma & e_{12}^\sigma & e_{13}^\sigma \\ e_{21}^\sigma & e_{22}^\sigma & e_{23}^\sigma \\ e_{31}^\sigma & e_{32}^\sigma & e_{33}^\sigma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde  $\gamma_{23} = \varepsilon_4$ ,  $\gamma_{31} = \varepsilon_5$ ,  $\gamma_{12} = \varepsilon_6$  para o vetor strain e  $\gamma_{23} = \sigma_4$ ,  $\gamma_{31} = \sigma_5$ ,  $\gamma_{12} = \sigma_6$  para o vetor stress. Partindo do princípio de que o dispositivo é polarizado ao longo de um determinado eixo, e que o material piezoelétrico se trata de um material cerâmico isotrópico transversalmente, muitos dos parâmetros nas matrizes vai ser zero, ou pode ser expressa em termos de outros parâmetros.

Para o experimento em questão, a tensão sofrida pela haste com material piezoelétrico é proporcional ao campo magnético induzido pela corrente na bobina. Assim, a corrente promovida na haste é diretamente proporcional à corrente de entrada na bobina condutora.

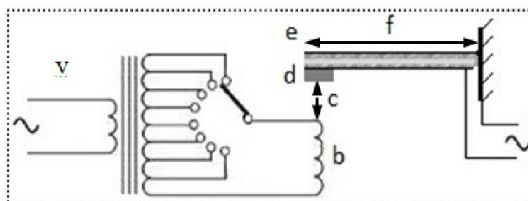


Fig. 1. Diagrama experimental do sensor de corrente piezoelétrico. Variac “v”, agente mecânico: bobina “b”, ímã “d”, haste “e” de comprimento “f”.

#### IV. Resultados e Discussões

A fig. 2 ilustra a forma de atuação deste sensor, onde o campo magnético variável gerado em torno do fio por onde passa a corrente elétrica induz um campo magnético alternado no ímã que está fixado na extremidade de uma placa flexível piezoelétrica. A cada deformação sofrida pela placa, devido à interação entre o ímã e o campo magnético envolvido, é gerado um sinal elétrico.

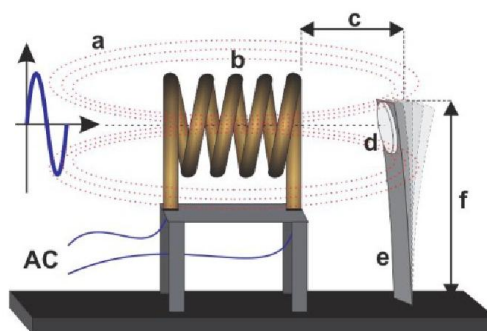


Fig. 2. Ação do campo magnético sobre o ímã permanente a uma distancia “c” da bobina, a qual gera uma perturbação na haste “e”.

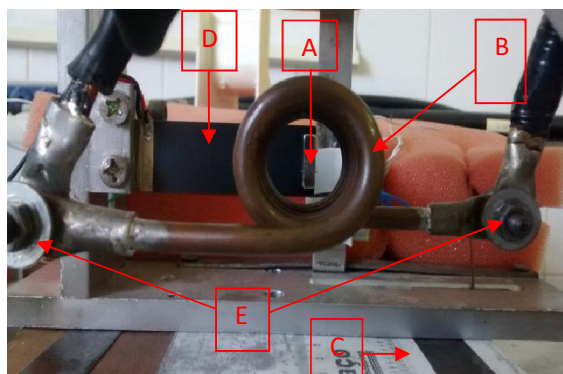


Fig. 3. Fotografia da bancada experimental: A placa piezoelétrica(D) ao fundo é deformada por meio da ação da indução magnética sobre o ímã(A) instalado em sua extremidade livre.

A fig. 3 apresenta a bancada experimental com a placa piezoelétrica(D) ao fundo, o ímã(A) instalado na extremidade livre da placa, a bobina cilíndrica(B) por onde se propagam as correntes geradas pelo VARIAC, os conectores(E) que interligam a bobina cilíndrica ao VARIAC e a régua(C) instalada na base da bancada para permitir exatidão na distância entre a bobina e o sensor.

