



**UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE MARINGÁ**  
*PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA*

---

**FERNANDO JOSÉ GAIOTTO**

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES  
MAGNETOELÉTRICOS MULTIFUNCIONAIS E SUA  
INTEGRAÇÃO EM DISPOSITIVOS INTELIGENTES:  
DETECÇÃO DE CORRENTES ELÉTRICAS E CAMPOS  
MAGNÉTICOS**

---

Maringá, 15 de dezembro de 2017

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

Fernando José Gaiotto

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES MAGNETOELÉTRICOS  
MULTIFUNCIONAIS E SUA INTEGRAÇÃO EM DISPOSITIVOS INTELIGENTES:  
DETECÇÃO DE CORRENTES ELÉTRICAS E CAMPOS MAGNÉTICOS**

Tese apresentada à Universidade Estadual  
de Maringá, como requisito parcial para a  
obtenção do título de doutor.

**Orientador: Ivair Aparecido dos Santos**

**Coorientador: José Roberto Dias Pereira**

Maringá-PR, 15 de dezembro 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Biblioteca Central - UEM, Maringá, PR, Brasil)

G143d      Gaiotto, Fernando José  
Desenvolvimento de sensores magnetoelétricos multifuncionais e sua integração em dispositivos inteligentes: detecção de correntes elétricas e campos magnéticos / Fernando José Gaiotto. -- Maringá, 2017.  
141 f. : il. color., figs., tabs.  
  
Orientador: Prof. Dr. Ivair Aparecido dos Santos.  
Coorientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Física, 2017.  
  
1. Magnetoelétrico - Efeito. 2. Dispositivo multifuncional. 3. Campo magnético - Sensoriamento. 4. Sensor inteligente de corrente elétrica. I. Santos, Ivair Aparecido dos, orient. II. Pereira, José Roberto Dias, coorient. III. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-Graduação em Física. IV. Título.

CDD 23.ed.530.412

ECSL 1202/9

FERNANDO JOSÉ GAIOTTO

**DESENVOLVIMENTO DE SENSORES MAGNETOELÉTRICOS MULTIFUNCIONAIS E  
SUA INTEGRAÇÃO EM DISPOSITIVOS INTELIGENTES: DETECÇÃO DE CORRENTES  
ELÉTRICAS E CAMPOS MAGNÉTICOS**

Tese apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor.

Aprovado em: Maringá, 15 de dezembro 2017.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Ivair Aparecido dos Santos  
Universidade Estadual de Maringá

---

Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira  
Universidade Estadual de Maringá

---

Prof. Dr. Fábio Ecke Bisogno  
Universidade Federal de Santa Maria

---

Prof. Dr. Diogo Zampieri Montanher  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Guarapuava

---

Prof. Dr. Jurandir Hillmann Rohling  
Universidade Estadual de Maringá

---

Prof. Dr. Maurício Antonio Custódio de Melo  
Universidade Estadual de Maringá

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que me proporcionou caminhos que me levassem a essa realização.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. José R. D. Pereira, pela transmissão de seus conhecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ivair A. dos Santos, pela confiança depositada em mim, e pelo apoio e dedicação para a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Diogo Z. Montanher pela colaboração no processo de automação da técnica de caracterização magnetoelétrica.

Aos Daniel M. Silva, Pablo J. Rosário, Rogério G. Nespolo e Alexandro L. S. Freitas por sua ajuda sempre oportuna.

A todos os integrantes do grupo de Desenvolvimento e Inovação em Dispositivos Multifuncionais pelas discussões e troca de conhecimentos.

À minha esposa, pelo incentivo, motivação e suporte dos afazeres cotidianos.

À minha família, grande incentivadora dos meus estudos.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

“Existe uma coisa que uma longa existência me ensinou: toda a nossa ciência, comparada à realidade, é primitiva e inocente; e, portanto, é o que temos de mais valioso.”

Albert Einstein

## RESUMO

Esta tese está voltada para o desenvolvimento e caracterização de sensores de estado sólido para o monitoramento de campos magnéticos alternados ( $H_{AC}$ ) e/ou contínuos ( $H_{DC}$ ), construídos com materiais piezelétricos e/ou magnetostritivos, e que podem também ser aplicados no monitoramento de correntes elétricas. Os sensores de campo magnético (SCM) foram desenvolvidos e classificados de acordo com o material utilizado, a saber: Piezelétricos e Magnetostritivo/Piezelétrico. Nos SCM Piezelétricos, o princípio de funcionamento é a combinação entre Corrente de Foucault, Força de Lorentz e Efeito Piezelétrico Direto. Para esse grupo de sensores, foram testadas diferentes formas geométricas de material PZT-5A. Já os sensores Magnetostritivo/Piezelétrico (SCM-MP), foram desenvolvidos utilizando dois elementos de material magnetostritivo, Terfenol-D, intercalados por um elemento de material piezelétrico, PZT-5A, de mesma geometria e tamanho. O princípio de funcionamento desse segundo grupo de sensores é o efeito magnetostritivo dos elementos de Terfenol-D e o efeito piezelétrico direto do elemento de PZT-5A. São apresentadas as caracterizações referentes à determinação da resposta ME dos sensores SCM de diferentes geometrias: disco, retangular ou anel; e também, com diferentes modos de polarização: transversal ou longitudinal. Dentre os sensores SCM Piezelétricos, o modelo retangular (SCM-SR3) apresentou o melhor sinal de resposta, um coeficiente de tensão magnetoelétrica ( $\alpha_V^*$ ), de 2,3 mV/A.Oe. O sensor SCM Magnetostritivo/Piezelétrico (SCM-MP) é constituído de um elemento piezelétrico com polarização no modo transversal e dois elementos magnetostritivos com magnetização no modo longitudinal. O sensor SCM-MP faz parte de um grupo seletivo de dispositivos multifuncionais que apresenta efeito magnetoelétrico gigante e alta sensibilidade na presença de campos magnéticos. Essas características implicam em um coeficiente  $\alpha_V^*$  alto (357,14 mV/A.Oe) para campos magnéticos contínuos. Diante dos excelentes resultados obtidos com o sensor SCM-MP, o mesmo foi escolhido para a construção de um sensor protótipo capaz de medir correntes elétricas ( $I_{AC}$ ) e/ou campos magnéticos ( $H_{AC}$ ) alternados em condutores retilíneos, denominado por sensor SCM-MP passivo. Esse é um sensor inteligente, tecnologicamente inovador, pois o desempenho do mesmo independe das características do campo a ser medido. Ele é um sensor passivo e não invasivo, capaz de medir uma larga faixa de correntes elétricas alternadas, da ordem de miliampères

(associado a campos magnéticos de 0,4 Oe) até centenas de ampères, sem compensação eletrônica ou uso de amplificadores de sinal. Desse modo, o sensor SCM-MP passivo pode ser classificado como um dispositivo multifuncional inteligente e robusto, porém, pequeno e leve, que possibilita trabalhar em condições severas, tais como as exigidas na indústria.

**Palavras chave:** Efeito Magnetoelétrico; Dispositivo Multifuncional; Sensoriamento de Campo Magnético; Sensor Inteligente de Corrente Elétrica.

## ABSTRACT

This thesis is focused in the development and characterization of solid-state sensors for monitoring alternating ( $H_{AC}$ ) and/or continuous ( $H_{DC}$ ) magnetic fields, constructed with piezoelectric and magnetostrictive materials, and that can also be applied for monitoring electrical currents. The magnetic field sensors (SCM) were developed and classified according to the used material, as follows: Piezoelectric and Magnetostrictive/Piezoelectric. In the Piezoelectric SCM, the physical operating principle is the combination of Foucault Current, Lorentz Force and Direct Piezoelectric Effect. For this group of sensors, different geometric forms of PZT-5A material were tested. The magnetostrictive/piezoelectric sensors (SCM-MP) were developed using two magnetostrictive elements, Terfenol-D, interspersed by a piezoelectric element, PZT-5A, of the same geometry and size. The principle of operation of this second group of sensors is the magnetostrictive effect of the Terfenol-D elements and the direct piezoelectric effect of the PZT-5A element. Characterizations related to ME response of the SCM sensors of different geometries: disc, rectangular and ring; and different modes of polarization: transverse and longitudinal, are presented. Among the piezoelectric SCM sensors, the rectangular model (SCM-SR3), shows the best ME response, a magnetoelectric voltage coefficient of 2.3 mV/(A.Oe). The Magnetostrictive/Piezoelectric SCM (SCM-MP) are constructed with a piezoelectric element in the transversal polarization mode, and two magnetostrictive elements in the longitudinal magnetization mode. The SCM-MP sensors are part of a select group of multifunctional devices that have a giant magnetoelectric response and an elevated sensitivity to magnetic fields. These characteristics imply a high coefficient  $\alpha_V^*$  (357.14 mV/(A.Oe)), for continuous magnetic fields. In view of the excellent results obtained with the SCM-MP sensor, it was chosen for the construction of a prototype sensor capable of measuring electric currents ( $I_{AC}$ ) and/or magnetic fields ( $H_{AC}$ ) in straight-line conductors, called the passive SCM-MP sensor. This is a smart sensor, technologically innovative, because its performance is independent of the characteristics of the magnetic field to be measured. The SCM-MP sensor is passive and non-invasive, and is also capable of sensing a wide range of alternating electric currents, ranging from milli (associated with magnetic fields of 0.4 Oe) to hundreds of amperes without electronic compensation or the use of signal amplifiers. In this way, the passive SCM-MP sensor can be classified as a Smart multifunctional device, which is robust, small

and light and can work under extreme conditions, such as those required in the industry.

**Keywords:** Magnetoelectric Effect; Multifunctional Device; Magnetic Field Sensing; Smart Current Sensor.

## Lista de Ilustrações

- Figura 1: Faixas de intensidade do campo magnético nos quais os principais tipos de sensores de campo magnético podem ser utilizados. Fonte: Adaptada de [1]. ... 24
- Figura 2: Ilustração e diagramas esquemáticos de sensores de corrente elétrica. (a) Sensor Hall, Circuito Integrado: Ah3144; (b) Sensor Transformador de Corrente Não Invasivo 20 A SCT-013; (c) Sensor de Corrente elétrica AC Bobina de Rogowski Flexível; (d) Sensor de Corrente com Resistor *Shunt* DC 100 A / 75 mV. Adaptada de [5]. ..... 25
- Figura 3: Número de resultados/artigos encontrados no portal periódico capes com o termo de busca “*magnetolectric*” no título [6]. ..... 32
- Figura 4 : Multiferróicos reúnem as propriedades de materiais ferroelétricos e magnéticos. No caso ideal, a magnetização de um material ferromagnético num campo magnético apresenta a histerese habitual (azul), e um material ferroelétrico têm uma resposta similar a um campo elétrico (amarelo). Se conseguirmos criar multiferróicos que são simultaneamente ferromagnéticos e ferroelétricos (verde), então há uma resposta magnética a um campo elétrico, ou, vice-versa, a modificação de polarização pelo campo magnético [34]. (Ilustração: Alan Stonebraker)..... 34
- Figura 5: Comportamento dos domínios magnéticos, sem aplicar campo e aplicando campo magnético. Adaptada da referência [27]. ..... 40
- Figura 6: Orientações cristalográficas em um cristal de Terfenol-D [33]. ..... 41
- Figura 7: Deformação mecânica em função do campo magnetização (H), para o Terfenol-D, sujeito a uma pressão de 6,9 Mpa. Adaptada de Dapino [34]. ..... 42
- Figura 8: Representação estrutural do Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). Fonte: VESTA. .... 44
- Figura 9: (a) Cella neutra; (b) Tensão mecânica aplicada na célula. Adaptado de [36]. .... 44
- Figura 10: Modo de vibração transversal. .... 50
- Figura 11: Vibração em modo de espessura ou comprimento transversal, para um elemento retangular ou disco. .... 50

Figura 12: Modo de vibração na direção do comprimento longitudinal.....	51
Figura 13: Medidor de Precisão LRC, Marca: Agilent, Modelo: E4980A, 20 Hz - 2 MHz. ....	52
Figura 14: Representação de alguns modelos de construção de compósitos laminares monofásicos ME, com diferentes direções de magnetização (M) e polarização (P): (a) interposição transversal-transversal ( $T_m-T_m$ ), (b) interposição longitudinal-transversal ( $L_m-T_P$ ) (c) interposição longitudinal-longitudinal ( $L_m-L_P$ ), (d) interposição duplo piezo com polarização longitudinal oposta e magnetização longitudinal também.....	55
Figura 15: Diagrama esquemático do sensor SMP e sistema de coordenadas cartesianas utilizadas para detectar um campo magnético ( $H_{DC}$ ). As setas M e P denotam as direções de magnetização do Terfenol-D e polarização do elemento piezolétrico, PZT-5A. ....	57
Figura 16: Elementos cerâmicos piezolétricos PZT-5A, polarizados no modo espessura, para diferentes formas e tamanhos. ....	62
Figura 17: Elementos magnetostritivos TERFENOL-D, retangulares magnetizados longitudinalmente. ....	64
Figura 18: Resposta magnetostrictiva em função do campo magnético aplicado sobre uma ampla gama de tensões compressivas. Adaptado de [49]. ....	65
Figura 19: Diagrama em blocos da configuração experimental para medida magnetoelétrica direta. ....	69
Figura 20: Representação do efeito magnetoelétrico extrínseco existente em cerâmicas ferroelétricas em formato de disco com eletrodos depositados em sua superfície. Em temos a representação (a) das direções dos campos magnéticos estático, $H_{DC}$ , e oscilante, $h_{AC}$ , e as correntes de Foucault induzidas ( $i_F$ ) nos eletrodos da cerâmica, enquanto que em (b) a deformação mecânica (D) induzida pela força de Lorentz. Adaptada de Guiffard, et all [51]. ....	70
Figura 21: Representação de um elemento piezolétrico - PZT-5A em forma de disco: 12,2 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura. ....	71

Figura 22: Ilustração do conjunto sensor SD: (a) Imagem das três bobinas ao lado dos três elementos de PZT-5A; (b) Representação do conjunto sensor SCM-SD, bastão-bobina-cerâmica. ....	72
Figura 23: Representação do princípio físico de funcionamento dos sensores retangulares. Deformação gerada por Força de Lorentz produzida (a) pelo fio de cobre e (b) pelas correntes de Foucault.....	74
Figura 24: Representação esquemática do sensor de campo magnético retangular (SCM-SR) com a bobina anexada ao elemento piezelétrico PZT-5A. ....	74
Figura 25: Representação dos modelos de sensores retangulares com elementos piezelétricos PZT-5A, SCM-SR1 – 6.....	75
Figura 26: Representação dos elementos utilizados para a construção dos sensores SCM-SA, com 2, 4 e 6 mm de espessura. ....	76
Figura 27: Representação da construção dos sensores tipo anel com elementos piezelétricos PZT-5A. Um elemento, SCM-SA1, dois elementos, SCM-SA2, e três elementos, SCM-SA3. ....	77
Figura 28: Representação do princípio físico de funcionamento dos sensores anel. Deformação gerada por Força de Lorentz do fio de cobre e pelas correntes de Foucault.....	78
Figura 29: Elementos de Terfenol-D sobrepondo um elemento Piezelétrico, PZT-5A.....	79
Figura 30: Representação da construção do sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico: um elemento piezelétrico PZT-5A entreposto a dois elementos magnetostritivo Terfenol-D. ....	79
Figura 31: Condutância, G, e Susceptância, B, em função da frequência de ressonância de um dos elementos piezelétrico. ....	82
Figura 32: Impedância (Z) em função da frequência, para as bobinas de 20, 30 e 40 espiras. A reta vertical indica a frequência de ressonância de que o sensor irá operar...	83
Figura 33: Intensidade do campo magnético oscilante em função da posição ao longo do eixo de simetria da bobina. Simulação realizada para bobina: 20 espiras - 5,5 mm, 30 espiras - 8,2 mm e 40 espiras - 11 mm.....	84

Figura 34: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para a frequência de ressonância igual a 215 kHz. Material PZT-5A na extremidade à direita da bobina. ....	85
Figura 35: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para a frequência de ressonância igual 215 kHz. Material PZT-5A no centro da bobina. ....	86
Figura 36: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para a frequência de ressonância igual a 215 kHz. Material PZT-5A na extremidade à esquerda da bobina.....	86
Figura 37: (a) Campo magnético oscilante, $h_{AC}$ , em função da corrente elétrica na bobina, ( $i_{AC}$ ); (b) Tensão elétrica em função da corrente elétrica na bobina, ( $i_{AC}$ ), na frequência de ressonância igual a 215 kHz, para o sensores SCM-SD1, 2 e 3..	87
Figura 38: Coeficiente ME ( $\beta$ ) em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ). Tomando $h_{AC}$ para o centro de cada bobina. ....	88
Figura 39: Tensão elétrica (Vs) em função da frequência, para os sensores SCM-SD1, 2, 3 e 4, submetidos a um campo magnético contínuo de 1 kOe.....	91
Figura 40: Condutância elétrica (G) em função da frequência para um elemento piezelétrico PZT-5A de geometria retangular, com e sem bobina enrolada no elemento.....	91
Figura 41: Tensão elétrica em função do campo magnético, para os sensores SCM-SR4 – bobina justaposta e SCM-SR6 – bobina livre. Corrente elétrica ( $i_{AC}$ ) constante de 100 mA e $f_{ME} = 34$ kHz.....	93
Figura 42: Diferença de potência elétrico em função do campo, para os sensores SCM-SR4 – 0,8 mm de espessura e SCM-SR5 – 1,6 mm de espessura. Corrente elétrica ( $i_{AC}$ ) de 100 mA e $f_{ME} \cong 34$ kHz. ....	94
Figura 43: Tensão elétrica em função do campo, para os sensores de diferentes comprimentos, SCM- SR1 – 10 mm, SCM-SR2 – 12,5 mm, SCM-SR3 – 15 mm e SCM-SR4 – 20 mm. Corrente elétrica ( $i_{AC}$ ) de 100 mA e $f_{ME} \cong 34$ kHz. ....	95
Figura 44: Coeficiente ME $\beta$ em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ). Tomando $h_{AC}$ para o centro de cada bobina. ....	96
Figura 45: Coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V^*$ ) de cada sensor em função do comprimento (cm) do elemento piezelétrico. ....	97

Figura 46: Elementos cerâmicos piezelétrico PZT5-A tipo anel, de espessuras, 2 mm, 4 mm e 6 mm, respectivamente.....	98
Figura 47: Tensão elétrica em função da frequência, para os três sensores tipo anel, em meio a um campo $h_{DC}$ de 1 kOe, para os sensores SCM-SA1, 2 e 3. ....	100
Figura 48: Condutância (G) em função da frequência para um elemento piezelétrico PZT-5A tipo anel com e sem bobina enrolada em seu contorno. ....	100
Figura 49: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para os três sensores sem tensão de offset. O gráfico inserido ilustra a resposta de $V_s$ direto do sensor, para os sensores SCM-SA1, 2 e 3.....	101
Figura 50: Coeficiente ME $\beta$ , para um campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ) em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ). ....	102
Figura 51: Representação do sensor magnetoelétrico/piezelétrico (Terfenol-D/PZT/Terfenol D), com magnetização longitudinal ( $L_m$ ) e polarização transversal ( $T_p$ ), i.e., a configuração $L_m$ - $T_p$ - $L_m$ .....	103
Figura 52: Tensão elétrica mV em função do campo magnético $H_{DC}$ (0 a 3 kOe e 0 Oe novamente), para uma frequência $f_{ME}$ de 101,9 kHz e $i_{AC}$ de 1,5 mA.....	104
Figura 53: No gráfico (a): Tensão elétrica em função da frequência. No gráfico (b): Fase em função da frequência. Ambos os gráficos são para diferentes intensidades de $H_{DC}$ : 100 Oe, 200 Oe, 300 Oe, 500 Oe e 1000 Oe.....	105
Figura 54: Tensão elétrica e Fase em função da frequência magnetoelétrica $f_{ME}$ , pontualmente na máxima resposta ME, para campo $H_{DC}$ específicos: 100 Oe, 200 Oe, 300 Oe, 500 Oe, 1 kOe .....	106
Figura 55: Impedância em função da frequência, para o sensor SCM-MP, em meio a diferentes intensidades de campo magnético $H_{DC}$ . ....	107
Figura 56: Tensão elétrica em função do campo magnético $H_{DC}$ . As setas verticais indicam o primeiro pico de máxima resposta ME nas frequências $f_{ME}$ : (a) 101,1 kHz; (b) 101,9 kHz; (c) 106, 2kHz e (d) 113,5 kHz. ....	108
Figura 57: Tensão elétrica em função do campo magnético $H_{DC}$ , para $H_{DC}$ de Referência igual a 100 Oe, 200 Oe, 1 kOe e 2 kOe. ....	109