O diagrama de blocos da fig. 4 apresenta os componentes da bancada utilizada para a realização dos experimentos, além de ressaltar o funcionamento esquemático do sensor.

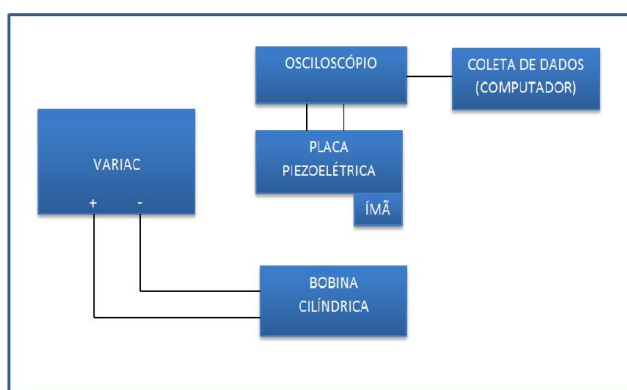


Fig. 4. Diagrama de blocos esquemático da bancada experimental.

Na fig. 5 apresentam-se as curvas que representam a resposta do sensor mediante à variação da corrente sensoriada. Para realização das medidas, foram utilizadas as distâncias  $D = 1.5 \text{ cm}$ ,  $2.5 \text{ cm}$ ,  $4.0 \text{ cm}$  e  $5.0 \text{ cm}$ , sendo as distâncias de  $1.5 \text{ cm}$  e  $4.0 \text{ cm}$  utilizadas para mensurar baixa corrente (15 a 60 A), a distância de  $5.0 \text{ cm}$  utilizada para medir alta corrente (60 a 110A) e a distância de  $2.5 \text{ cm}$  utilizada para mensurar toda a escala (15 a 110 A).

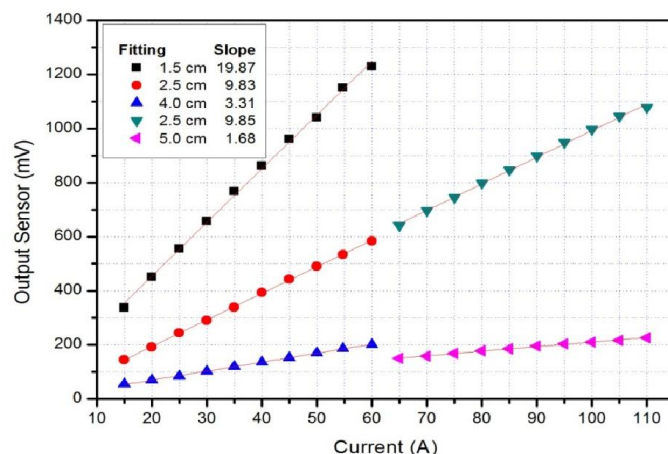


Fig. 5. Gráfico que relaciona a corrente do condutor com a amplitude do sinal de saída do sensor mantendo constante a distância entre condutor e sensor.

A sensibilidade varia com as distâncias da seguinte forma: 1.5 cm  $\approx 19.87 \text{ mV/A}$ , 4.0 cm  $\approx 3.31 \text{ mV/A}$ , 5.0 cm  $\approx 1.68 \text{ mV/A}$  (como pode ser visto na tabela I). É interessante perceber que não há variação no coeficiente de linearidade da reta para a distância de 2.5 cm que tem valores de  $9.83 \text{ mV/A}$  na baixa corrente e  $9.85 \text{ mV/A}$  na alta corrente, mostrando que não há variação de sensibilidade do sensor e que o sensor pode ser utilizado para medições de alta corrente sem sofrer efeito de saturação.

TABELA I  
Variação da sensibilidade do sensor de acordo com a distância do condutor

| D(cm)        | 1.5 cm                   | 2.5 cm                   | 4 cm                     | 5 cm                     |
|--------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|              | Sensor                   | Sensor                   | Sensor                   | Sensor                   |
|              | <u>Sensitivity(mV/A)</u> | <u>Sensitivity(mV/A)</u> | <u>Sensitivity(mV/A)</u> | <u>Sensitivity(mV/A)</u> |
| 15 A – 60 A  | 19.87                    | 9.83                     | 3.31                     |                          |
| 65 A – 110 A |                          | 9.85                     |                          | 1.68                     |

As figs. 6 e 7, que apresentam gráficos que foram construídos para as distâncias  $D = 1.5 \text{ cm}$ ,  $2.0 \text{ cm}$ ,  $2.5 \text{ cm}$ ,  $3.0 \text{ cm}$ ,  $3.5 \text{ cm}$ ,  $4.0 \text{ cm}$ ,  $4.5 \text{ cm}$  e  $5.0 \text{ cm}$  e correntes de  $40 \text{ A}$  (gráfico 4) e  $80 \text{ A}$  (gráfico 5), demonstram que a variação da resposta do sensor é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre o sensor e o condutor, de acordo com a Eq. 2. Além disso, esses gráficos possibilitam a validação dos dados obtidos no gráfico visualizado na fig. 5.

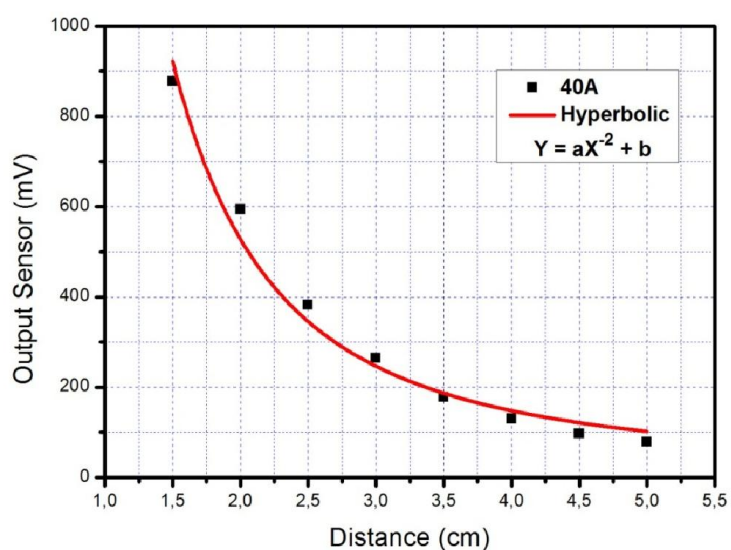


Fig. 6 – Resposta do sensor à variação da distância para corrente fixa de 40A.

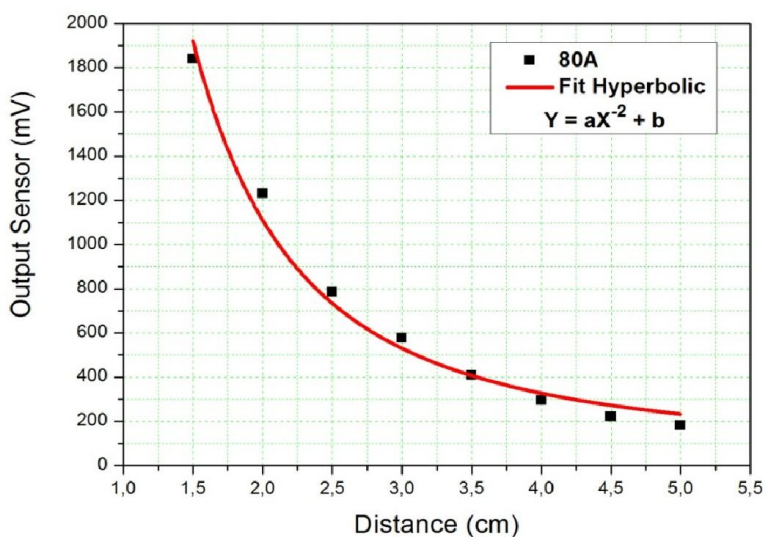


Fig. 7. Resposta do sensor à variação da distância para corrente fixa de 80A.

Na fig. 8, tem-se o perfil temporal obtido pelo sensor a partir da medição do sinal de corrente de 40A a partir da variação da distância D (1.5 cm, 2.5 cm e 4 cm). A fig. 9 representa o perfil temporal apresentado pela medição do sinal de corrente de 80 A quando a distância D varia entre 2.5cm e 5 cm. Observa-se nos dois casos que a amplitude do sinal de saída do sensor diminui quando a distância entre o fio e o sensor aumenta.