Figura 58: Coeficiente ME $\alpha_V^*$ em função do campo magnético de referência. ....	110
Figura 59: Disposição esquemática das partes do sensor SCM-MP passivo.....	114
Figura 60: Disposição esquemática das partes do sensor SCM-MP passivo, vista lateral. .....	116
Figura 61: Disposição esquemática das partes do sensor SCM-MP passivo em perspectiva, dentro da caixa metálica aberta.....	118
Figura 62: Disposição da montagem real do sensor SCM-MP passivo entre os ímãs de NdFeB e a respectiva conexão de saída ( $V_s$ ). ....	119
Figura 63: (a) Distribuição do sensor SCM-MP passivo dentro da caixa metálica e (b) sensor finalizado com o cabo coaxial para comunicação remota. ....	119
Figura 64: Diagrama experimental da montagem utilizada para caracterização de dois sensores SCM-MP passivos (um aberto e outro fechado), com blindagem metálica. ....	120
Figura 65: Disposição dos equipamentos utilizados para caracterização de dois sensores SCM-MP passivos (um aberto e outro fechado) com blindagem metálica. ....	120
Figura 66: Sinal resposta do sensor SCM-MP passivo sem blindagem, canal 1 (amarelo) e com blindagem, canal 2 (azul), para uma corrente elétrica alternada igual a zero ( $I_{AC} = 0$ A), i.e., gerador de funções arbitrárias desligado.....	122
Figura 67: Ilustração da influência da energia estática ao manusear ou tocar o sensor SCM- MP passivo. Sensor (a) sem blindagem e (b) com blindagem. ....	122
Figura 68: Tensão elétrica, $V_s$ , em função da frequência, para uma corrente elétrica alternada de 0,5 A. A figura interna ilustra a mesma resposta, porém com o eixo x em escala logarítmica.....	124
Figura 69: Tensão elétrica, $V_s$ , em função da corrente elétrica alternada, para diferentes valores de frequência. ....	124
Figura 70: Tensão elétrica, $V_s$ , em função da corrente elétrica alternada, para diferentes valores de temperatura do sensor SCM-MP. ....	125

Figura 71: Coeficiente de sensibilidade a corrente elétrica alternada em função da frequência, para uma corrente elétrica de 0,5 A, com e sem blindagem. ....	126
Figura 72: Coeficiente de sensibilidade a corrente elétrica alternada em função da temperatura para diferentes valores de corrente elétrica, na frequência de 60 Hz. ....	127
Figura 73: Tensão elétrica e Campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) em função da corrente elétrica alternada, para uma frequência de 60 Hz. ....	128
Figura 74: Medidas de alta corrente elétrica em sistema de indução magnética, utilizando o sensor SCM-MP passivo (círculo pontilhado) e uma ponta indutiva medidora de corrente elétrica – Tektronix (A622). ....	130
Figura 75: Sinal resposta para uma corrente de 200 mA – 104 kHz. Ponta indutiva Tektronix (A622) – canal 1 e sensor SCM-MP passivo – canal 2. ....	131
Figura 76: Tensão elétrica e Campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) em função da corrente elétrica alternada, para uma frequência de 104 kHz em regime de alta corrente. ....	132
Figura 77: Representação esquemática da aplicação inteligente do uso do sensor SCM-MP passivo como sensor de medida de campo magnético ou corrente elétrica alternada. ....	134
Figura 78: Representação da ponta de corrente elétrica alternada, protótipo do sensor SCM-MP passivo. Protegido por um pedido de patente PI. ....	134

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades das cerâmicas piezelétricas, adaptada do fabricante ATCP Engenharia Física LTDA [46].	63
Tabela 2: Propriedades físicas do material Terfenol-D fornecidas por ETREMA, atualmente, TdVib, LLC, Universidade do Estado de Iowa, USA [49].	65
Tabela 3: Diâmetro do elemento piezelétrico, diâmetro da bobina, o diâmetro do fio de cobre, espessura do elemento piezoelétrico, comprimento de cada bobina e o número de espiras da bobina, de cada sensor disco.	71
Tabela 4: Comprimento, largura, espessura, modo de bobina e número de voltas em cada sensor.	75
Tabela 5: Diâmetro externo ( $\varphi_{ext}$ ) e interno ( $\varphi_{int}$ ) do elemento piezelétrico, o diâmetro do fio de cobre ( $\varphi_{fio}$ ), espessura do sensor ( $t_{sensor}$ ), comprimento da bobina ( $L_{bobina}$ ) e o número de espiras da bobina (N), de cada sensor SCM-SA.	77
Tabela 6: Diâmetro do elemento piezelétrico, diâmetro da bobina, o diâmetro do fio de cobre, espessura do elemento piezelétrico, comprimento de cada bobina e o número de espiras da bobina e $h_{AC}$ no centro de cada bobina, de cada sensor disco.	84
Tabela 7: Coeficientes ME $\alpha_V^*$ para os sensores SCM-SD1, 2 e 3.	89
Tabela 8: Comprimento, largura, espessura, modo de bobina e número de voltas em cada sensor.	89
Tabela 9: Diâmetro externo e interno do elemento piezelétrico, o diâmetro do fio de cobre, espessura do elemento piezelétrico, comprimento da bobina e o número de espiras da bobina e campo magnético da bobina ( $h_{AC}$ ), de cada sensor SCM-SA.	99
Tabela 10: Coeficientes ME, $\alpha_V^*$ para os sensores SCM-SA1, 2 e 3.	102
Tabela 11: Relação dos coeficientes ME, $\alpha_V^*$ e a frequência de ressonância magnetoelétrica, $f_{ME}$ , de cada sensor.	112
Tabela 12: Propriedades para os ímãs de NdFeB utilizados [54].	117
Tabela 13: Parâmetros que refletem a figura de mérito do sensor SCM-MP passivo.	133

Tabela 14: Especificações do sensor protótipo magnetoelétrico inteligente para corrente elétrica alternada. ....	135
--	-----

## LISTA DE ABREVIações

**A-ME:** Acoplamento Magnetoelétrico – Relação entre magnetismo e ferroeletricidade existentes em materiais que apresentam ordenamento magnético e ferroelétrico simultaneamente;

**Composto monofásico:** Material contendo apenas uma fase estrutural.

**Compósito granular:** Material que apresenta duas (ou mais) fases estruturais dispostas em forma de grão.

**Compósito laminar:** Material que apresenta duas (ou mais) fases estruturais dispostas em forma de laminas (ou pastilhas).

**E-ME:** Efeito Magnetoelétrico – Propriedade que certos materiais possuem em polarizar-se eletricamente mediante aplicação de campos magnéticos externos, ou vice-versa.

**E-ME-I:** Efeito Magnetoelétrico Intrínseco – Efeito magnetoelétrico decorrente da relação direta (interações quânticas ou estruturais) entre ordenamento magnético e elétrico da matéria.

**E-ME-E:** Efeito Magnetoelétrico Extrínseco – Efeito magnetoelétrico decorrente da relação indireta (mediado por deformação mecânica) entre ordenamento magnético e elétrico da matéria.

**H<sub>AC</sub>:** Módulo do Campo Magnético Alternado.

**H<sub>DC</sub>:** Módulo Campo Magnético Contínuo.

**h<sub>AC</sub>:** Módulo Campo Magnético Alternado produzido por corrente elétrica alternada ( $i_{AC}$ ) na bobina.

**h<sub>DC</sub>:** Módulo Campo Magnético Contínuo produzido por ímã de NdFeB.

$i_{AC}$  = Corrente Elétrica Alternada que circula nas espiras da bobina.

$I_{AC}$  = Corrente Elétrica Alternada no condutor retilíneo que se deseja medir.

$i_F$ : Corrente de Foucault.

**PZT-5A:** Material piezelétrico monofásico formado por  $\text{PbZr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_3 + 1 \text{ wt\% Nb}$ .

**SCM:** Sensor de Campo Magnético;

**SCM-MP:** Sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico para campo magnético contínuo, cujos elementos possuem forma retangular – constituído por um elemento de PZT-5A polarizado no modo transversal (**T**) entreposto a dois elementos de Terfenol-D magnetizado no sentido longitudinal (**L**). Essa combinação gera um compósito laminar, denominado sensor SCM-MP.

**SCM-MP passivo:** Sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico para campo magnético e corrente elétrica, oscilante em fios retilíneos.

**SCM-SA1:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma de Anel – material PZT-5A, de diâmetro externo 8 mm, diâmetro interno 4 mm e 2 mm de espessura.

**SCM-SA2:** Sensor de campo magnético construído com dois elementos Piezelétricos em forma de Anel – material PZT-5A, de diâmetro externo 8 mm, diâmetro interno 4 mm e 4 mm de espessura.

**SCM-SA3:** Sensor de campo magnético construído com três elementos Piezelétricos em forma de Anel – material PZT-5A, de diâmetro externo 8 mm, diâmetro interno 4 mm e 6 mm de espessura.

**SCM-SD1:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma de Disco – material PZT-5A, de 12,5 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura e bobina com 20 espiras, milimetricamente afastada do elemento Piezelétrico.

**SCM-SD:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma de Disco – material PZT-5A, de 12,5 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura e bobina com 30 espiras, milimetricamente afastada do elemento Piezelétrico.

**SCM-SD:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma de Disco – material PZT-5A, de 12,5 mm de diâmetro e 0,5 mm

de espessura e bobina com 40 espiras, milimetricamente afastada do elemento Piezelétrico.

**SCM-SR1:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma Retangular – material PZT-5A, de 10 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 0,8 mm de espessura, com bobina justaposta.

**SCM-SR2:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma Retangular – material PZT-5A, de 12,5 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 0,8 mm de espessura, com bobina justaposta.

**SCM-SR3:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma Retangular – material PZT-5A, de 15 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 0,8 mm de espessura, com bobina justaposta.

**SCM-SR4:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma Retangular – material PZT-5A, de 20 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 0,8 mm de espessura, com bobina justaposta.

**SCM-SR5:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma Retangular – material PZT-5A, de 20 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 1,6 mm de espessura, com bobina justaposta.

**SCM-SR6:** Sensor de campo magnético construído com um único elemento Piezelétrico em forma Retangular – material PZT-5A, de 20 mm de comprimento, 4,5 mm de largura e 0,8 mm de espessura, com bobina milimetricamente afastada do elemento.

**TERFENOL-D:** Material Magnetostritivo Monofásico formado por  $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$ .

# Sumário

## CAPÍTULO 1

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1. MOTIVAÇÃO PARA O TRABALHO .....	23
1.2. OBJETIVOS.....	27
1.2.1 <i>Objetivos Gerais</i> .....	27
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	27
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	28

## CAPÍTULO 2

<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>30</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	30
2.2. MATERIAIS MAGNETOELÉTRICOS .....	34
2.2.1 <i>Materiais com uma fase</i> .....	35
2.2.2 <i>Materiais com mais de uma fase</i> .....	36
2.3. COMPÓSITOS MAGNETOELÉTRICOS.....	37
2.3.1 <i>Compósitos Granulares</i> .....	37
2.3.2 <i>Compósitos Laminares</i> .....	38
2.4. MAGNETOSTRICÇÃO.....	39
2.5. PIEZELETRICIDADE .....	43
2.6. PZT: PROPRIEDADES FÍSICAS, POLARIZAÇÃO E MODOS DE VIBRAÇÃO.....	46
2.7. ACOPLAMENTO MAGNETOELÉTRICO .....	54

## CAPÍTULO 3

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
3.1. MATERIAL PIEZELÉTRICO .....	61
3.2. MATERIAL MAGNETOSTRITIVO.....	63
3.3. CLASSIFICAÇÃO E MÉTODOS EXPERIMENTAIS DOS SENSORES SCM .....	66
3.3.1 <i>Sensor Tipo Disco (SCM-SD)</i> .....	69
3.3.2 <i>Sensor Tipo Retangular (SCM-SR)</i> .....	72
3.3.3 <i>Sensor Tipo Anel (SCM-SA)</i> .....	76
3.3.4 <i>Sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico (SCM-MP)</i> .....	78

## **CAPÍTULO 4**

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>81</b>
4.1. SENSOR TIPO DISCO (SCM-SD) .....	81
4.2. SENSOR TIPO RETANGULAR (SCM-SR) .....	89
4.3. SENSOR TIPO ANEL (SCM-SA) .....	98
4.4. SENSOR MAGNETOELÉTRICO/PIEZELÉTRICO (SCM-MP) .....	103

## **CAPÍTULO 5**

<b>5. APLICAÇÕES INTELIGENTES E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA .....</b>	<b>112</b>
5.1. DESCRIÇÃO E MOTIVAÇÃO DE UTILIZAÇÃO DO SENSOR SCM-MP PARA MEDIÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS AC .....	113
5.2. FABRICAÇÃO E MONTAGEM DO SENSOR SCM-MP PASSIVO PARA CAMPOS MAGNÉTICOS AC .....	115
5.3. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DO SINAL DE RESPOSTA DO SENSOR SCM-MP PASSIVO.....	119
5.4. CARACTERIZAÇÃO DO SINAL RESPOSTA DO SENSOR SCM-MP PASSIVO.....	123
5.5. APLICAÇÃO INTELIGENTE UTILIZANDO O SENSOR SCM-MP PASSIVO PARA MONITORAMENTO DE CORRENTE ELÉTRICA .....	133

## **CAPÍTULO 6**

<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>136</b>
--------------------------	------------

## **CAPÍTULO 7**

<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>138</b>
--	------------

<b>APÊNDICE.....</b>	<b>142</b>
----------------------	------------

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação para o trabalho

Nas últimas décadas a produção de materiais e dispositivos inteligentes tem atraído a atenção de pesquisadores das mais diversas áreas do conhecimento científico e tecnológico aplicado. Denomina-se materiais inteligentes os materiais piezelétricos, eletrostritivos, magnetostritivos e piezomagnéticos. Esses materiais têm importantes propriedades físicas e proporcionam uma vasta gama de aplicações tecnológica, como por exemplo, sensores de vibração, sensoriamento magnético e controle de corrente elétrica em circuitos de potência [1].

Atualmente, existem cinco tipologias de sensores de campo magnético (SCM) que se destacam no mercado: sensores de indução eletromagnética (Bobina), sensores tipo *Fluxgate*, sensores de efeito Magnetoresistivo, dispositivos supercondutores de interferência quântica (SQUID) e sensores de Efeito Hall. Cada um desses SCM possui características específicas e são limitados quanto ao tipo de aplicação prática, tais como: medida de campo magnético contínuo ou alternado, frequência de operação e sensibilidade quanto às medidas de corrente elétrica. A figura1 ilustra as características e faixa de valores que refletem as diversas tipologias para diferentes escalas de aplicação ou interesse de medidas de campo magnético. Os sensores “magnetoelétricos” chamam bastante atenção por possuir uma ampla faixa de sensibilidade ( $10^0$  a  $10^{-12}$  T), tanto para campos magnéticos alternados, quanto campos contínuos [1]. De modo geral, muitas aplicações em eletrônica exigem que a corrente elétrica seja controlada ou monitorada dentro de limites estreitos. Isso ocorre com o controle de rotação dos motores, fontes de alimentação, fontes de LEDs, controles de solenoides, etc. Para essa finalidade, são usados sensores de corrente elétrica que podem apresentar diversas configurações. Sensores Hall e resistores de *Shunt* são os mais usados, porém em regimes de baixa ou alta corrente, esses sensores apresentam um sinal de resposta de baixa intensidade [2, 3, 4].

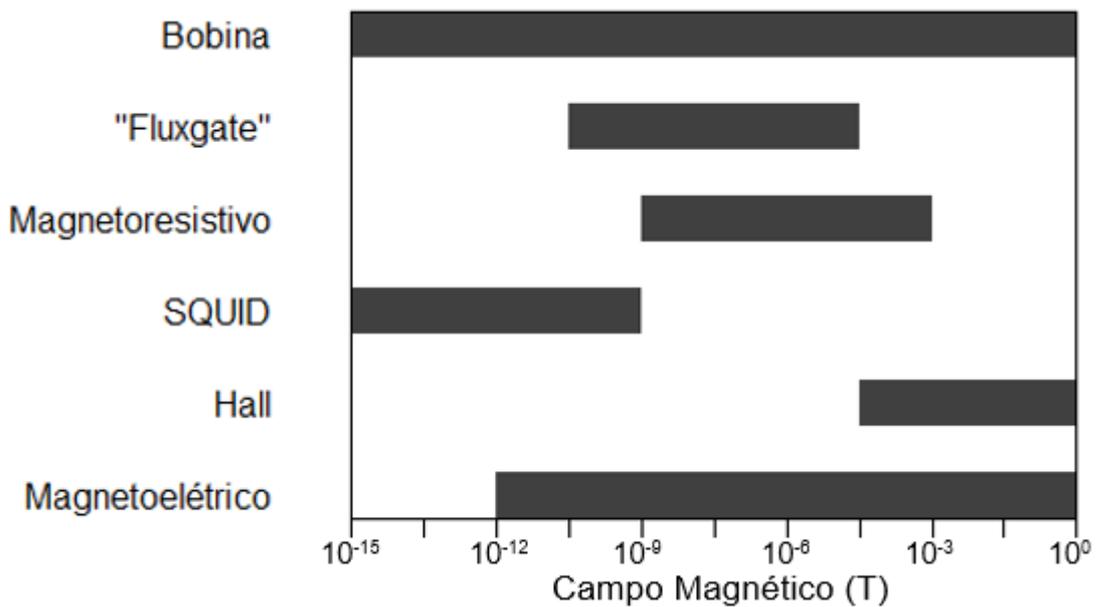


Figura 1: Faixas de intensidade do campo magnético nos quais os principais tipos de sensores de campo magnético podem ser utilizados. Fonte: Adaptada de [1].

Existem basicamente quatro tipos principais de sensores de corrente elétrica que se destacam no mercado [5]: Sensores Hall, Transformadores de Corrente, Bobinas *Rogowski* e Resistores *Shunt*, como ilustrado na figura 2. Assim como os SCM, os sensores de corrente elétrica também são limitados dentro de algumas características, como por exemplo, a faixa de corrente elétrica de detecção ou a frequência de operação e o fato de serem invasivos aos circuitos eletroeletrônicos, como no caso dos Transformadores de Corrente e Resistores *Shunt*. Sensores do tipo bobina ou indutor possuem ampla faixa de operação, mas são bastante invasivos no circuito, pois requerem que a bobina indutora seja enrolada em torno de um fio condutor elétrico.

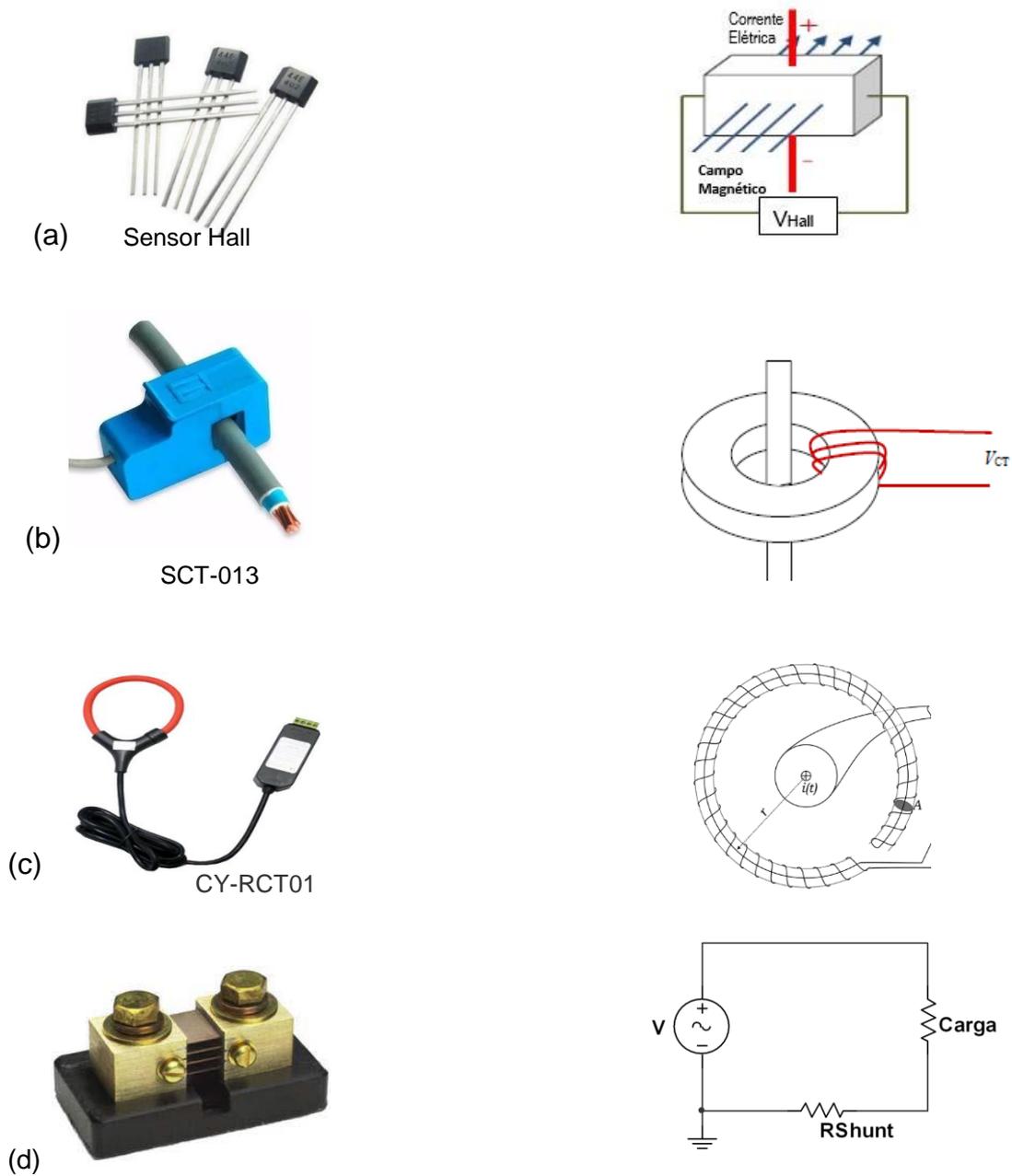


Figura 2: Ilustração e diagramas esquemáticos de sensores de corrente elétrica. (a) Sensor Hall, Circuito Integrado: Ah3144; (b) Sensor Transformador de Corrente Não Invasivo 20 A SCT-013; (c) Sensor de Corrente elétrica AC Bobina de Rogowski Flexível; (d) Sensor de Corrente com Resistor *Shunt* DC 100 A/ 75 mV. Adaptada de [5].