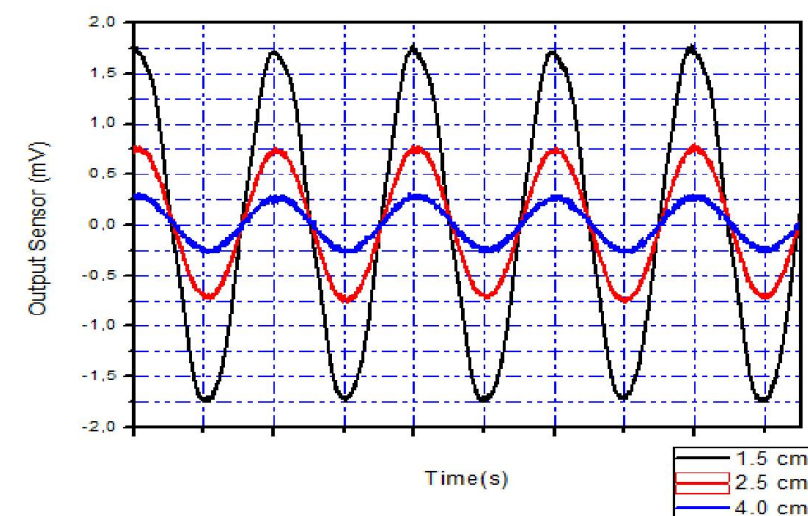


Fig.8. Resposta temporal do sensor à variação da distância entre condutor e sensor para corrente de 40A.

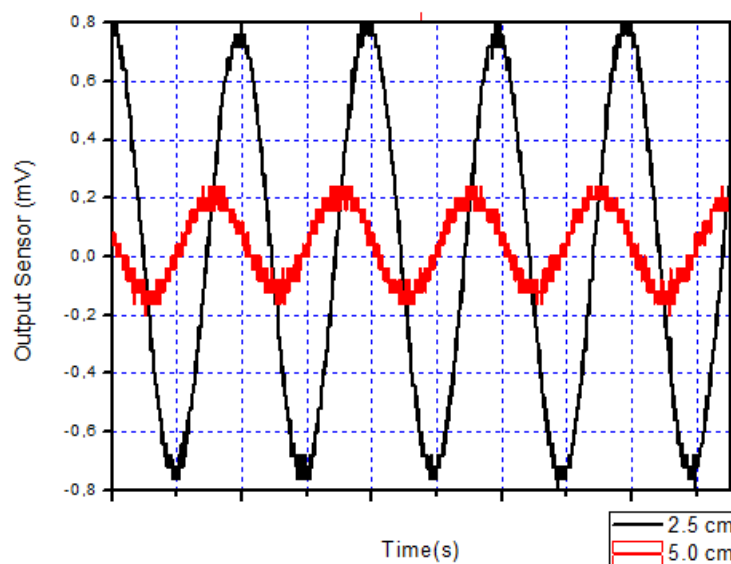


Fig. 9. Resposta temporal do sensor à variação da distância entre condutor e sensor para corrente de 80A.

## V. Conclusões

O sensoriamento baseado no efeito piezoelétrico é obtido pela perturbação gerada pelo campo magnético produzido em torno do fio condutor sobre um ímã instalado na extremidade livre de uma cerâmica piezoelétrica. Esta perturbação sofrida pelo ímã promove uma compressão sobre a placa piezoelétrica e gera uma tensão de saída. Esta tensão é proporcional ao valor da corrente que é medida por um sensor de referência. O sensor mostrou-se eficaz para medição de corrente AC até 110A e apresentou uma

sensibilidade de até 20mV/A. A sensibilidade do sensor varia de forma inversamente proporcional ao quadrado distância entre o sensor e o condutor. A amplitude do sinal de sensoriamento também diminui com o aumento da distância entre o sensor e o fio. Isto indica que o sensor pode ser utilizado para medições de baixas e altas correntes, necessitando apenas diminuir ou aumentar a distância entre o fio e o sensor. Assim, este novo sensor aqui proposto mostra eficiência e eficácia no sensoriamento de corrente elétrica podendo ser utilizado em pequenas e grandes estações fornecedoras de energia e nos consumidores.