O monitoramento da corrente elétrica em circuitos elétricos aumenta os graus de segurança dos sistemas elétricos na eletrônica de potência, redes de distribuição de energia elétrica, energia nuclear, aeroespacial, energias renováveis e todos os outros sistemas elétricos em que a segurança é levada em consideração. O

monitoramento de segurança em circuitos de alta corrente elétrica pode indicar a entrada em uma região proibida de operação de um circuito elétrico e constitui-se o “cerne” da manutenção preditiva. Por meio de sensores inteligentes de sensoriamento de corrente elétrica, um curto circuito de uma rede elétrica pode ser evitado ou detectado. O monitoramento por sensores eletrônicos inteligentes, capazes de prever ou até evitar tragédias eminentes, podem salvar vidas e reduzir custos financeiros. Integrando sensores de corrente elétrica ou campo magnético, de alta sensibilidade e linearidade, com circuitos microprocessadores inteligentes abrimos as portas para a construção de poderosos sistemas de monitoramento de corrente elétrica de manutenção preditiva. É dentro deste contexto de inovação tecnológica na categoria de SCM magnetoelétrico que esse trabalho se faz presente, tendo como principal objetivo o desenvolvimento de SCM de alta sensibilidade, inteligente, e com flexibilidade para medidas quantitativas da ordem de miliampères até centenas de ampères.

Esse trabalho propõe uma nova categoria de sensores magnetoelétricos multifuncionais, não invasivos, e sensíveis a campos magnéticos contínuo ( $H_{DC}$ ) e alternado ( $H_{AC}$ ), da ordem de 0,4 Oe ( $4 \cdot 10^{-5}T$ ). Além disso, utilizaremos um desses sensores, para medida e monitoramento de corrente elétrica alternada ( $i_{AC}$ ), propondo um protótipo inteligente, tecnologicamente inovador.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1 Objetivos Gerais**

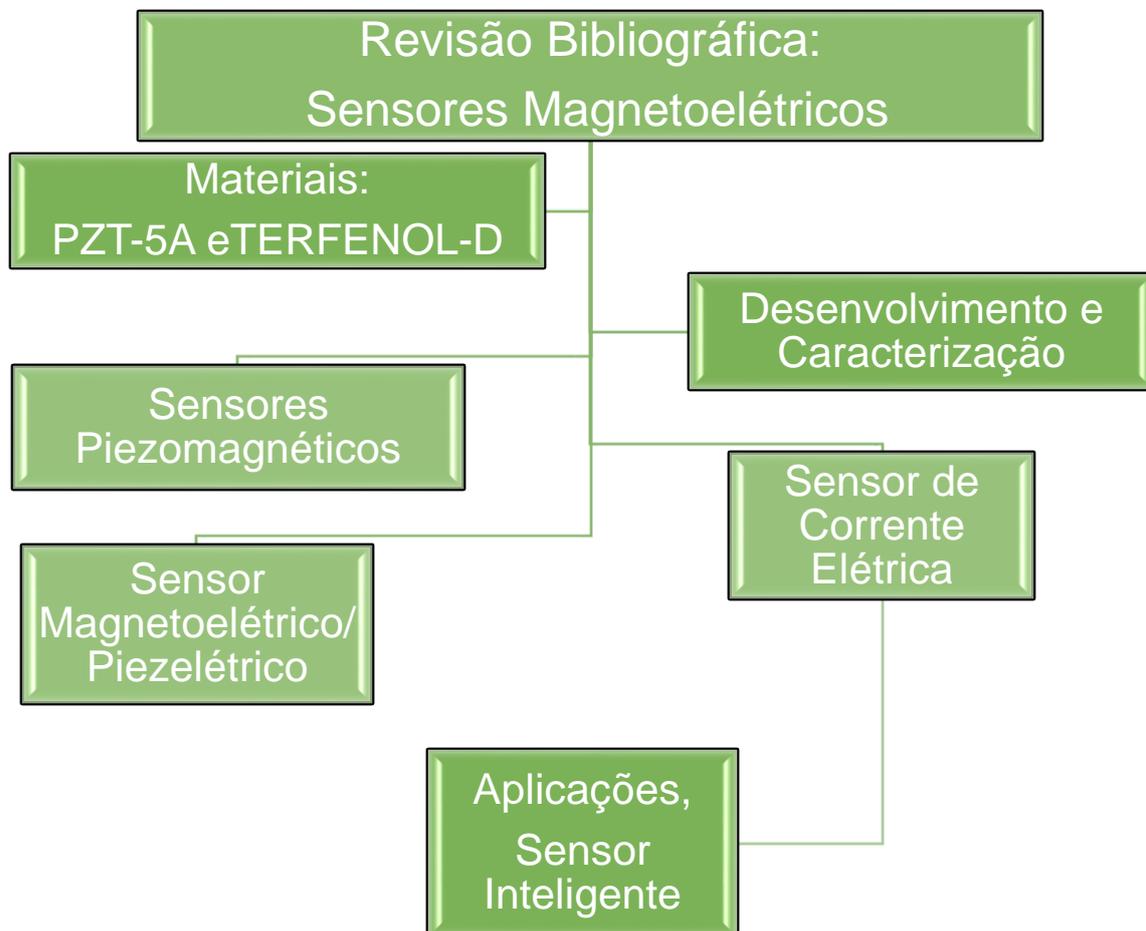
- Desenvolver e caracterizar dispositivos multifuncionais construídos a partir de materiais ferróicos;
- Investigar o comportamento físico de sensores multifuncionais utilizados na caracterização de campos magnéticos estáticos ou oscilantes e correntes elétricas alternadas

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Estudar o mecanismo de funcionamento de sensores multifuncionais de campo magnético confeccionados a partir de elementos piezelétricos únicos ou associados com materiais magnetostritivos;
- Desenvolver diferentes tipos de sensores de campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) e corrente elétrica alternada, utilizando os efeitos da magnetostricção e da piezeletricidade.
- Construir um sensor protótipo inteligente, de forma inovadora, tecnologicamente aplicado ao monitoramento de corrente elétrica alternada em 60 Hz.

### 1.3. Organização do Trabalho

É considerando as potencialidades dos sensores magnetoelétricos em aplicações práticas, que esse trabalho tem como objetivo a investigação e aplicação de materiais piezelétrico e magnetostritivos na construção de sensores de campo magnético (SCM) e sensores de corrente elétrica (SCE) de forma não invasiva ao qual se deseja medir. Para alcançar essas finalidades, algumas etapas foram realizadas, e estão subdivididas nesse trabalho como segue no organograma abaixo.



Primeiramente, iniciaremos com a revisão bibliográfica sobre o efeito magnetoelétrico (E-ME) e os materiais magnetostritivos, apresentada no Capítulo 2. Esse capítulo abordará os principais materiais que possuem boas propriedades físicas para aplicações práticas e materiais com potencialidades de sensoriamento de campo

magnético. Ainda seguindo pelo capítulo 2, iremos apresentar o contexto histórico da magnetoeletricidade, magnetostricção, piezeletricidade, acoplamento magnetoelétrico, respectivamente.

No Capítulo 3, serão apresentados os materiais escolhidos para o desenvolvimento dos sensores de campo magnético e a demonstração esquemática da construção e caracterização de cada sensor SCM proposto nesse trabalho.

No Capítulo 4, serão apresentados os resultados referentes as caracterizações dos diferentes protótipos de sensores SCM, i.e., a resposta da tensão elétrica ( $V_s$ ), coeficiente ME ( $\alpha_V^*$ ) e frequência magnetoelétrica ( $f_{ME}$ ).

No capítulo 5, encontra-se o ápice dessa tese, a apresentação do protótipo de um sensor SCM inteligente para medida de corrente elétrica alternada (AC). Uma aplicação tecnologicamente inovadora para o monitoramento do consumo de energia em rede de distribuição de energia elétrica. Além disso, são apresentados os resultados da sensibilidade a corrente elétrica alternada ( $S_I$ ) e a resposta ME em função da temperatura, possibilitando a descrição da figura de mérito do sensor protótipo.

Por fim, no Capítulo 6, conclusões e as perspectivas futuras desse trabalho são apresentadas e consideradas.

# CAPÍTULO 2

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Introdução

A magnetoelasticidade é o efeito proveniente do acoplamento entre ordens ferroelétrica e magnética e, portanto, esse comportamento é observado exclusivamente em materiais que apresentam histerese (magnética ou ferromagnética). Esse comportamento nos materiais é observado por meio do efeito magnetoelétrico (E-ME). Ainda, podemos dizer que há três modos que levam a esse comportamento: (1) propriedades de soma, (2) propriedades do produto, (3) propriedades de combinação [2, 3, 4]. Nesse trabalho, enfatizaremos os trabalhos que se utilizam da propriedade do produto, ou seja, o campo magnético gerando deformação ou tensão mecânica no material e essa deformação gerando campo elétrico. Quando a deformação ocorre na frequência de ressonância piezoeletrica ou piezomagnética do material, surge um campo elétrico no material piezoeletrico, implicando em uma resposta ME máxima.

A relação entre o campo elétrico que surge no material em função de um campo magnético aplicado nos proporciona um parâmetro que quantifica a resposta ME. Esse parâmetro é denominado coeficiente de campo ME ( $\alpha_E$ ). Por outro lado, se a relação for uma comparação entre o campo magnético, em Oersted, e a tensão elétrica, em Volts, esse coeficiente pode ser reescrito como o coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V$ ). Considerando que o campo elétrico (E) pode ser expresso por:  $E = V/d$ ; como a tensão elétrica (V), em Volts, dependente da distância (d) da camada polarizada do elemento piezoeletrico, em centímetros, a unidade  $\alpha_E$  é dada por [V/(cm.Oe)]. Mas quando a distância não é relevante, alguns autores usam  $\alpha_V$  e a unidade neste caso passa a ser dada somente por [V/Oe] ou ainda, por  $\alpha_V^*$  em [V/(Oe.A) ou V/(T.A)] para caracterizar a resposta ME de sensores de campo magnético contínuo, uma vez que, esses sensores necessitam de uma corrente elétrica para gerar um campo magnético alternado [5].

Será com base nesses coeficientes que iniciaremos essa revisão bibliográfica.

Pierre Curie apresenta a primeira proposta do E-ME em 1894, mas somente em 1926, o termo “magnetoelétrico” passou a ser utilizado. Esse efeito, foi observado pela primeira vez em 1961, nos materiais monofásicos, mais precisamente num monocristal antiferromagnético  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , que apresentou baixo coeficiente  $\alpha_E$  (0,02 V/cm.Oe) e um custo muito alto para ser produzido [1,5].

Em 1974, o E-ME foi observado em compósitos contendo mais de uma fase, conhecidos como compósitos granulares bifásicos, como no caso, o Fe-Co-Ti-Ba-O, nesse caso, o coeficiente  $\alpha_E$  foi de 0,05 V/(cm.Oe), em temperatura ambiente. Além disso, esse compósito, apresentou ruptura dielétrica durante a polarização, dificuldade de controle da conectividade e reação química durante a sinterização, além de apresentar fraco acoplamento mecânico [1,5].

Quase três décadas depois, em 2001, o compósito laminar bifásico (magnetostritivo/piezelétrico), foi apresentado como algo novo, cujo o coeficiente  $\alpha_E$  atingiu 4,68 V/(cm.Oe), sendo de maior facilidade de fabricação e maior confiabilidade, comparado com os trabalhos anteriores. Por outro lado, apresentou alta fragilidade na cerâmica piezelétrica e na liga magnetostritiva e também largura de banda operacional limitada (<20 kHz) e perdas de energia por aquecimento, geradas por corrente de Foucault na liga magnetostritiva [1,5].

Três anos depois, em 2004, surgiram os primeiros compósitos laminares bifásicos, formados por duas lâminas de material magnetostritivo (Terfenol-D) e uma lâmina de material piezelétrico (PZT), intercalados por resina epóxi. Essa combinação apresentou uma largura de banda operacional bem mais ampla que os compósitos bifásicos, i.e., na faixa de 100 kHz, porém baixo coeficiente ME ( $\alpha_E = 2,70$  V/(cm.Oe)) [5].

Em 2006, surgiram os primeiros compósitos de alta permeabilidade, como por exemplo,  $\text{MnZnFe}_2\text{O}_4$ /Terfenol-D/ PZT, no qual apresentou um coeficiente  $\alpha_E$  de 5 V/(cm.Oe), quase duas vezes maior que o resultado citado em 2004. Entretanto, a dificuldade para fabricação do composto  $\text{MnZnFe}_2\text{O}_4$  era extrema e, portanto, não despertou tanto interesse à comunidade científica. Por fim, em 2008, surge um acoplamento mecânico entre Terfenol-D/Metal-PMN-PT, na qual essa combinação não apresentou mudanças significativas no coeficiente  $\alpha_E$ , com relação ao trabalho de 2006, mas reduziu o custo final do processo de fabricação, mesmo apresentando

algumas desvantagem, como por exemplo, as múltiplas frequências de ressonância e a dificuldade na fabricação [1,5].

Analisando a literatura nos últimos 10 anos, verificamos que os estudos têm se concentrado no efeito ME em compósitos magnetostritivo-piezelétrico. Isto pode ser constatado pelo crescente número de trabalhos (artigos) publicados com o tema “*Magnetolectric*” no período de 2010 a 2017. A figura 3 ilustra o gráfico do número de resultados/artigos encontrados no portal de periódicos da CAPES. Note que, no século passado, o grande número de publicações acerca do efeito magnetoelétrico, já apresentava indícios de crescimento, partindo de 30 publicações na década de 60 para 76 publicações na década de 90. Além disso, observa-se que a partir do início do século 2000 houve um crescimento acentuado, de modo que na década atual já existem mais de 2200 artigos publicados. Entretanto, são vários os artigos publicados, porém, ainda são poucos no tocante a aplicações inovadoras, uma vez que, muitos desses materiais poderiam proporcionar diversas inovações na área de sensores de corrente elétrica. Dentro desse contexto de inovação tecnológica, acreditamos que os trabalhos usando estes materiais multifuncionais estão apenas começando.

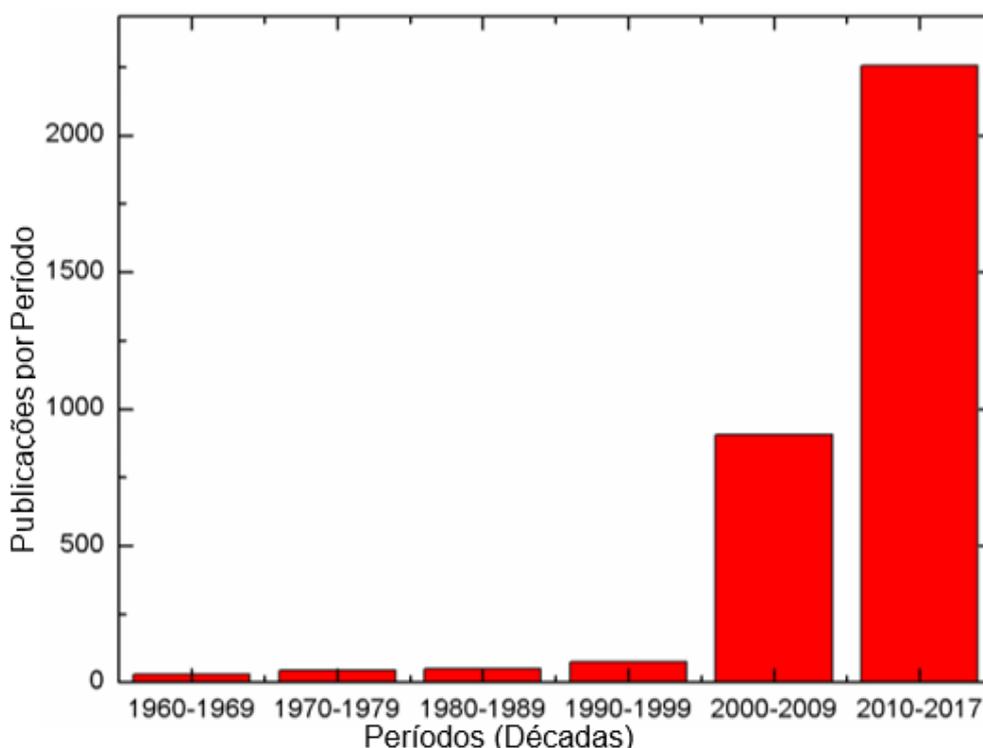


Figura 3: Número de resultados/artigos encontrados no portal periódicos capes com o termo de busca “*magnetolectric*” no título [6].

É importante entendermos que no E-ME, uma tensão elétrica ( $V_s$ ) é gerada nos terminais do material piezelétrico devido a uma tensão mecânica resultante da combinação dos efeitos do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) ou/e um campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ). Em 2009, Y. K. Fetisov e colaboradores [7] discute o efeito piezo (Titanato Zirconato de Chumbo) indutivo em um anel ferroelétrico com eletrodos condutores não magnéticos nas suas superfícies interna e externa quando os mesmos foram submetidos a um campo magnético contínuo. Um ano depois, [8, 9], foi observado um coeficiente de tensão ME, da ordem de 0,2 V/(kOe.A) e posteriormente, em 2011, 16,5 V/(kOe.A), obtido na frequência de ressonância do composto, 153 Hz. Em 2013, pesquisadores, descrevem um sensor magnetoelétrico capaz de medir campos magnéticos AC/DC desenvolvido pela combinação de um material piezelétrica monocristalino, o PMN-PT. Os resultados teóricos e experimentais confirmam uma sensibilidade à campo magnético linear, controlada por corrente elétrica (A), cujo coeficiente de tensão ME é igual a 1,7 V/(T.A) [5].

Essa pequena revisão bibliográfica é suficiente para observarmos que em todos os casos o principal objetivo dos trabalhos reportados foi somente aumentar o efeito magnetoelétrico (E-ME) nos materiais e conseqüentemente melhorar o coeficiente de tensão,  $\alpha_V^*$ . Embora a literatura se reporte a um grande número de publicações relacionadas à magnetoelasticidade, a maioria delas possui uma abordagem fenomenológica relacionada à investigação da estrutura atômica, microestrutura e das propriedades macros e microscópicas, no entanto, poucos são os trabalhos aplicados. O desenvolvimento real de dispositivos práticos e usais destes sistemas na indústria de sensores de corrente elétrica ainda são poucos. Nesse sentido, esperamos estar contribuindo com novos trabalhos apresentando novas otimizações de geometrias e configurações desses sensores e assim, gerar inovação tecnológica tanto na área de SCM, como na área de SCE. O desenvolvimento detalhado dos sensores SCM e a descrição dos materiais utilizados em sua construção será apresentado no Capítulo 3.

Na próxima seção após a revisão de alguns tópicos relevantes podemos observar com mais clareza os pontos para entendimento dos Materiais Magnetoelétricos, dos Compósitos Magnetoelétricos, da Magnetostricção e da Piezeletricidade.

## 2.2. Materiais Magnetoelétricos

Materiais magnetoelétricos são aqueles que possuem respostas cruzadas: campo elétrico ( $\vec{E}$ ) gera magnetização ( $\vec{M}$ ), campo magnético ( $\vec{H}$ ) gera polarização ( $\vec{P}$ ). Esses fenômenos coexistem, mesmo na ausência de campos externos [10]. Segundo Schmid [11], esses materiais também podem ser chamados de multiferróicos, como esquematizado na figura 4. Atualmente, entende-se que multiferróicos são materiais que apresentam coexistência de magnetismo e ferroeletricidade. Os Boracites ( $\text{Mg}_3\text{B}_7\text{O}_{13}\text{Cl}$ ) foram os primeiros materiais multiferróicos a serem estudados [12], e logo após vários outros materiais encontrados na natureza, ou sinterizados artificialmente [13] também passaram a ser classificados como multiferróicos.

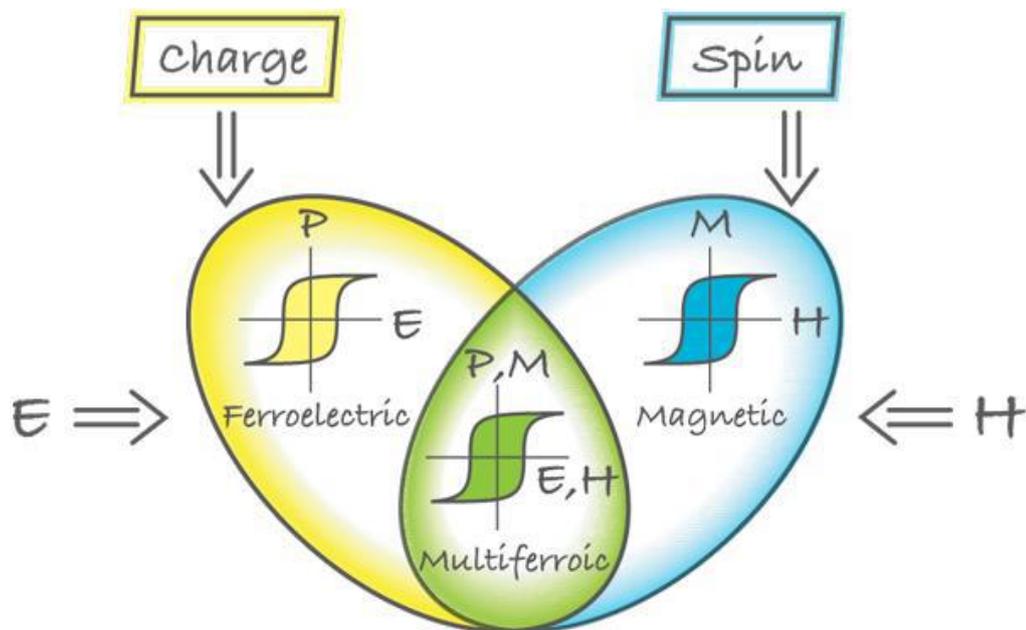


Figura 4 : Multiferróicos reúnem as propriedades de materiais ferroelétricos e magnéticos. No caso ideal, a magnetização de um material ferromagnético num campo magnético apresenta a histerese habitual (azul), e um material ferroelétrico têm uma resposta similar a um campo elétrico (amarelo). Se conseguirmos criar multiferróicos que são simultaneamente ferromagnéticos e ferroelétricos (verde), então há uma resposta magnética a um campo elétrico, ou, vice-versa, a modificação de polarização pelo campo magnético [33]. (Ilustração: Alan Stonebraker).

## 2.2.1 Materiais com uma fase

Segundo a literatura, os primeiros materiais magnetoelétrico (ME) descobertos apresentaram uma ordem antiferromagnética e ferroelétrica na mesma fase. Em 1961, D.N. Astrov observou a dependência de temperatura no efeito ME em uma amostra antiferromagnética monocristalina de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , na qual percebeu que esse efeito desaparecia em temperaturas acima de  $-173^\circ\text{C}$  ( $T_N$  – temperatura de Néel) [14]. Nesse mesmo ano, Folen et al. Alcançaram, por meio de pesquisa, um coeficiente  $\alpha_E$  de 20  $\text{mV}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$ , utilizando um cristal de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [15]. Dois anos mais tarde, Foner e Hanabusa relataram o efeito ME em um mono cristais de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  e  $(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{0,8}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,2}$  e mostraram sua existência à temperatura  $-13^\circ\text{C}$  em  $(\text{Cr}_2\text{O}_3)_{0,8}(\text{Al}_2\text{O}_3)_{0,2}$  [15], no mesmo ano que Shtrikman e Terves demonstraram experimentalmente e teoricamente que os pôs poli cristalinos  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  também possuíam efeito ME quando colocado em um campo elétrico ou em um ambiente de campo magnético [16]. No entanto, esses dois últimos autores relataram um efeito ME bastante fraco, cujo o coeficiente  $\alpha_E$  foi de 20  $\text{mV}/(\text{cm}\cdot\text{Oe})$ , sendo considerado inaplicável para usos industriais. No mesmo ano (1963), Alshin e Astrov investigaram  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  [17], enquanto Rado explorou  $\text{GaFeO}_3$  em 1964 [18]. Já em 1969, Hornreich forneceu uma lista de um grupo seletivo de materiais com potencialidades para apresentar um bom coeficiente magnetoelétrico. São eles:  $\text{DyAlO}_3$ ,  $\text{GdAlO}_3$ ,  $\text{TbCoO}_3$ ,  $\text{DyFeO}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{TeO}_6$ ,  $\text{Cr}_2\text{TeO}_6$ ,  $\text{FeCrWO}_6$ ,  $\text{Cr}_2\text{WO}_6$ ,  $\text{V}_2\text{WO}_6$ ,  $\text{FeSb}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Ca}_2\text{FeAlO}_5$ ,  $\text{Eu}_3\text{O}_4$  e  $\beta\text{-FeNaO}_2$  [17]. Contudo, o efeito ME observado nesses materiais, foram ainda fracos e ainda sob uma  $T_N$  muito baixa.

Em 1970, surgiu o  $\text{BiFeO}_3$ , sendo considerado o material ferroelétrico que apresentava o efeito magnetoelétrico (E-ME) mais importante até então. O mesmo, foi muito estudado por causa de suas temperaturas de transição antiferromagnética e ferroelétrica excepcionalmente elevadas ( $T_N \approx 643 \text{ K}$  e  $T_C \approx 1103 \text{ K}$ ), bem acima da temperatura ambiente [19]. Esses estudos deram origem a uma esperança de desenvolvimento deste material para diferentes dispositivos práticos, com base no acoplamento ME intrínseco em temperatura ambiente. Como resultado direto, o  $\text{BiFeO}_3$  recebeu mais atenção investigativa ao longo das últimas décadas. Os esforços de investigação realizados nos últimos anos conduziram a resultados encorajadores para esse material na forma isolada ou combinada com outros [19]. Em 2004, foi

reportado que devido a altas temperaturas de transição antiferromagnéticas ( $T_N$ ) podemos observar um percentual de 42 a 60% de anomalias dielétricas em  $YMnO_3$  e  $HoMnO_3$ . No caso da Manganita de Ítrio ( $YMnO_3$ ), foram encontradas paredes de domínio antiferromagnético e ferroelétrico, conduzindo esse estudo para novas condições de abordagem de comutação do E-ME [19].

### **2.2.2 Materiais com mais de uma fase (compositos)**

Nos materiais compósitos magnetoelétricos pode há três “caminhos” ou propriedades que levam até o Efeito Magnetoelétrico (E-ME), são eles: soma, combinação e produto. Nesse caso, o E-ME é dado pela "a propriedade do produto" ou "efeito do produto" entre as fases constituintes. Por exemplo, o E-ME em um material bifásico, magnetostritivo-piezelétrico, é dado pelo produto do efeito magnetostritivo na fase do material magnetostritivo e o efeito piezelétrico na fase do material piezelétrico, por meio da mediação mecânica entre as duas fases no material [20]. Podemos dizer que, um campo magnético aplicado a uma fase do material magnetostritivo, produz uma deformação mecânica nessa fase devido ao efeito magnetostritivo. Essas deformações elásticas são transferidas por meio da ligação mecânica à fase do material piezelétrico, resultando em tensões mecânicas. Por sua vez, essas tensões mecânicas, geram na fase do material piezelétrico uma diferença de potencial (tensão elétrica), cuja amplitude é dependente da frequência dessa tensão mecânica. Esse tipo de E-ME, que é fisicamente diferente do efeito ME "intrínseco" relatado em materiais monofásicos na secção anterior, portanto, é geralmente denominado como o E-ME "extrínseco", definido da seguinte forma:

$$E_{ME \text{ Extrínseco}} = \frac{\text{Saída Elétrica}}{\text{Entrada Mecânica}} = \underbrace{\frac{\text{Saída Mecânica}}{\text{Entrada Magnética}}}_{\text{Efeito Magnetostritivo}} \times \underbrace{\frac{\text{Saída Elétrica}}{\text{Entrada Mecânica}}}_{\text{Efeito Piezelétrico}}$$

## 2.3. Compósitos Magnetoelétricos

Os compósitos podem ser divididos em dois tipos: granulares ou laminares. Os compósitos granulares são produzidos por meio da sinterização de grãos de materiais com fase magnética e elétricas em um único elemento. Já os compósitos laminares, são formados por camadas de materiais magnetostritivos e piezelétricos, acoplados entre si mecanicamente de forma entreposta.

### 2.3.1 Compósitos Granulares

Os estudos e a exploração de compósitos granulares começaram em 1948, quando B. D. Tellegen tentou sinterizar compósitos granulares com o efeito ME extrínseco, combinando dois tipos de partículas macroscópicas com momentos dipolares elétricos e magnéticos. Embora a ideia original fosse falha, a mesma possibilitou uma nova abordagem para preparar novas classes de materiais ME na forma de compósitos com mais de uma fase.

Em 1974, Boomgaard et al., prepararam um sistema químico Fe-Co-Ti-Ba-O usando a técnica de solidificação unidirecional [21,22] e então, obteve um grande  $\alpha_E$ , de 50 mV/(cm.Oe) em temperatura ambiente numa composição com excesso de TiO<sub>2</sub> de 1,5wt%. Posteriormente, em 1976, foi encontrado um coeficiente  $\alpha_E$  de 130 mV/(cm.Oe) em uma composição de CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/BaTiO<sub>3</sub> preparada por uma técnica de solidificação unidirecional modificada [23]. Esse valor é cerca de 7 vezes maior que o coeficiente ME do material monofásico Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\alpha_E \sim 20$  mV/(cm.Oe)). Em outro trabalho de Boomgaard et al., também de 1976, foi relatado um coeficiente  $\alpha_E$  de 25 mV/(cm.Oe) em compósitos sinterizados de NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/BaTiO<sub>3</sub> dopados com Co e Mn [24]. Dois anos mais tarde (1978), eles conseguiram obter um  $\alpha_E$  maior ainda, 80 mV/(cm.Oe), em compósitos sinterizados de Ni(Co, Mn)Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/BaTiO<sub>3</sub> [25]. Esses compósitos pertenciam ao mesmo sistema que o seu trabalho anterior, porém, agora com excesso de TiO<sub>2</sub>.

Os cientistas do grupo de Newnham's e também da Rússia prepararam compósitos granulares a base de Ferritas, BaTiO<sub>3</sub> e PZT por processo de sinterização

convencional no início da década de 1990 [26]. Em 2001, Patankar realizou experimentos detalhados em vários compósitos do tipo Ferrita/Titanato dopados, tais como,  $\text{CuFe}_{1,8}\text{Cr}_{0,2}\text{O}_4/\text{Ba}_{0,8}\text{Pb}_{0,2}\text{TiO}_3$  [26].

De modo geral, podemos perceber que os pesquisadores citados até então, têm persistido no estudo de compósitos granulares por 25 anos, aplicando diferentes métodos de sinterização, mudando os tamanhos de partículas e frações de volume, para melhorar o coeficiente ME desses compósitos. No entanto, os valores para o coeficiente  $\alpha_E$  são menores que 100 mV/(cm.Oe). Nesse período, eles observaram e reportaram vários problemas: (1) dificuldade em controlar a formação da fase constituinte; (2) reação química entre fases durante o processo de sinterização; (3) ruptura dielétrica por meio da fase magnetostrictiva devido à baixa resistividade durante polarização da fase piezométrica; e (4) acoplamento mecânico fraco entre as fases devido a defeitos mecânicos induzidos pelo processamento, tais como poros, rachaduras, etc. Todos esses problemas tendem a reduzir o efeito ME e limitam as aplicações práticas.

### **2.3.2 Compósitos Laminares**

Investigações apontam que os primeiros trabalhos utilizando compósitos laminares datam do ano 2000. A fabricação de compósitos laminares mostrou-se de menor complexidade que os compósitos granulares. Os compósitos laminares consistem em uma combinação de fases, como por exemplo, um material magnetostrictivo e um piezométrico dispostos ao longo das direções desejadas, acoplados entre si mecanicamente. Existem dois tipos principais de compósitos laminares: compósitos laminares bifásicos e compósitos laminares trifásicos. Seus coeficientes, agora  $\alpha_V$ , são da ordem de 30-1600 mV/Oe, e são bem superiores quando comparado os compósitos a granulares (10 mV/Oe máximo). Os compósitos laminares bifásicos e trifásicos são feitos de mais de uma camada de material magnetostrictivo ligadas com uma ou mais camadas de material piezométrico e diferentes disposições das direções de magnetização ( $\vec{M}$ ) e polarização ( $\vec{P}$ ). Quando esses compósitos se encontram em meio a um campo magnético, surge no material uma polarização direcional devido ao campo elétrico, ou vice-versa, por um processo

de deformação mecânica, i.e., um campo magnético externo deforma mecanicamente a fase magnetostriativa, e tal deformação é transferida para a fase piezelétrica que, por sua vez, converte a deformação mecânica em polarização elétrica [1]. Detalharemos os tipos de compósitos magnetoelétricos laminares no tópico sobre acoplamento magnetoelétrico.

## 2.4. Magnetostricção

A magnetostricção pode ser entendida como a deformação reversível de um material na presença um campo magnético aplicado e tendo efeito recíproco de alteração de suas propriedades magnéticas, tais como a susceptibilidade e magnetização, com a aplicação de uma tensão mecânica. Trata-se ainda de uma propriedade intrínseca e invariável do material. Tal fenômeno foi descoberto por James Prescott Joule em 1842, quando observou que na presença de um campo magnético na direção do eixo de uma barra de ferro, essa sentia uma deformação mecânica ao logo do seu comprimento [27], conforme figura 5. Do ponto de vista fenomenológico, há de fato dois principais tipos de magnetostricção a considerar: a magnetostricção espontânea originada do ordenamento espontâneo dos momentos magnéticos dentro dos domínios na temperatura de Curie e a magnetostricção induzida por campo magnético, originada da reorientação dos momentos magnéticos devido à ação de um campo magnético [28]. Em ambos os casos, a magnetostricção ( $\lambda$ ) é definida como [29]:

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

sendo  $\Delta L$  a variação linear do comprimento da amostra e  $L$  o comprimento inicial, note que  $\lambda$  será adimensional.

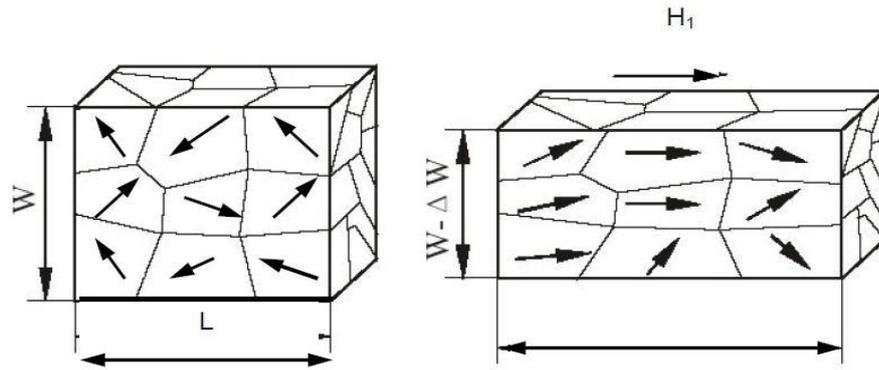


Figura 5: Comportamento dos domínios magnéticos, sem aplicar campo e aplicando campo magnético. Sendo o comprimento dada por L e largura dada por W, logo,  $\Delta W$  representa a variação da largura. Adaptada da referência [27 e 30].

Já o efeito inverso, i.e., diante de uma deformação do material, se induz um campo magnético é conhecido como efeito Villari [31]. Outro efeito relacionado é o efeito Wiedemann [32], que acarreta uma torção no material ocasionada por um campo magnético helicoidal, ocorrendo também o efeito inverso, chamado efeito Matteucci [31]. A origem microscópica da magnetostricção está relacionada ao acoplamento spin-órbita, ou seja, entre os spins eletrônicos e o movimento orbital dos elétrons em torno dos núcleos atômicos. A energia dos estados eletrônicos em regiões onde há momento magnético é menor do que aquela que é verificada nos orbitais atômicos de mesma espécie na ausência do campo magnético. Por conta desta diferença de energia os spins eletrônicos se alinham ao campo, modificando os orbitais atômicos e conseqüentemente, alterando a distância inter-atômica do material sujeito ao campo. Macroscopicamente a variação das distâncias inter-atômicas produzem o deslocamento e rotação de domínios magnéticos que, por sua vez, gera a deformação macroscópica nos materiais que chamamos magnetostricção.

Por volta dos anos 70, pesquisadores empenhados em buscar uma resposta de magnetostricção mais alta, obtiveram bons resultados. Um deles foi Clark 1972, que descobriu que materiais contendo terras raras acrescidos de ferro apresentavam grande deformação, chegando a  $10^3$  partes por milhão, sendo três ordens de grandeza maior que a deformação do Níquel, porém, tais resultados só eram alcançados em baixas temperaturas [33]. Com o passar do tempo, novas experiências demonstraram que com a adição principalmente de Samário, Térbio e Disprósio combinados a metais de transição como o Níquel, Cobalto e Ferro apresentaram um aumento na

temperatura de Curie. No estudo dessas ligas, também foram analisadas combinações de Térbio e Ferro (TbFe), Disprósio e Ferro (DyFe), alcançando-se assim uma deformação acima de  $3 \times 10^{-3}$ , ocorrendo em temperaturas mais altas, particularmente no composto TbFe<sub>2</sub>. Verificou-se que o TbFe<sub>2</sub> produzido, apresentava uma elevada anisotropia magnética, fazendo suas propriedades magnéticas dependerem fortemente da direção em que eram medidas. Essa anisotropia foi compensada pela substituição parcial de Térbio por outra terra rara. Esse novo material é Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>, de modo que,  $0,25 < x < 0,3$ . Nesse caso, uma pequena mudança em x pode produzir uma variação na deformação de aproximadamente  $3 \times 10^{-5}$ , para temperaturas iguais. Como se trata de uma combinação dos elementos Térbio, Ferro e Disprósio, portanto seu nome é dado pelas suas iniciais dos elementos juntamente com a iniciais de Laboratório de Naval Ordnance, de onde foi proposto, ou seja, **Ter + Fe + N + O + L + D**, (TerFeNOL-D). O Terfenol-D é um material com magnetostricção gigante, comercialmente sendo o mais vendido e o primeiro material magnetostritivo utilizado como transdutor. Ele tem uma elevada não-linearidade e consegue deformações da ordem de  $1,6 \times 10^{-3}$  para campos magnéticos próximos de 0,2 T (2 kOe) [33]. Segundo Dapino, 1999 [33] a conexão entre a magnetostricção e a magnetização está relacionada a rotações dos momentos magnéticos no plano  $[1 \bar{1} 0]$  de um cristal de Tb<sub>0,3</sub>Dy<sub>0,7</sub>Fe<sub>2</sub> (Terfenol-D), tal como o descrito pela na figura 6. Isto é considerada uma suposição simplificada, uma vez que em materiais reais as rotações ocorrem em todas as três dimensões. Inicialmente, o material está desmagnetizado, de modo que a soma vetorial de todas as magnetizações dos domínios é nula.

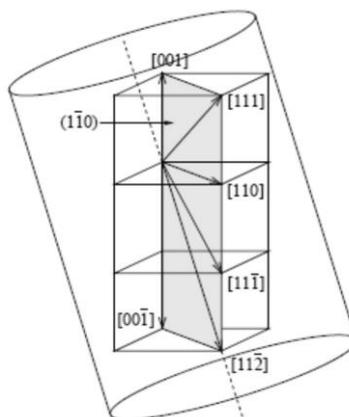


Figura 6: Orientações cristalográficas em um cristal de Terfenol-D. A notação entre colchetes representa os índices em direções particulares, como os lados de um cubo: [100], [010], [001],  $[\bar{1}00]$ ,  $[0\bar{1}0]$  e  $[00\bar{1}]$ , em que  $\bar{1}$  indica -1 [33].

No Terfenol-D ordenamento estatístico dos momentos magnéticos dentro de um domínio é altamente dependente da temperatura e também da magnitude da magnetostricção forçada. Em termos gerais, a magnetostricção forçada é de pouca relevância para aplicações em engenharia, dado o alto valor de campo envolvido em atingi-la. Para baixos valores de magnetização, o ferro é magnetizado apenas pelo movimento de paredes de domínio e a magnetização em cada domínio permanece ao longo das arestas dos cubos da célula CCC. Nesse caso, a maior contribuição para a magnetostricção vem da constante na direção [100]  $\lambda_{100} = 36,2 \cdot 10^{-6}$ , que é positiva. Para uma magnetização 83% maior que a magnetização de saturação, não há mais movimentação das paredes de domínio e nos domínios a magnetização tem que desviar das direções das arestas do cubo [33]. Portanto, haverá contribuição de  $\lambda_{111} = -30,0 \cdot 10^{-6}$  e como consequência a magnetostricção é negativa em altos campos [33].

Na figura 7 podemos ver a curva de deformação mecânica (“*strain*”) em função do campo magnético (H), para o Terfenol-D, sujeito a uma pressão de 6,9MPa. Para níveis baixos de campo magnético a curva é aproximadamente linear.