### Referências

- [1] B.V. Borges et al. “Sensores Ópticos Integrados e em Fibra” in *Sensores, Tecnologias e Aplicações*. 1st ed., vol. 1, São Paulo, Brazil: EESC/USP, 2005, pp. 1-90.
- [2] G.P. Agrawal, *Aplication of Nolinear Fiber Optics*. New York, USA: Academic Press, 2007, pp. 120-124.
- [3] G. A. Sanders, J. N. Blake, A. H. Rose, F. Rahmatian and C. Herdman, “Commercialization of Fiber-Optic Current and Voltage Sensors at Next Phase”, in Proc. OFS, 2002, pp.31-34,
- [4] D. Buxi, J. Redouté , M. R. Yuce, “Frequency sensing of medical signals using low-voltage piezoelectric sensors”, *Sens. Actuators A: Phys.* Vol. 220, pp. 373–381, Dec. 2014.
- [5] J.L. Prieto, C. Aroca, E. Lopez, M.C. Sanchez, P. Sanchez. “Magnetostrictive-piezoelectric magnetic sensor with current excitation”, *Journal of Magnet. and Magnetic Materials*, vol 215 – 216, pp. 756 -758, 2000.
- [6] G. R. di Marzo. “Aplicação do Método dos Elementos Finitos na Análise de Tensões Induzidas em Cabos Umbilicais”, M.S. Thesis, Dept. de Eng. de Energia e Automação, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 2010.
- [7] A. M. Bastos, J. W. M. Menezes, A. S. B. Sombra, “Hybrid Opto-Mechanical Current Sensor Based on a Mach-Zehnder Fiber Interferometer”, *IEEE Sens. Journ*, vol. 14, pp 1056 -1060, Nov. 2013.



**M. Henrique B. Júnior** nasceu em Fortaleza, Brasil. Ele recebeu o título de bacharel em Engenharia de Telecomunicações do IFCE em 2012. É professor de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará/ Campus Canindé . Faz parte do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações/IFCE.



**Agliberto M. Bastos** was born in Itapagé, Brazil. He received the B.Sc. degree in mathematics and the M.Sc. degree in electrical engineering from the Federal University of Ceará in 1983 and 2004. É professor de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará/ Campus Crato.



**A. Jefferson M. Sales** Possui graduação em Licenciatura Plena em Física (2009) pela Universidade Federal do Ceará e mestrado em Engenharia de Teleinformática (2011) pela Universidade Federal do Ceará. Atualmente é doutorando do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará.



**Alexei A. Kamshilin** received the M.D. degree from Leningrad State University and the Ph.D. degree from the A.F. Ioffe Physical Technical Institute, Leningrad, Russia, in 1974 and 1982, respectively. His academic carrier started in 1974 in Russia, continued in Brazil, from 1990 to 1992, and since 1992, he has been researching and teaching in different universities of Finland. Since 2004, he has been a Professor with the University of Eastern Finland, Kuopio. His research interest includes nonlinear and coherent optics, photorefractive and photogalvanic effects, optical sensors technology, and adaptive interferometry and multi-spectral imaging for biomedical and industrial applications. He has published more than 160 papers in peer-reviewed journals and one monograph.



**A. Sergio B. Sombra** was born in Jaguarauana, Brazil. He received the B.Sc. and M.Sc. degrees in physics from the Federal University of Ceará in 1981 and 1984, respectively, and the Ph.D. degree from the Federal University of Pernambuco in 1990. He is the Head of the Telecommunications and Materials Science and Engineering Laboratory, Physics Department, Federal University of Ceara. His research interest includes research and development in optical fiber and planar devices for optical networks. He is involved in the study of electric, dielectric, and piezoelectric properties of new ceramics and films for microwave and radio-frequency applications.



**J. Wally M. Menezes** born in Baturité-CE, Brazil, in 1970. He received the Ph.D. degree in physics from the Federal University of Ceará(UFC). He is a Professor of telecommunication engineering and the Graduate Program in telecommunications engineering from the Federal Institute of Education Science and Technology, Ceara (IFCE). He was a researcher of LESTE/IFCE, GFAD/IFCE, and LOCEM/UFC. He works with applied physics to telecommunications, electromagnetics and optical devices.