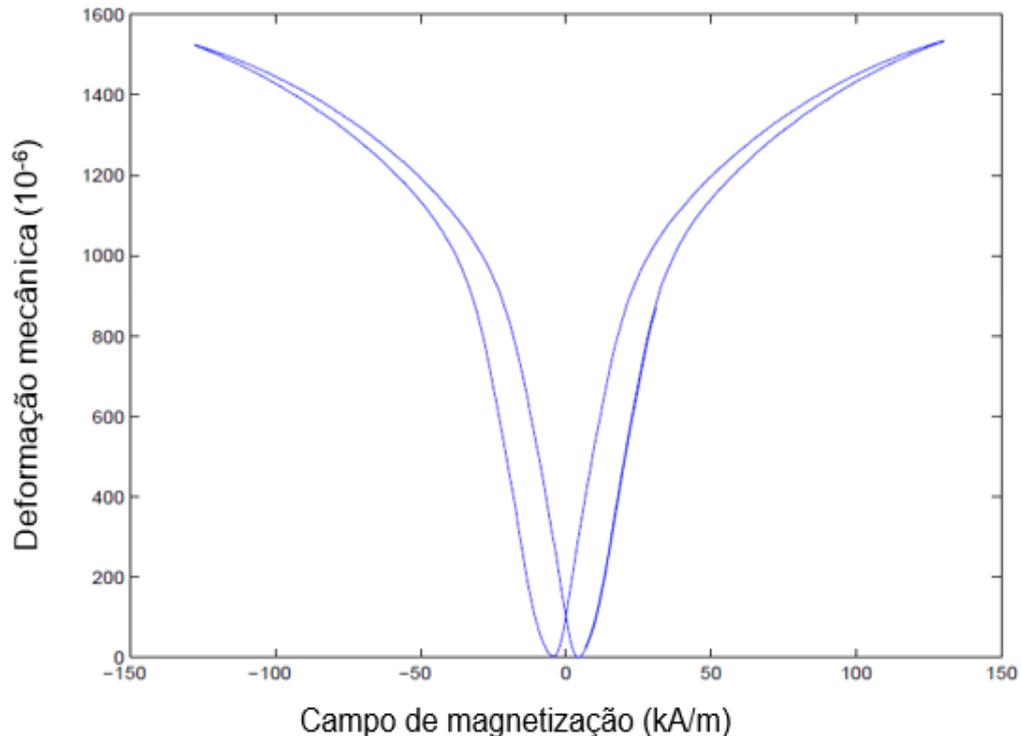


Figura 7: Deformação mecânica em função do campo magnetização (H), para o Terfenol-D, sujeito a uma pressão de 6,9MPa. Adaptada de Dapino [33].

Observa ainda a presença da histerese que pode ser atribuída ao impedimento do movimento irreversível do domínio por sítios de imobilização no Terfenol-D, porém o modelo de histerese e o comportamento não-linear está de acordo com a concepção de materiais magnetostritivos.

Por fim, podemos dizer que os materiais magnetostritivos, em especial o Terfenol-D, podem ser aplicados como sensores magnetoelétricos, agrupados em três grupos, conforme suas propriedades magneto-mecânicas: sensores passivos, sensores ativos e sensores combinados. Os sensores passivos usam o efeito magnetomecânico como o efeito Villari, ao medir parâmetros externos como força, pressão, vibração. Sensores ativos usam a excitação interna do Terfenol-D, “gerada” por uma propriedade externa, a qual se deseja medir, temos como exemplo, a temperatura, que pode ser determinada por uma variação na permeabilidade magnética, que é uma função da temperatura da amostra de Terfenol-D, excitada de uma forma conhecida. Sensores combinados são passivos e ativos simultaneamente, assim utiliza-se o Terfenol-D como um elemento ativo ao mudar outro material que permitirá medir a propriedade de interesse [33].

## **2.5. Piezeletricidade**

O termo “piezo” é derivado do grego e significa pressão. Em 1880, Jacques e Pierre Curie descobriram que um potencial elétrico poderia ser gerado aplicando-se pressão em cristais de quartzo e em sais de Rochelle [34]. Nomearam esse fenômeno de “efeito piezelétrico”. Já a piezeletricidade é o nome dado a propriedade que certos materiais possuem ao apresentarem uma tensão elétrica, quando submetidos a uma tensão mecânica. Esses materiais também exibem um efeito de conversão, ou seja, a ocorrência de deformação mecânica ao serem submetidos a um campo elétrico [35]. Geralmente os cristais são materiais sólidos que se caracterizam por apresentarem uma estrutura organizada, chamada cela unitária, que se repete por todo o material, no entanto, nem todo cristal pode apresentar piezo eletricidade, para isso, é preciso que o cristal não possua um centro de inversão, como no caso do Quartzo, sal de Rochelle, Titanato de Bário, Titanato Zirconato de Chumbo, etc. A figura 8 ilustra a representação estrutural do Titanato Zirconato de Chumbo (PZT).

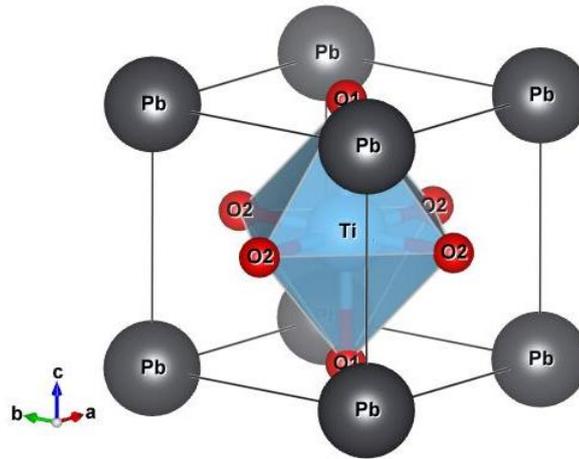


Figura 8: Representação estrutural do Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). Fonte: VESTA<sup>1</sup>.

De maneira simplificada, o efeito da piezeletricidade se caracteriza como uma distorção na estrutura da cela unitária do composto piezelétrico, conforme se observa analisando as figuras 9(a) e 9(b) e, que mostram uma cela unitária do cristal de quartzo sem a aplicação de tensões mecânicas ou campos elétricos e uma tensão mecânica aplicada na cela unitária que sofre uma deformação, respectivamente.

Quando a cela está neutra (sem tensão mecânica), a posição espacial do centro de cargas negativas é a mesma do centro de cargas positivas. Porém, quando aplicamos uma tensão mecânica, a cela unitária sofre uma deformação deslocando a posição do centro de cargas negativas e criando uma diferença de potencial na cela unitária.

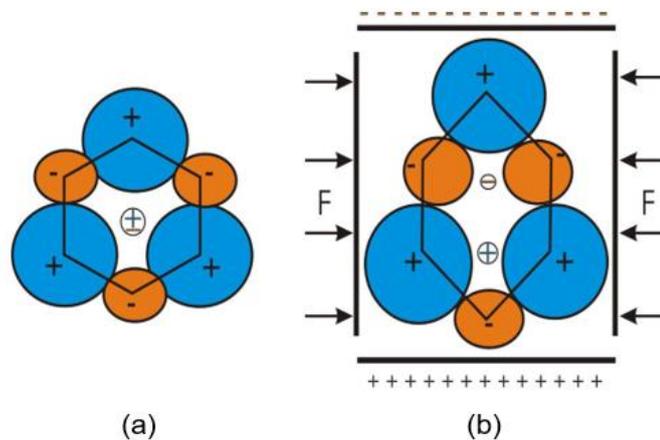


Figura 9: (a) Cella neutra; (b) Tensão mecânica aplicada na célula. Adaptado de [36].

<sup>1</sup> O VESTA é um programa de visualização 3D para modelos estruturais.

Com relação a aplicações comerciais utilizando materiais piezelétricos podemos dizer que esses só passaram a ser utilizados a partir do ano de 1917. Os primeiros dispositivos piezelétricos foram construídos utilizando Quartzo e Turmalina. Alguns anos depois, foram desenvolvidos novos materiais, como o Titanato de Bário, bastante utilizado em capacitores devido ao seu elevado valor de constante dielétrica [37].

Já a piezeletricidade inversa foi deduzida matematicamente dos princípios fundamentais da termodinâmica por Lipmann, em 1881. Pouco tempo depois, os irmãos Curies confirmaram a existência do "efeito piezo inverso" e continuaram os estudos para obter a prova quantitativa da reversibilidade completa das deformações eletro-elasto-mecânicas em cristais piezelétricos. Uma grande aplicação desse efeito, relatada por Paul Langevin, o desenvolvimento de sonares na primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas inventando o transdutor tipo Langevin, para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz's. A utilização da piezeletricidade no sonar, e o sucesso desse projeto, causaram um intenso interesse no desenvolvimento de dispositivos piezelétricos. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo por esses demandarem geradores de alta tensão iniciaram-se o desenvolvimento de materiais piezelétricos sintéticos. Com o passar do tempo, buscou-se o aperfeiçoamento do efeito piezelétrico apresentado por determinadas cerâmicas, o que levou a invenção em 1954 do Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) pelo americano Bernard Jaffe. A cerâmica à base de Titanato Zirconato de chumbo ou mais conhecida como PZT (em abreviação a sua composição por Chumbo (Pb), Zircônia (Zr) e Titânio (Ti)) é empregada como elementos sensores e ou transdutores em aplicações industriais e pode também ser utilizada na construção de capacitores cerâmicos, visto que esse material apresenta alta constante dielétrica.

Podemos dizer que os materiais piezelétricos contribuíram para um grande salto tecnológico, pois houve uma grande necessidade de diminuir o tamanho dos circuitos integrados. O dielétrico a base de PZT foi muito importante nos MMIC (circuito integrado monolítico de micro-ondas) para alcançar uma melhor redução do tamanho e maior permissividade. A estrutura do PZT se assemelha às Perovskitas,

porém é constituído pela adição de dois compostos numa determinada proporção à base de **Ti** e ou **Zr** (isto é  $\text{PbTiO}_3 + \text{PbZrO}_3$ ).

## 2.6. PZT: Propriedades Físicas, Polarização e Modos de Vibração

Para uma compreender e justificar o emprego em grande escala do PZT como um dos principais materiais piezelétricos na construção de atuadores e transdutores iremos agora fazer uma breve revisão sobre os conceitos e propriedades dos materiais piezelétricos. O efeito piezelétrico é descrito por equações tensoriais, mas podem ser escritas de forma simplificada pelas seguintes equações:

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad (2)$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad (3)$$

- Tensão mecânica (T): é a tensão mecânica aplicada por unidade de área.
- Deformação (S): é o estresse ou a deformação mecânica.
- Campo elétrico (E): é a relação entre a tensão aplicada ou gerada à distância entre os eletrodos.
- Deslocamento elétrico (D): é o produto da intensidade do campo elétrico (E) e a permissividade dielétrica à tensão mecânica constante ( $\varepsilon^T$ ).
- Permissividade dielétrica ( $\varepsilon$ ): é o fator de proporcionalidade que relaciona o deslocamento elétrico (D) a um campo elétrico (E), sob uma tensão mecânica constante (T). Esse deslocamento pode ser dado como segue:

$$D = \varepsilon^T \cdot E \quad (4)$$

- Coeficiente de carga piezelétrica (d): é responsável pelas cargas de polarização do material quando submetido a uma força tensora e portanto se relaciona com a pressão mecânica (S) desenvolvida em resposta a um campo elétrico (E). No caso de  $d^T$ , a tensão mecânica é constante (T). Essa deformação mecânica pode ser dado como segue:

$$S = d^T \cdot E \quad (5)$$

- Coeficiente elástico à campo elétrico constante ( $s^E$ ): relaciona a tensão mecânica aplicada (S) devido a um estresse mecânico (T), na presença de um campo elétrico (E) constante. De uma forma geral, é dada como:

$$S = s^E \cdot T \quad (6)$$

Em que,  $s^E$  é o coeficiente elástico à campo elétrico constante. Observação: o inverso desse coeficiente é conhecido como Módulo de Young.

- Coeficiente de acoplamento eletromecânico (k): é definida como a capacidade de um material piezelétrico transformar a energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Também refere-se como a eficiência piezelétrica de cerâmica piezelétrica, sendo dada como;

$$k = \sqrt{\frac{\text{EnergiaElétricaArmazenada}}{\text{EnergiaMecânicadeEntrada}}}$$

ou

(7)

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia Mecânica Armazenada}}{\text{Energia Elétrica Entrada}}}$$

O valor do coeficiente de acoplamento é único para cada modo de vibração, sendo um número menor que a unidade. Ele também pode estar relacionado com os outros coeficientes piezelétricos na seguinte forma:

$$k = \frac{d}{\sqrt{s^E \cdot \varepsilon^T}} \quad (8)$$

- Densidade ( $\rho$ ) : é a relação entre a massa e o volume de um material piezelétrico dado em [kg/m<sup>3</sup>], expresso por:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (9)$$

- Fator de qualidade mecânica (Q): reflete as perdas mecânicas do material sendo fundamental para se determinar a qualidade de resposta por meio do pico de ressonância.
- Coeficiente de tensão elétrica piezelétrico (g): é o coeficiente responsável pela tensão elétrica (voltagem) do material quando submetido a uma força tensora, dada em [mV.m/N]:

$$g = \frac{d}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon^T} \quad (10)$$

Onde  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  [F/m] é a permissividade para o vácuo e  $\varepsilon^T$  é a permissividade relativa.

De modo geral, a aplicação de um campo elétrico com mesma polaridade do campo de polarização da cerâmica provoca um alongamento na direção de polarização e contração em todas as direções perpendiculares ao eixo de polarização.

Em contraste, um campo reverso irá causar contração ao longo do eixo de polarização e expandido na direção transversal. A deformação permanece enquanto um campo for mantido. Do mesmo modo, uma força de compressão aplicada perpendicularmente ao eixo de polarização produz um campo elétrico de polaridade igual ao eixo de polarização. A aplicação de uma força reversa poderá inverter a polaridade do campo elétrico gerado. Porém, há várias exceções que, por sua vez, dependem da geometria da cerâmica ou do modo de vibração principal. O eletrodo positivo da cerâmica é normalmente identificado por uma marca de polaridade usada para indicar polaridade da tensão elétrica positiva, aplicada durante a operação de polarização.

O comportamento multi ressonante de cerâmica piezoeletrica depende de sua forma, orientação de polarização e da direção do campo elétrico aplicado. O padrão de deslocamento dentro de um piezo-dispositivo depende da frequência mecânica. O tipo de padrão de deslocamento ou de flexão é referido como o modo de vibração. O dispositivo piezo pode ter várias formas para alcançar diferentes modos de vibração ou, alternativamente, um modo de vibração necessário ditará a forma básica do ressonador. O modo de vibração usado é determinado pela frequência alvo do ressonador e distribuição de tensão desejada. Temos, hoje, no mercado nacional e internacional, algumas empresas, como por exemplo, ATCP do Brasil e “*Channel Industries*”, respectivamente, que fabricam cerâmicas piezoeletricas de acordo com a necessidade do projetista ou usuário. Para desenvolvimento de equipamentos ou dispositivos utilizando materiais piezoeletricos, é preciso especificar as dimensões de interesse e analisar qual tipo de geometria mais adequada a sua necessidade de aplicação. Para efeito de custo de projeto é sempre melhor adequar o dispositivo dentro das formas de cerâmicas do fabricantes em produção. O desenvolvimento de novas formas ou padrão das diferente do mercados requer grande custo inicial na fabricação de matrizes [37].

No modo de vibração transversal, temos a direção da deformação mecânica,  $\vec{S}$ , é ortogonal à direção de polarização. A Figura 10 ilustra uma forma de placa retangular vibrando neste modo. Sendo  $\vec{P}$  a direção de polarização,  $\vec{E}$  a direção do campo elétrico.

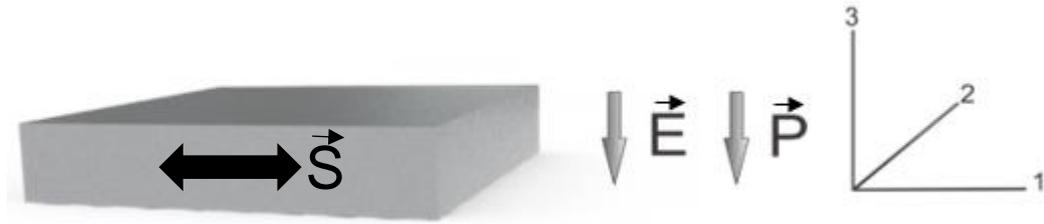


Figura 10: Modo de vibração transversal.

Esse modo se caracteriza por ter a direção de propagação na direção do comprimento da cerâmica muito maior que a largura e a espessura. A frequência de ressonância depende do comprimento. Portanto, um grande comprimento implica em uma frequência de ressonância menor e uma grande área de superfície dos eletrodos implica em uma maior impedância de entrada. Visto que, os fatores de acoplamento eletromecânico com os outros modos são muito pequenos em comparação com a do modo transversal, este modo gera única frequência de ressonância, apresentando muito poucos harmônicos, conferindo grande aproveitamento de energia.

No modo de espessura, a deformação mecânica,  $\vec{S}$ , é orientada ao longo da direção de polarização. A figura 11 ilustra que as formas disco e placa retangular são utilizados nesta modalidade, onde a espessura (comprimento de propagação) é muito menor que o comprimento, largura, ou diâmetro.

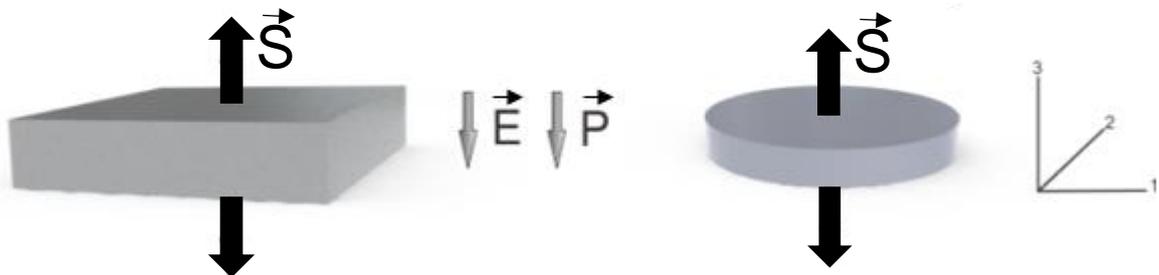


Figura 11: Vibração em modo de espessura ou comprimento transversal, para um elemento retangular ou disco.

A frequência de ressonância depende da espessura do dispositivo, portanto, um dispositivo fino implica em uma unidade de frequência alta e uma pequena superfície de eletrodos implica em uma impedância interna baixa. Isso exibe estrutura de múltiplos pontos de ressonância, assim como por exemplo os fatores de acoplamento eletromecânico associado a outros modos de transporte também presentes.

No modo de comprimento, a cerâmica piezelétrica expande na espessura, bem como na diagonalidade. A figura 12 ilustra que as placa retangulares são utilizados nesta modalidade e na direção do comprimento a propagação é muito menor do que a superfície dos eletrodos.

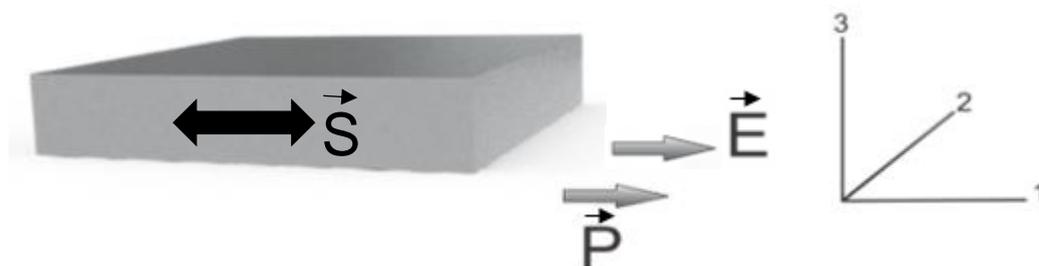


Figura 12: Modo de vibração na direção do comprimento longitudinal.

O campo elétrico é perpendicular à direção de polarização, causando uma tensão de vibração ao longo da superfície. A frequência de ressonância é determinada pela espessura do dispositivo.

Para avaliar as propriedades do material piezelétrico podemos utilizar métodos que baseiam nas equações de impedância elétrica (ou admitância) para diferentes modos de vibração com diferentes frequências de ressonâncias observadas e com ressonância para cada modo correspondente. Essa determinação das propriedades piezelétricas pode ser realizada para diferentes amostras piezelétricas com formas específicas, com relações a geometria e direções de polarização. A frequência de ressonância e condutância dos materiais piezelétricos utilizados podem ser determinadas por meio de uma ponte de impedância, tal como, a ponte de impedância da Agilent, Modelo: E4980A, 20 Hz - 2 MHz, conforme ilustrada na figura 13. Com esse equipamento podemos realizar a caracterização do material e determinar os coeficientes experimentalmente. Possivelmente de posse dos parâmetros medidos

simulações físicas podem ser utilizadas para se entender e avaliar o comportamento esperado de aplicações que utilizam os materiais piezelétricos como atuadores e transdutores.

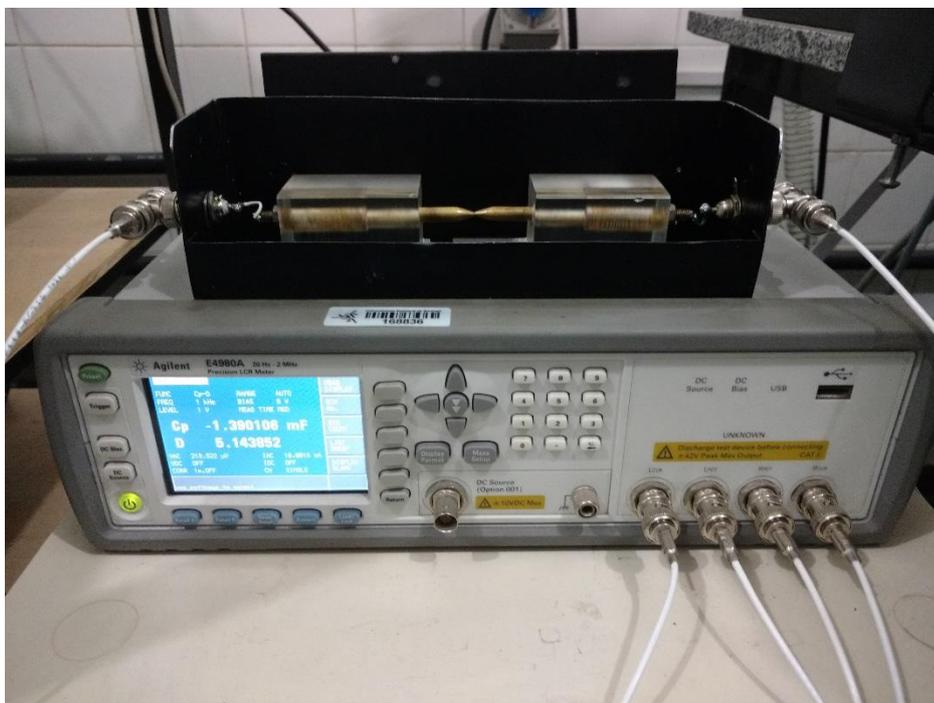


Figura 13: Medidor de Precisão LRC, Marca: Agilent, Modelo: E4980A, 20 Hz - 2 MHz.

Os parâmetros medidos são: frequência de ressonância ( $f_r$ ) e antirressonância ( $f_a$ ); a capacitância à tensão mecânica constante ( $C_s$ ) ou à deformação constante ( $C_T$ ); coeficiente de carga piezelétrica ( $d$ ); coeficiente de voltagem piezelétrica ( $g$ ); coeficientes de acoplamento eletromecânico ( $k$ ); as permeabilidade dielétricas relativa à deformação constante ( $\epsilon_r^T$ ) e permeabilidade dielétricas relativa à tensão constante ( $\epsilon_r^S$ ).

Especificamente para o modo de ressonância em espessura ou comprimento transversal (3-1), conforme ilustrado na figura 11, implica que o elemento piezelétrico tem sua polarização elétrica na direção da espessura (3) e sua deformação mecânica ao longo da direção longitudinal (1), sendo assim o coeficiente de acoplamento eletromecânico ( $k_{31}$ ) deve ser calculado por

$$k_{31} = \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f_a}{f_r} \cdot \left( \frac{1}{\frac{\pi f_a}{2 f_r} - \tan\left(\frac{\pi f_a}{2 f_r}\right)} \right)} \quad (11)$$

Já o coeficiente de conformidade elástico à campo elétrico constante ( $s_{11}^E$ ) e o coeficiente de conformidade elástico à deslocamento constante, pode ser determinado por:

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho \cdot f_r^2 \cdot l^2} \quad (12)$$

e

$$s_{11}^D = s_{11}^E (1 - k_{31}^2) \quad (13)$$

Note que os sobrescritos  $E$  e  $D$  indicam as condições de campo elétrico e deslocamento dielétrico, constante, além disso,  $\rho$  e  $l$  é a densidade e o comprimento da amostra, respectivamente. Por fim, o coeficiente de carga piezométrica ( $d_{31}$ ) e o coeficiente de tensão piezométrica ( $g_{31}$ ) são obtidos, respectivamente, por:

$$d_{31} = k_{31} \cdot \sqrt{s_{11}^E \cdot \varepsilon_{33}^T} \quad (14)$$

e

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{33}^T} \quad (15)$$

onde  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$  é a permissividade elétrica para o vácuo e  $\varepsilon_{33}^T$  é a permissividade relativa para o meio.

$$\varepsilon_{33}^T = \frac{C_p \cdot l}{\varepsilon_0 \cdot A} \quad (16)$$

## 2.7. Acoplamento Magnetoelétrico

O sucesso no desenvolvimento de um bom sensor de campo magnético (SCM) depende fortemente do acoplamento magnetoelétrico (A-ME) e o entendimento do efeito magnetoelétrico (E-ME). Com base nos apontamentos bibliográficos referentes a esse tema realizado por Montanher D. Z. [1], abordando cronologicamente os materiais empregados em sua investigação, optamos pelo compósito piezelétrico  $\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  (PZT-5A) e pelo compósito magnetoelétrico  $\text{Tb}_{1-x}\text{Dy}_x\text{Fe}_2$  (Terfenol-D).

O primeiro compósito, combina boas propriedades piezelétricas, como por exemplo, um bom coeficiente piezelétrico (aproximadamente  $-170$  pC/N) e disponibilidade comercial [38]. Nesse caso, o coeficiente piezelétrico é o  $d_{31}$ , pois essa notação corresponde a direção de deformação mecânica do material empregado. Já o segundo compósito, apresenta um comportamento magnetostritivo grande. A combinação PZT/Terfenol-D faz desse compósito laminar um dos mais estudados e reportados na literatura.

Segundo a literatura científica [1 e 43], para se obter coeficientes magnetostritivos e piezelétricos altos em compósitos laminares, é necessário tomar alguns cuidados com relação a quatro aspectos fundamentais:

I - Módulos de Young, para que de ambas as fases sejam semelhantes [1 e 38], assim os compósitos poderão se deformar de modo muito próximo.

II - Espessura e o número de camadas piezelétricas e magnetostrictivas, pois afetam a transferência de energia mecânica entre as camadas, e conseqüentemente, influenciam na conversão da energia entre as formas magnética e elétrica [1 e 38]. Quando a espessura do compósito ( $> 1\text{mm}$ ) ou o número de camadas é grande ( $> 3$ ) implica no aumento da massa do sistema e por sua vez, afeta a conversão da energia mecânica em energia elétrica ou vice e versa.

III - Método de acoplamento utilizado, i.e., resina epóxi, presa a quente, filme fino. Entretanto, devido à diversidade dos materiais magnetostritivos e piezelétricos utilizados nos trabalhos, além de seus diferentes tamanhos e espessuras, a comparação entre esses resultados não permite a determinação de um melhor método de acoplamento mecânico que leve à maximização do coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V$ ) [1 e 38].

IV - *Direção do campo magnético/elétrico externo aplicado ao compósito*, pois a orientação relativa entre as direções de magnetização e de polarização de cada constituinte, é de extrema importância nos compósitos laminares. Nesse caso, para se obter o melhor  $\alpha_V$ , se faz necessário que a direção de polarização do compósito piezelétrico seja na mesma direção da magnetização do compósito magnetostritivo, pois assim, a deformação gerada será maior e coeficiente de tensão ME também [5]. Os materiais magnetostritivos possíveis incluem: liga de  $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$  (Terfenol-D), liga de *Metglas*, liga de *Permendur*, metal de Níquel, etc., enquanto que os materiais piezelétricos possíveis incluem: Cerâmicas  $Pb(Zr,Ti)O_3$  (PZT), Monocristais  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3}O_3) - PbTiO_3$  (PMN-PT), PVDF, etc.

Diversos autores [5, 38, 39,40] se utilizam de compósitos laminares bifásicos para a construção de sensores de campo magnético (SCM). Apresentaremos agora alguns modelos que são tipicamente feitos de uma ou mais camadas de material magnetostritivo ligadas com uma ou mais camadas de material piezelétrico com diferentes disposições das direções de magnetização (M) e de polarização (P) como ilustra a figura 14.

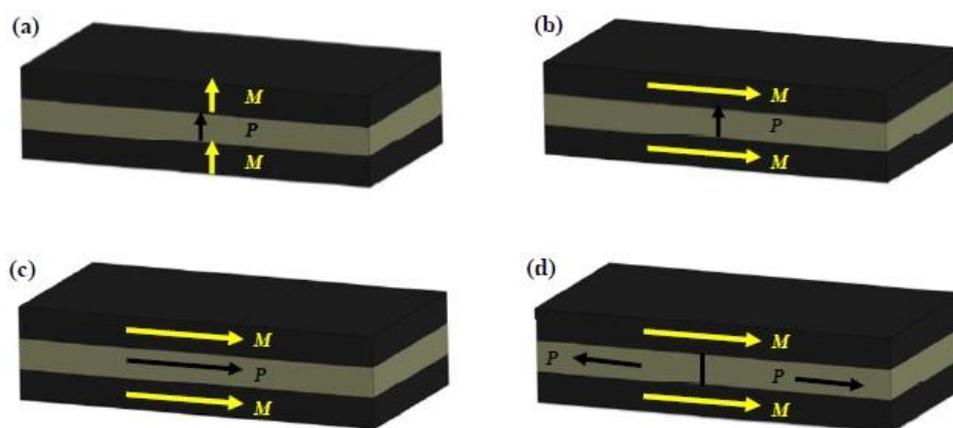


Figura 14: Representação de alguns modelos de construção de compósitos laminares monofásicos ME, com diferentes direções de magnetização (M) e polarização (P): (a) interposição transversal-transversal ( $T_m-T_m$ ), (b) interposição longitudinal-transversal ( $L_m-T_P$ ) (c) interposição longitudinal-longitudinal ( $L_m-L_P$ ), (d) interposição duplo piezo com polarização longitudinal oposta e magnetização longitudinal também.

De modo geral, a figura 14 ilustra diferentes representações para os compósitos laminares monofásicos ME, com diferentes direções de magnetização (M) e

polarização (P). A figura 14(a) ilustra um compósito laminar de duas faces intercaladas: Terfenol-D/PZT/Terfenol-D, com uma disposição de polarização transversal e magnetização transversal, modelo  $T_p$ - $T_m$ . Essa configuração foi relatada por Ryu et al. em 2001 [39,40]. Um grande coeficiente ME,  $\alpha_V$ , de 30 mV/Oe foi encontrado, para um campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) de 4,2 kOe e frequência de 1 kHz. Um ano mais tarde, os mesmos autores aumentaram ainda mais o  $\alpha_V$ , chegando a 41 mV/Oe em um  $H_{AC}$  menor, 4 kOe e mesma frequência 1 kHz, para tanto substituíram a camada PZT por uma camada PMN-PT com o mesmo arranjo  $T_m$ - $T_p$  [41]. Seguindo a mesma linha de desenvolvimento, foi a vez de Dong et al. construírem dois compósitos: Terfenol-D/PZT/Terfenol-D e Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D, respectivamente em 2003 e 2004, ambos com magnetização longitudinal e polarização transversal ( $L_m$ - $T_p$ ), conforme ilustrado na figura 14(b) [42, 43]. Esses dois compósitos foram medidos e apresentaram uma resposta superior aos resultados anteriores,  $\alpha_V = 85$  e 110 mV/Oe respectivamente, para campo  $H_{AC}$  inferiores a 0,5 kOe e frequência de 1 kHz. Dong et al., também em 2004, conseguiram obter um excelente coeficiente,  $\alpha_V = 430$  mV/Oe, para um campo magnético  $H_{AC}$  de 0,5 kOe a 1 kHz, por meio de uma interposição de Terfenol-D/PMN-PT/Terfenol-D, com magnetização longitudinal e polarização longitudinal ( $L_p$ - $L_m$ ), conforme ilustrado na figura 14(c) [44]. Embora a configuração  $L_m$ - $L_p$  tivesse um  $\alpha_V$  excelente, sua carga associada era bastante baixa devido à capacitância reduzida na camada PMN-PT associada a um aumento no comprimento. Para aumentar a tensão elétrica ( $V_s$ ) e elevar as cargas, Dong desenvolveu em 2005 um arranjo intercalando os mesmos compósitos em um arranjo de duas metades de material piezelétrico, polarizadas no modo longitudinal ( $L_p$ ), conforme a figura 14(d)] [45]. Esse projeto agregou as vantagens do alto valor de  $V_s$  do arranjo  $L_m$ - $L_p$ , da figura 14 (c) e a melhor resposta ME do arranjo  $L_m$ - $T_p$ , da figura 14(b), o que resultou em um  $\alpha_V$  extremamente elevado, de 1,6 V/Oe.

Além desses trabalhos citados, outros autores apresentaram novos detalhes como por exemplo, número de camadas de compósitos. Porém, todos buscaram melhorar o  $\alpha_V$ , desse modo, não vamos alongar tais discussões aqui, uma vez que os modelos citados são suficientes para entender o protótipo construído nesse trabalho, i.e., o modelo  $L_m$ - $T_p$ , da figura 14(b).

Abordaremos agora, de modo mais detalhado, o modelo  $L_m-T_p$ , no qual é objeto principal de estudo deste trabalho. Com este arranjo serão construídos um sensor de campo magnético contínuo magnetostritivo/piezelétrico (SCM-MP) e posteriormente, um sensor de campo magnético alternado (SCM-MP passivo).

A figura 15 ilustra o diagrama esquemático do sensor SCM-MP, em forma de elementos retangulares, sendo um elemento constituído do compósito PZT-5A polarizada no modo transversal ( $T_p$ ) interposto de dois elementos do compósito Terfenol-D magnetizados longitudinalmente ( $L_m$ ), dispostos num sistema cartesiano de coordenadas, 1, 2 e 3. Comprimento ( $l$ ) na direção 3, largura ( $w$ ) na direção 2 e espessura ( $t$ ) na direção 1. Nesse arranjo, o campo magnético ( $H_{DC}$ ) a ser medido se encontra ao longo do comprimento do elemento magnetostritivo, Terfenol-D (direção 3), e por isso pode ser representado genericamente por  $H_3$ . A direção da magnetização dos elementos de Terfenol-D (direção 3) e a direção de polarização do PZT-5A (direção 1) são marcadas com as setas  $M$  e  $P$  na figura 15, respectivamente. Nota-se ainda que a magnetização é longitudinal e a polarização é transversal, mas podendo assumir outras configurações como já descrito acima.

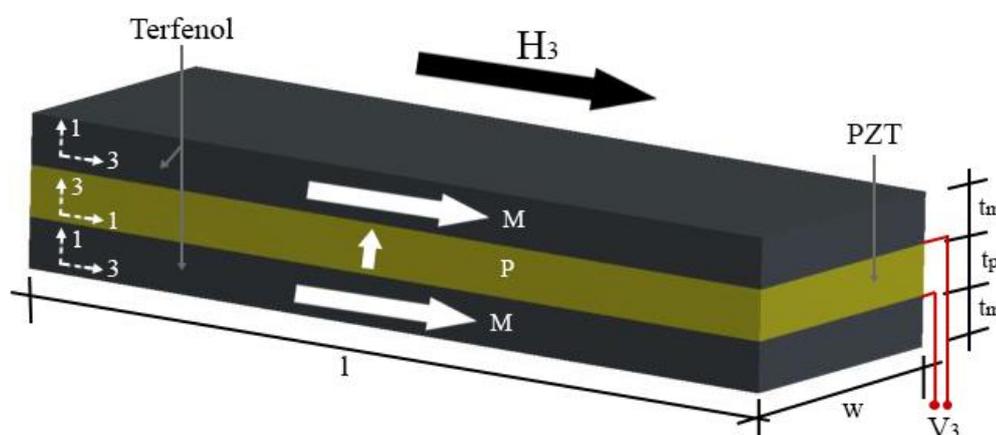


Figura 15: Diagrama esquemático do sensor SMP e sistema de coordenadas cartesianas utilizadas para detectar um campo magnético ( $H_{DC}$ ). As setas  $M$  e  $P$  denotam as direções de magnetização do Terfenol-D e polarização do elemento piezelétrico, PZT-5A.

O princípio de funcionamento desse sensor em forma retangular é essencialmente baseado no efeito magnetoelétrico extrínseco (E-ME-E), utilizando o efeito do produto mediado pelo efeito magnetostritivo nos elementos de Terfenol-D e o efeito piezelétrico no elemento PZT-5A. Quando os elementos magnetostritivos são

colocados em meio a um campo magnético oscilante ( $H_{AC}$ ) ao longo de seu comprimento (direção 3), uma deformação magnetostritiva ( $S_{3,m}$ ) é induzida na mesma direção, devido ao efeito magnetostritivo. Uma vez que os compósitos estão intercalados, essa tensão mecânica,  $S_{3,m}$ , gera no elemento de PZT-5A uma deformação piezométrica,  $T_{3,p}$ , correspondente, e conseqüentemente, surge uma tensão elétrica alternada ( $V_3$ ), nos eletrodos do elemento PZT-5A, na direção 3, devido ao efeito piezométrico direto. Caso o campo magnético a ser detectado seja contínuo ( $H_{DC}$ ), será necessário o uso de um campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ), normalmente gerado por uma bobina posicionada em torno dos elementos, com espiras perpendiculares a direção do comprimento. A intensidade do efeito ME extrínseco medido mecanicamente nos elementos do sensor, é expressa pelo coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V$ ) [5]:

$$\alpha_V = \frac{dV_3}{dH_3} \quad (17)$$

O efeito ME no elemento magnetostritivo retangular trabalha com frequências bem abaixo da sua frequência de ressonância fundamental, na direção do comprimento, e pode ser descrita pelo modelo quase-estático. Vamos considerar um elemento de sensor com o seu comprimento ( $l$ ) muito maior que sua largura ( $w$ ) de modo que o modelo físico envolverá a largura e a espessura ( $t$ ), como mostrado na figura 15. Desta forma, se o material for magnetizado ao longo de seu comprimento, teremos o material magnetostritivo operando no modo de ressonância, comprimento longitudinal (33), e as equações constitutivas piezomagnéticas podem ser expressas do seguinte modo:

$$S_{3,m} = S_{33}^H \cdot T_{3,m} + d_{33,m} \cdot H_3 \quad (18)$$

$$B_{3,m} = d_{33,m} \cdot T_{3,m} + \mu_{33}^T \cdot H_3 \quad (19)$$

onde  $H_{DC-3}$  e  $B_3$  é o campo magnético e densidade de fluxo magnético ao longo da direção do comprimento (3), respectivamente. Os parâmetros  $S_{3,m}$  e  $T_{3,m}$  é a

deformação magnetostritiva e tensão mecânica ao longo da direção do comprimento,  $\mu_{33}^T$  é a permeabilidade magnética para tensão mecânica constante;  $d_{33}$ , é o coeficiente de carga piezelétrica; e  $S_{33}^H$  coeficiente de conformidade para intensidade de campo magnético constante. Se polarizado em relação à espessura, o material piezelétrico opera em fase no modo de ressonância na direção do transversal com relação ao comprimento (31), e neste caso as equações constitutivas piezelétricas podem ser escritas como:

$$S_{1,p} = S_{11}^E \cdot T_{1,p} + d_{31,p} \cdot E_3 \quad (20)$$

$$D_3 = d_{31,p} \cdot T_{1,p} + \varepsilon_{33}^T \cdot E_3 \quad (21)$$

Os termos  $E_3$  e  $D_3$  representam o campo elétrico e deslocamento elétrico ao longo da direção da espessura (3), respectivamente;  $S_{1,p}$  e  $T_{1,p}$  é a deformação piezelétrica e tensão mecânica ao longo da direção de comprimento (1),  $\varepsilon_{33}^T$  é a permissividade dielétrica para tensão mecânica constante;  $d_{31,p}$  coeficiente de carga piezelétrica; e  $S_{11}^E$  é o coeficiente de conformidade elástico para intensidade de campo elétrico constante.

Assumindo um acoplamento mecânico perfeito entre as faces dos materiais magnetostritivos e piezelétrico, as condições mecânicas de fronteira para a deformação e para tensão mecânica do elemento do sensor são as seguintes:

$$S_{3,m} = S_{1,p} \quad (22)$$

$$2T_{3,m} \cdot v_m + T_{1,p} \cdot v_p = 0 \quad (23)$$

$v_m$  e  $v_p$  são os volumes de material magnetostritivo e piezelétrico, respectivamente. Uma vez que o comprimento (l) e a largura (w) das duas faces dos materiais são os mesmos, a equação (21) pode ser modificada para depender da espessura (t) como se segue:

$$2T_{3,m} \cdot t_m + T_{1,p} \cdot t_p = 0 \quad (24)$$

Em condições de circuito elétrico aberto,  $D_3$  desaparece, na forma,

$$D_3 = 0 \quad (25)$$

Combinando as equações (21), (24), e (25),  $T_{3,m}$  e  $T_{1,p}$  podemos então escrever;

$$T_{3,m} = \frac{\varepsilon_{33}^T E_3}{2d_{31,p}} \cdot \frac{t_p}{t_m} = \frac{E_{33}}{2g_{31,p}} \cdot \frac{t_p}{t_m} \quad (26)$$

$$T_{1,p} = -\frac{\varepsilon_{33}^T E_3}{d_{31,p}} = -\frac{E_3}{g_{31,p}} \quad (27)$$

em que  $g_{31,p}$  é o coeficiente de tensão elétrica (voltagem) piezoeletrica. Combinando a equações (18), (20), (22) e (24) e (27), temos que o coeficiente de campo ME ( $\alpha_E$ ) pode ser escrito como:

$$\alpha_E = \left| \frac{dE_3}{dH_3} \right| = \left| \frac{2d_{33,m}g_{31,p}t_m}{s_{33}^H t_p + 2s_{11}^E t_m - 2d_{31,p}g_{31,p}t_m} \right| \quad (28)$$

e então, o coeficiente de tensão eletrica ME ( $\alpha_V$ ) é:

$$\alpha_V = \left| \frac{dV_3}{dH_3} \right| = \left| \frac{dE_3}{dH_3} \right| \cdot t_p = \alpha_E \cdot t_p = \left| \frac{2d_{33,m}g_{31,p}t_m t_p}{s_{33}^H t_p + 2s_{11}^E t_m - 2d_{31,p}g_{31,p}t_m} \right| \quad \text{ou}$$

$$\alpha_V = \left| \frac{2d_{33,m}g_{31,p}t_m t_p}{s_{33}^H t_p + 2s_{11}^E t_m - 2d_{31,p}g_{31,p}t_m} \right| \quad (29)$$

# CAPÍTULO 3

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo é dedicado à descrição dos materiais utilizados neste trabalho e o método de caracterização utilizado para investigar a resposta ME dos sensores SCM desenvolvidos. Inicialmente será apresentado uma descrição detalhada do material piezelétrico, PZT-5A, e do material magnetostritivo, Terfenol-D. Em seguida, descreveremos o processo de confecção dos sensores SCM. Por fim, apresentaremos o método de caracterização dos sensores SCM com relação a frequência de trabalho (frequência magnetoelétrica), a tensão elétrica de saída ( $V_s$ ) e o coeficiente de tensão ME,  $\alpha_V^*$ .

### 3.1. Material piezelétrico

De acordo com nossa revisão bibliográfica, escolhemos como material para desenvolvimento deste trabalho o composto Titanato Zirconato de Chumbo ( $\text{PbZr}_{0,53}\text{Ti}_{0,47}\text{O}_3 + 1 \text{ wt\% Nb}$ ), muito retratado somente como PZT-5A. A escolha foi motivada pelos fatores ligados às suas características e coeficiente de acoplamento eletromecânico ( $k_{31} = 0,31$ ), coeficiente de carga piezelétrica ( $d_{31} = -170 \text{ pC/N}$ ) coeficiente de voltagem piezelétrica ( $g_{31} = -11 \text{ mV.m/N}$ ), e o coeficiente de conformidade elástico para campo elétrico constante ( $s_{11}^E = 17 \text{ pm}^2/\text{N}$ ), os quais são parâmetros fundamentais para o desenvolvimento de sensores, atuadores e transdutores. Além disso, o PZT-5A possui grande intervalo de temperatura de utilização útil (até  $360^\circ\text{C}$ ) e alta intensidade de deformação quando sujeito a uma pressão mecânica aplicada (ou campo elétrico) quando comparado com PZT-4 e PZT-8. Essas e outras propriedades características do PZT-5A encontram-se na tabela 1. Vale ressaltar que o PZT-5A é de fácil obtenção no mercado em diferentes formas e tamanhos, conforme ilustrado na figura 16.



Figura 16: Elementos cerâmicos piezelétricos PZT-5A, polarizados no modo espessura, para diferentes formas e tamanhos.

As propriedades piezelétricas e dielétricas destes materiais estão bem estudadas e podem ser encontradas na literatura [46, 47], ou ainda, de forma resumida, na tabela 1 [48]. Nesse trabalho, empregamos elementos piezelétricos com o objetivo de desenvolver sensores SCM de diferentes formas geométricas, caracterizando-os com relação aos seus coeficientes ME. Portanto, o coeficiente ME de cada sensor foi utilizado como um dos parâmetros de comparação entre os diferentes tipos de sensores SCM construídos com os elementos de PZT-5A.

Tabela 1: Propriedades das cerâmicas piezelétricas, adaptada do fabricante ATCP Engenharia Física LTDA [48].

	<b>Símbolo</b>	<b>PZT-5A</b>
<b>Propriedades Dielétricas</b>		
Permissividade dielétrica (T constante) para 1 kHz	$\epsilon_{33}^T$	1800
Fator de dissipação dielétrica para 1 kHz	$\tan \delta$	0,017
Temperatura Curie (°C)	$T_c >$	350
Temperatura de operação máxima (°C)	$T <$	250
<b>Propriedades Eletromecânicas</b>		
Coeficiente de acoplamento eletromecânico	$k_{31}$	0,33
	$k_{33}$	0,70
Coeficiente de carga piezelétrica (pC/N)	$d_{31}$	-170
	$d_{33}$	425
Coeficiente de voltagem piezelétrica (mV.m/N)	$g_{31}$	-11
	$g_{33}$	27
<b>Propriedades Mecânicas</b>		
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	7700
Coeficiente de conformidade elástica (pm <sup>2</sup> /N)	$s_{11}^E$	17
	$s_{33}^E$	23
	$s_{11}^D$	15
	$s_{33}^D$	12

### 3.2. Material Magnetostritivo

O Tb<sub>0,3</sub>Dy<sub>0,7</sub>Fe<sub>1,92</sub> (Terfenol-D) com magnetização longitudinal foi escolhido dentre os materiais magnetostritivos devido à sua grande deformação mecânica induzida por campo magnético. Como já mencionado anteriormente, o nome Terfenol-D deriva a partir da composição do material (Ter - Tércbio, Fe - Ferro, D - Disprósio). Neste trabalho, os elementos de Terfenol-D foram adquiridos da empresa Etrema/TdVid, LLC [49], cuja geometria é ilustrada na figura 17.

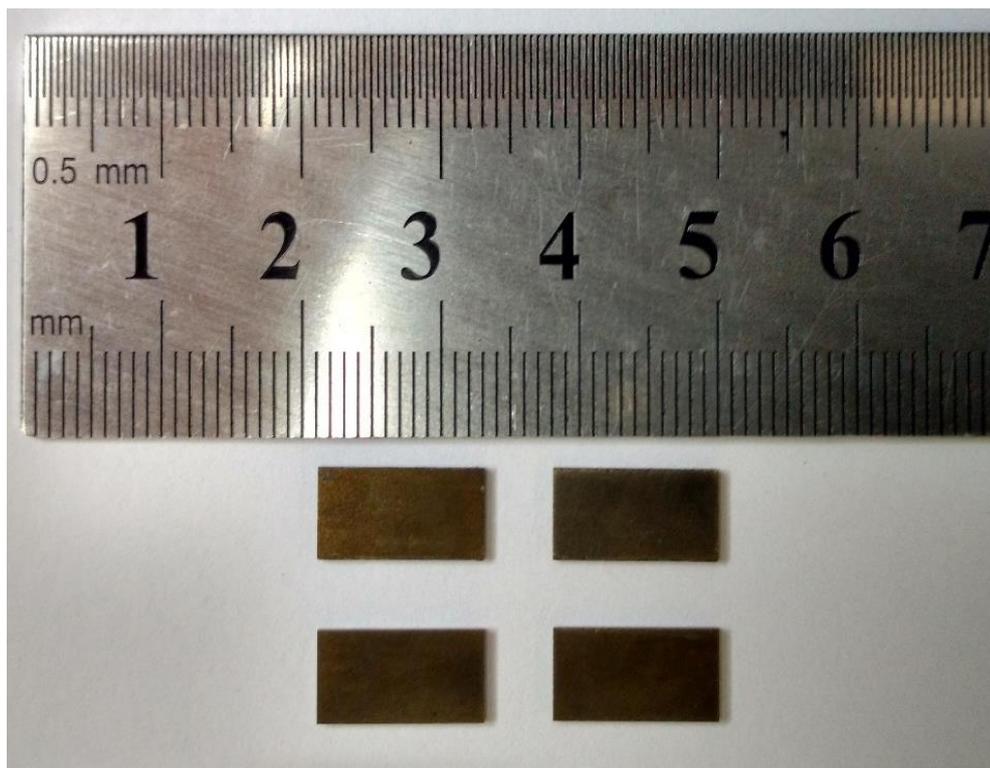


Figura 17: Elementos magnetostritivos TERFENOL-D, retangulares magnetizados longitudinalmente.

Podemos dizer que o Terfeno-D tem uma magnetostricção positiva gigante superior a 700 ppm num campo magnético aplicado de 1,26 kOe (100 kA/m). Essa magnetostricção gigante ( $\geq 700$  ppm) em um campo magnético relativamente baixo ( $\sim 1,26$  kOe) torna o Terfenol-D um bom atuador magnetomecânico para os elementos sensores ME. O elevado coeficiente de acoplamento magnetoelástico ( $\geq 0,65$ ) permite a conversão eficiente entre as energias magnética e mecânica neste material. A elevada temperatura de funcionamento ( $\sim 200^\circ$  C) garante uma elevada temperatura de utilização útil de sensores ME [5, 49].

As curvas de magnetostricção do Terfenol-D em função da intensidade de campo magnético, em kA/m, aplicado sobre uma ampla gama de tensões compressivas, são apresentadas no gráfico representativo obtido por TdVib [49], (figura 18). As propriedades físicas do Terfenol-D são fornecidas no endereço eletrônico do fabricante TdVib, como ilustra a tabela 2.

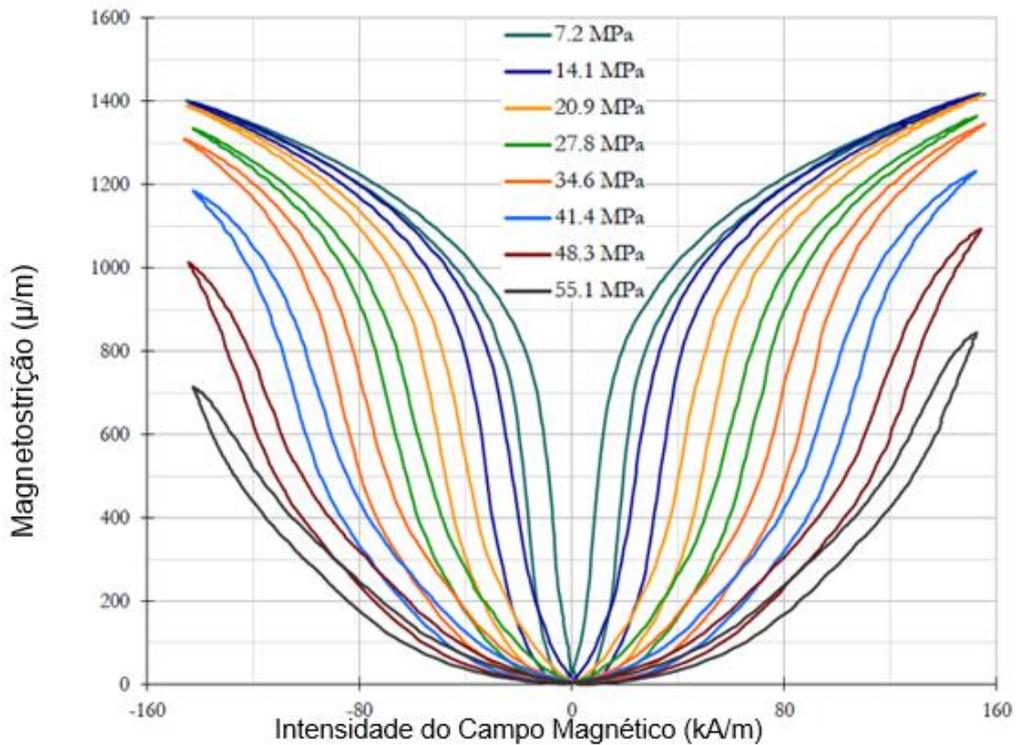


Figura 18: Resposta magnetostritiva em função do campo magnético aplicado sobre uma ampla gama de tensões compressivas. Adaptado de [49].

Tabela 2: Propriedades físicas do material Terfenol-D fornecidas por ETREMA, atualmente, TdVib, LLC, Universidade do Estado de Iowa, USA [49].

	Símbolo	Terfenol-D
<b>Propriedades Elétricas e Magnéticas</b>		
Permeabilidade relativa	$\mu_{r33}$	5 - 10
Magnetização de saturação (T)	$M_s$	1
Resistividade elétrica ( $\mu\Omega\text{m}$ )	$\rho_0$	0,6
<b>Propriedades Magnetoelétricas</b>		
Coefficiente de acoplamento magnetomecânico	$k$	0,65 – 0,75
Magnetostrição (ppm)	$\lambda$	$\geq 700^*$
Magnetostrição de saturação (ppm)	$\lambda_s$	1000 – 1200**
Tempo de resposta ( $\mu\text{s}$ )	$t_s$	$< 1$
Frequência de operação (kHz)	$f_{op}$	1 – 10
Densidade de energia ( $\text{kJ/m}^3$ )	$E_d$	14 – 25
<b>Propriedades Mecânicas</b>		
Densidade ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho$	9150 – 9250
Módulo de Young (GPa)	$E$	25 – 65
Resistência à tração (Mpa)	$TS$	$\geq 25$
<b>Propriedades Térmicas</b>		
Coefficiente de dilatação térmica ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	$\alpha_{the}$	8 – 12
Condutividade térmica ( $\text{J}/^\circ\text{C}/\text{m}/\text{s}$ )	$\alpha_{th}$	10,5 – 10,8
Temperatura Curie ( $^\circ\text{C}$ )	$T_c$	380
Temperatura de operação ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{op}$	- 40 – 150

### 3.3. Classificação e Métodos Experimentais dos Sensores SCM

De posse de diferentes geometrias de elementos piezelétricos (PZT-5A) e do material magnetostritivo (Terfenol-D), nesse trabalho, desenvolvemos e caracterizamos dois grupos de protótipos de sensores SCM (grupo I e grupo II): Sensores do grupo I, construídos com elementos piezelétricos e foram caracterizados em meio ao campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ); e sensores do grupo II são aqueles construídos com material piezelétrico e magnetostritivo e foram caracterizados em meio ao campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) e/ou alternado ( $H_{AC}$ ). Em ambos os casos o principal fenômeno físico envolvido é o efeito magnetoelétrico extrínseco (E-ME-E) e o efeito piezelétrico direto.

Uma vez determinada a geometria do elemento e o modelo do sensor, foi construído uma bobina em torno do(s) elemento(s) do sensor utilizando fio de cobre (AWG31). Essa bobina é a responsável por criar o campo magnético alternado,  $h_{AC}$ , por meio de uma corrente elétrica alternada ( $i_{AC}$ ) que circula nas espiras da bobina. A fixação dessa bobina deve obedecer a geometria dos elementos e produzir um  $h_{AC}$  perpendicular ao campo magnético ( $H$ ) que se deseja medir. Considerando os tipos dos sensores desenvolvidos, temos a seguinte descrição para os grupos: **I**) Sensores utilizando somente elementos piezelétricos (PZT5A); grupo **II**) Sensores utilizando um elemento piezelétrico interposto entre dois elementos magnetostritivos. O **grupo I** foi subdividido em 3 subgrupos, conforme a geometria do material piezelétrico, a saber: Sensores Discos (SCM-SD); Sensores Retangulares (SCM-SR); e Sensores Anéis (SCM-SA). O **grupo II** está centrado na configuração do sensor magnetostritivo/piezelétrico (SCM-MP) para medidas de campo  $H_{AC}$  ou  $H_{DC}$ . Desta forma os sensores foram denominados como especificado nas siglas abaixo:

**SCM-SD:** são sensores que utilizam os elementos piezelétricos em forma de disco e têm como princípio físico de funcionamento o efeito piezelétrico direto. Uma corrente de Foucault é induzida no eletrodo do elemento piezo e como consequência, uma Força de Lorentz tende a surgir devido à combinação do  $h_{AC}$ , com  $H$ , a ser medido, podendo este ser contínuo ( $H_{DC}$ ) ou alternado ( $H_{AC}$ ). Nesse caso, a bobina responsável pelo  $h_{AC}$  se encontra milimetricamente afastada dos elementos piezo em forma de disco [50].

**SCM-SR:** são sensores que utilizam os elementos piezelétricos retangulares. O princípio de funcionamento desse tipo de sensor envolve forças de Lorentz e o efeito piezelétrico direto. Porém, nesse caso a Força de Lorentz é estabelecida pelo fio de cobre (espira) que compõe a bobina e que se encontra justaposta aos elementos piezelétricos e em meio ao campo magnético a ser medido ( $H$ ). A interação entre fio de cada espira e o  $H$  gera uma Força de Lorentz. Essa, transfere energia mecânica para o elemento piezelétrico e é convertida em uma voltagem elétrica (diferença de potencial) por meio do efeito piezelétrico direto.

**SCM-SA:** são sensores que utilizam os elementos piezelétricos em forma de anel, de espessura 4 vezes maior que os elementos utilizados nos sensores SD. Esses sensores combinam os efeitos apresentados pelos sensores SCM-SD e SCM-SR.

**SMP-MP:** é um sensor que utilizam um elemento piezelétrico (PZT-5A) com polarização no modo espessura ou transversal ( $T_p$ ) entreposto por dois elementos retangulares de Terfenol-D, com magnetostrição preponderante ao longo do comprimento (longitudinal,  $L_m$ ). O princípio de funcionamento desse sensor envolve o efeito magnetoelétrico extrínseco (E-ME-E) e o efeito piezelétrico direto.

Após confeccionados, os sensores SCM foram caracterizados com relação a frequência de ressonância ME e à resposta ME em função de um campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ). Para tanto, foi montado um sistema para medidas com os equipamentos sincronizados conforme ilustrado na figura 19. Para investigar a dependência da resposta ME em função do campo magnético estático ( $V \times H_{DC}$ ) os sensores foram inseridos em um campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) gerado por um eletroímã GMW *MAGNET SYSTEMS* (5970-80 *Current Reversal Switch*), enquanto um campo magnético oscilante ( $h_{AC}$ ) foi gerado pela corrente elétrica na bobina em torno do elemento sensor. A corrente elétrica na bobina excitadora foi gerada e controlada por meio da aplicação de uma diferença de potencial, fornecida pelo gerador de funções Agilent (33210A). Um amplificador *Lock-In* (SRS830) foi utilizado para medir a corrente aplicada. Já o campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) foi medido e monitorado por um Gaussímetro (Lake Shore 425). Com a aquisição dos dados e essa

configuração experimental de caracterização, foi possível registrar a tensão elétrica (V) induzida em função do  $H_{DC}$  e, conseqüentemente, a razão entre essas duas grandezas físicas nos permitiram calcular o coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V$ ), conforme expresso pela equação 30.

$$\alpha_V = \frac{dV_3}{dH_3} \quad (30)$$

Neste caso, o índice 3 do termo  $V_3$ , representa a diferença de potencial (Vs) do elemento piezelétrico quando polarizado no modo espessura e no termo  $H_3$ , nos remete a direção (3) do campo magnético externo ( $H_{DC}$  ou  $H_{AC}$ ), respectivamente, em cada um dos sensores. Tendo em vista que os modelos descritos acima dependem de um campo  $h_{AC}$  de referência oriundo da corrente elétrica que circula na bobina que envolve o sensor, vamos expressar o coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V$ ) em função da intensidade dessa corrente elétrica também. De fato, quando a corrente elétrica aumenta,  $h_{AC}$  aumenta e, conseqüentemente, o valor de  $\alpha_V$  aumenta também. Desse modo, vamos definir esse coeficiente como  $\alpha_V^*$ , ou seja, é a razão entre a tensão elétrica (Vs) e o campo magnético estático ( $H_{DC}$ ), dividido pela corrente elétrica na bobina ( $i_{AC}$ ), conforme a equação 31:

$$\alpha_V^* = \frac{V_s [V]}{i_{AC} [A] \cdot H_{DC} [Oe]} \quad (31)$$

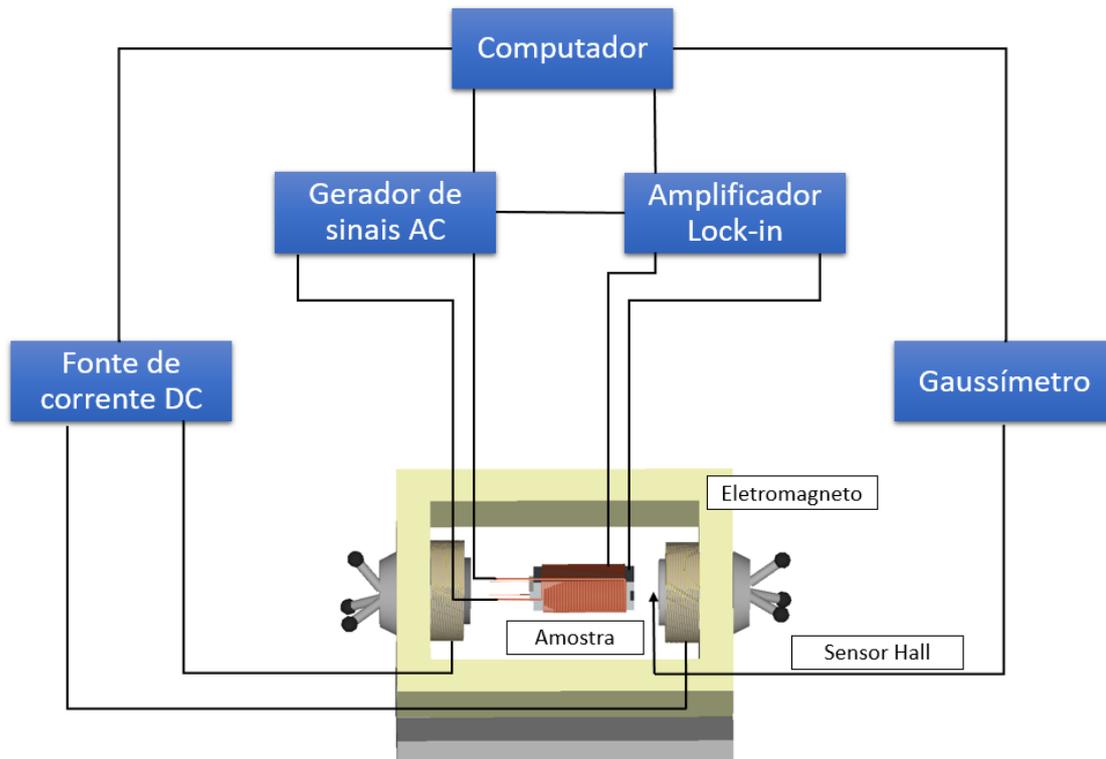


Figura 19: Diagrama em blocos da configuração experimental para medida magnetoelétrica direta.

### 3.3.1 Sensor Tipo Disco (SCM-SD)

Os elementos de PZT-5A utilizados para construção dos sensores SCM-SD possuem eletrodos de prata (depositados com tinta condutiva à base de prata). A qualidade do metal que constitui os eletrodos é um fator importante para o desenvolvimento, construção e caracterização desses SCM na forma de compósitos laminares. Os eletrodos usados devem ter uma boa aderência nos materiais cerâmicos.

O princípio físico do sensor SCM-SD está fundamentado em correntes induzidas na superfície dos contatos da cerâmica PZT tipo disco, conforme se observa na figura 20. Quando um campo magnético alternado é aplicado sobre um metal, correntes elétricas induzidas surgem na superfície desse material, e circulam em um caminho fechado. Tal variação no fluxo magnético provoca uma força eletromotriz induzida na superfície do metal, que por sua vez gera o deslocamento dos elétrons livres no metal em forma de circuitos fechados de correntes. Essas, por sua vez, são

chamadas de correntes de Foucault, ou ainda, correntes parasitas. Conforme a Lei de Lenz, a magnitude e sentido dessas correntes deve se opor à variação de fluxo magnético que as provocam, formando polos magnéticos que geram forças que efetivamente se opõem ao movimento do metal dentro do campo magnético [52]. Considerando que o material ferroelétrico possui eletrodos à base de tinta prata em suas superfícies, quando submetido a um campo magnético oscilante ( $h_{AC}$ ) sobreposto paralelamente a um campo magnético estático ( $H_{DC}$ ), um efeito magnetoelétrico extrínseco é observado, como ilustrado nas representações da figura 20, [51]. De fato, é justamente o que ocorre com o sensor SCM-SD.

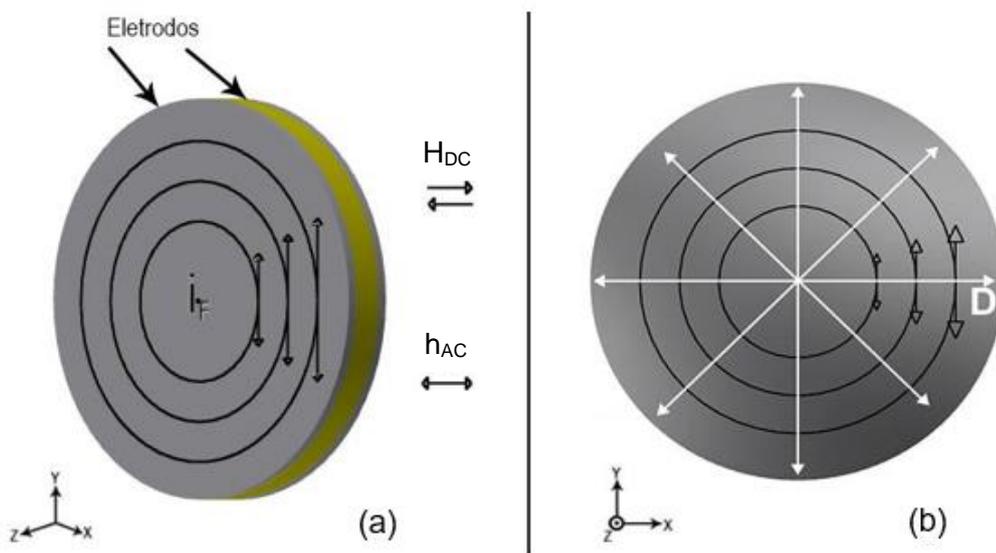


Figura 20: Representação do efeito magnetoelétrico extrínseco existente em cerâmicas ferroelétricas em formato de disco com eletrodos depositados em sua superfície. Em temos a representação (a) das direções dos campos magnéticos estático,  $H_{DC}$ , e oscilante,  $h_{AC}$ , e as correntes de Foucault induzidas ( $i_F$ ) nos eletrodos da cerâmica, enquanto que em (b) a deformação mecânica ( $D$ ) induzida pela força de Lorentz. Adaptada de Guiffard, et all [51].

Observa-se na figura 20(a) que o campo magnético  $h_{AC}$  induz uma corrente de Foucault ( $i_F$ ) nos eletrodos da cerâmica. Por sua vez, essa corrente interage com o campo magnético externo  $H_{DC}$ , resultando numa força de Lorentz que induz uma deformação mecânica periódica no material (figura 20(b)), e uma polarização elétrica via efeito piezoeletrico. Esse efeito é maximizado quando a frequência do campo magnético oscilante é sintonizada com a frequência de ressonância ME, que nesse caso, é a mesma frequência de ressonância piezoeletrica do elemento piezoeletrico em forma de disco. Nessa condição, a força de Lorentz gera uma alta deformação

mecânica, a qual é convertida em energia elétrica via acoplamento eletromecânico. Esse fenômeno foi teoricamente modelado com relativo sucesso por meio da utilização das equações piezelétricas e de Faraday-Lenz [51]. Uma vez conhecido o princípio físico de funcionamento desse sensor, foram adquiridos elementos de PZT-5A específicos, já polarizados, em forma de discos de 12,2 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura, conforme ilustra a figura 21 com esse elemento buscamos investigar a maximização do sinal resposta do sensor SCM-SD.

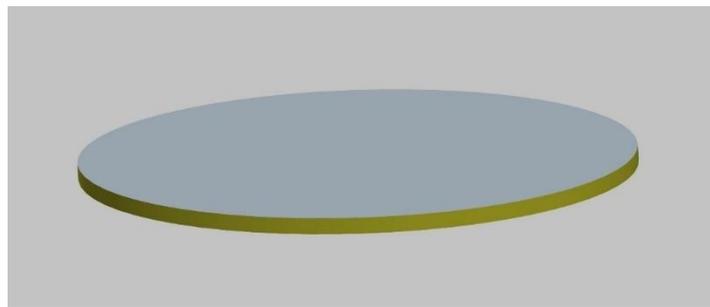


Figura 21: Representação de um elemento piezelétrico - PZT-5A em forma de disco: 12,2 mm de diâmetro e 0,5 mm de espessura.

Foram fabricados e analisados três sensores SCM-SD com elementos piezelétricos em forma de disco. Todos os três foram construídos com material piezelétrico PZT-5A polarizados na direção da espessura (3), em meio a uma bobina, geradora de campo  $H_{AC}$ , fabricada com fio de cobre AWG31. Na tabela 3 estão listadas as características geométricas de cada sensor SCM-SD: diâmetro do elemento piezelétrico ( $\varphi_{elemento}$ ), diâmetro da bobina ( $\varphi_{bobina}$ ), diâmetro do fio de cobre ( $\varphi_{fio}$ ), espessura do elemento piezelétrico ( $t_{elemento}$ ), comprimento de cada bobina ( $L_{bobina}$ ) e o número de espiras de cada bobina (N).

Tabela 3: Diâmetro do elemento piezelétrico, diâmetro da bobina, o diâmetro do fio de cobre, espessura do elemento piezelétrico, comprimento de cada bobina e o número de espiras da bobina, de cada sensor disco.

Sensor	$\varphi_{elemento}$ (mm)	$\varphi_{bobina}$ (mm)	$\varphi_{fio}$ (mm)	$t_{elemento}$ (mm)	$L_{bobina}$ (mm)	N
1	12,2	15	0,23	0,5	5,5	20
2	12,2	15	0,23	0,5	8,2	30
3	12,2	15	0,23	0,5	11,0	40

Os três elementos cerâmicos de PZT-5A são idênticos e foram inseridos perpendicularmente ao campo magnético oscilante ( $h_{AC}$ ), dentro de cada uma das bobinas. Tanto a bobina quando os discos de PZT-5A foram fixados em um bastão de tecnil (nylon), conforme esquematicamente ilustrado na figura 22(a) e (b).

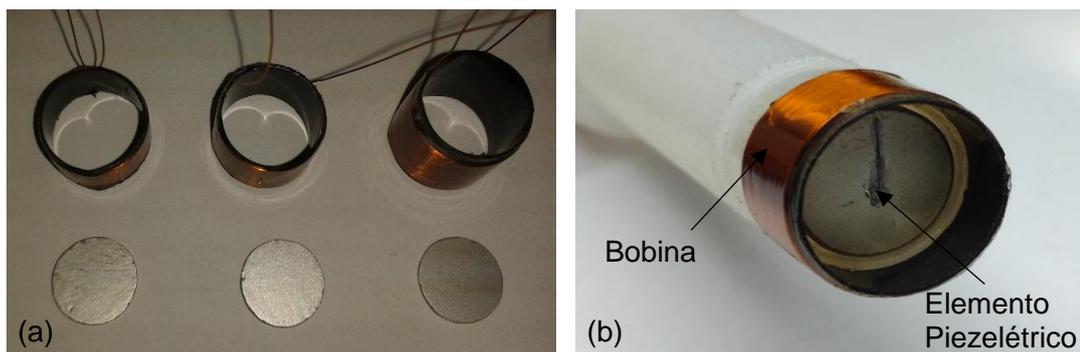


Figura 22: Ilustração do conjunto sensor SD: (a) Imagem das três bobinas ao lado dos três elementos de PZT-5A; (b) Representação do conjunto sensor SCM-SD, bastão-bobina-cerâmica.

Cada conjunto, bobina + elemento PZT-5A compreende um sensor SCM-SD, contendo elementos piezelétricos idênticos, porém bobinas diferentes, i.e., bobinas com 20, 30 e 40 espiras. Os detalhes referentes os resultados obtidos da análise desses sensores serão apresentados mais adiante, na seção de resultados.

### 3.3.2 Sensor Tipo Retangular (SCM-SR)

Utilizando elementos piezelétricos de geometria retangular foram construídos os sensores SCM-SR. Diferente da geometria circular os sensores SCM-SR estão fundamentados em um modelo físico baseado na Força de Lorentz, proveniente de duas situações independentes conforme ilustra a figura 23. Observa-se na figura 23(a), que representa a contribuição da Força de Lorentz proveniente do fio de cobre, no caso, uma força  $\vec{F}$  é criada pela corrente elétrica,  $i_{AC}$ , quando esta percorre um elemento infinitesimal de fio,  $\vec{dl}$ , na presença de um vetor indução magnética  $\vec{B}$ , que

nos leva à um campo magnético  $H_{DC}$ . Essa constatação está fundamentada na teoria da força magnética sobre um fio condutor transportando uma corrente elétrica [52]. Na figura 23(b) que é a representação esquemática para a segunda contribuição, que são as Correntes de Foucault, que surgem no eletrodo sempre quando o mesmo estiver imerso em um campo magnético  $h_{AC}$  [52]. No caso dessa geometria, a Força de Lorentz produzida pela Corrente de Foucault é praticamente desprezível, uma vez que a área que contém o eletrodo é muito pequena se comparada a geometria dos sensores SCM-SD. Em ambas as situações haverá uma deformação mecânica no elemento piezolétrico, gerando uma resposta ME. A tensão elétrica ( $V_s$ ) é então maximizada quando  $i_{AC}$  é sintonizada na frequência de ressonância ME.

Foram fabricados e analisados seis sensores SCM-SR utilizando elementos de cerâmica piezolétrica retangular com um fio de cobre enrolado em forma de bobina, como ilustrado na figura 24. Todos os seis sensores foram feitos com elementos piezolétricos PZT-5A polarizados na direção da largura ( $w$ ), e bobinas de fio de cobre AWG31.

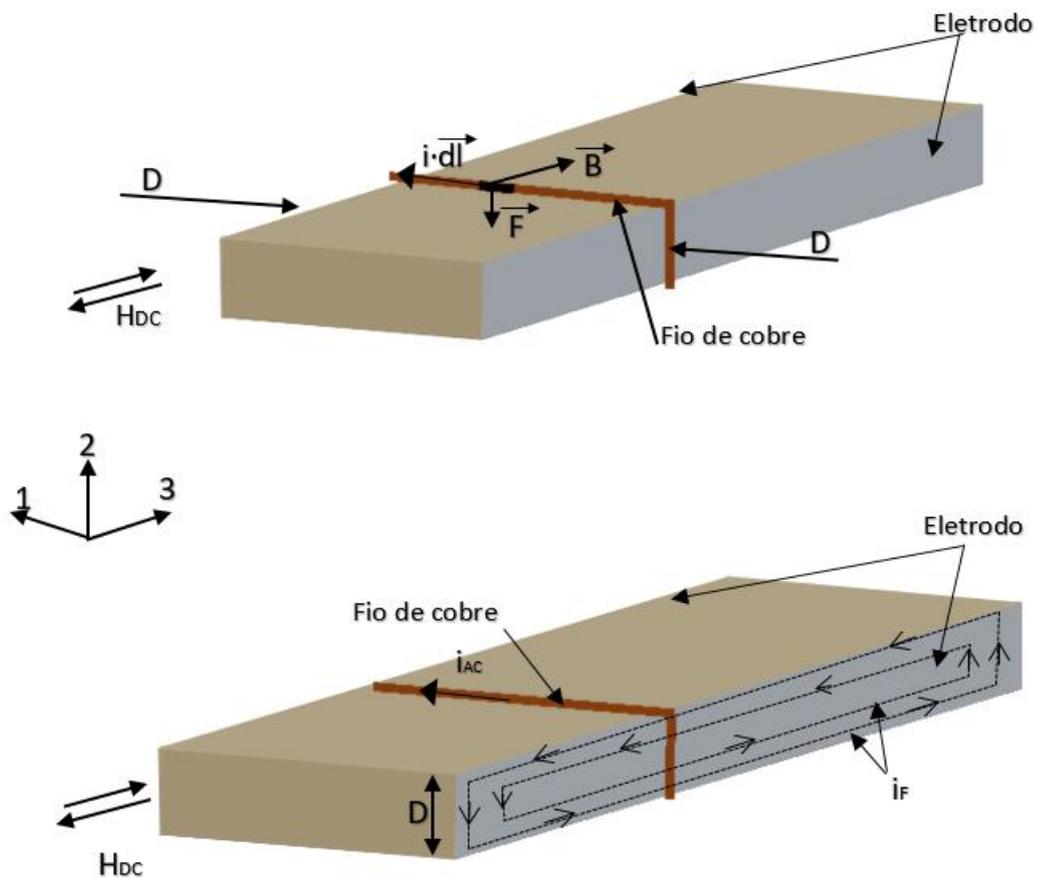


Figura 23: Representação do princípio físico de funcionamento dos sensores retangulares. Deformação gerada por Força de Lorentz produzida (a) pelo fio de cobre e (b) pelas correntes de Foucault.

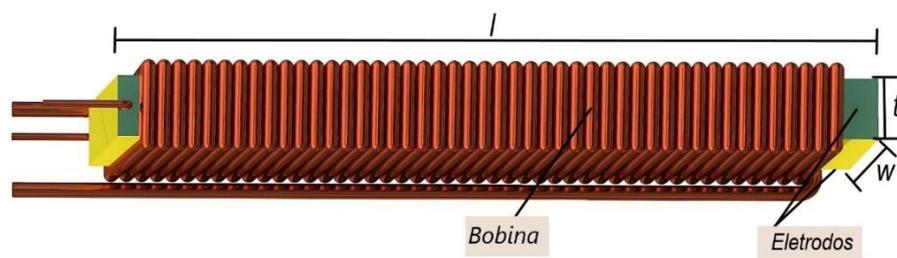


Figura 24: Representação esquemática do sensor de campo magnético retangular (SCM-SR) com a bobina anexada ao elemento piezelétrico PZT-5A.

A tabela 5 lista o comprimento ( $l$ ), a espessura ( $t$ ), a largura ( $w$ ) do material piezelétrico, o número de espiras da bobina ( $N$ ) e indica o modo em que a bobina está disposta sobre o elemento piezelétrico.

Tabela 4: Comprimento, largura, espessura, modo de bobina e número de voltas em cada sensor.

Sensor	$l$ (cm)	$w$ (cm)	$t$ (cm)	Modo	N
1	1,00	4,50	0,80	Bobina fixa	23
2	1,25	4,50	0,80	Bobina fixa	29
3	1,50	4,50	0,80	Bobina fixa	35
4	2,00	4,50	0,80	Bobina fixa	47
5	2,00	4,50	1,60	Bobina fixa	47
6	2,00	4,50	0,80	Bobina livre	47

Para os sensores SCM-SR foram analisadas as respostas magnetoelétricas em função do modo de fixação da bobina, espessura e comprimento do elemento piezelétrico. Os cinco primeiros (SCM-SR1-5) foram construídos com a bobina justaposta, e enquanto no último (SCM-SR6) a bobina foi afastada do elemento piezelétrico, conforme ilustra a figura 25.

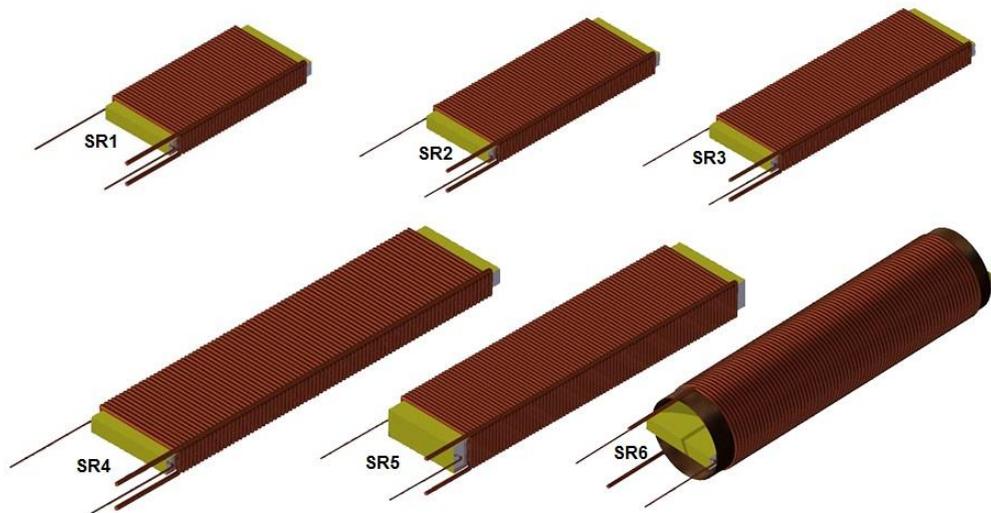


Figura 25: Representação dos modelos de sensores retangulares com elementos piezelétricos PZT-5A, SCM-SR1 – 6.

O campo magnético de excitação no material piezelétrico foi gerado pela corrente  $i_{AC}$  que circula na bobina, controlada pelo gerador de funções Agilent (33210A), e medida utilizando um amplificador *Lock-In* (SRS844), por meio de um resistor de teste (resistor *Shunt*). Uma mesma corrente de entrada AC de  $\sim 100$  mA foi garantida para as bobinas de diferentes impedâncias. Logo, o campo magnético

oscilante ( $h_{AC}$ ) será proporcional ao número de espiras da bobina e ao comprimento de cada elemento piezelétrico. Já o campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) foi gerado e controlado pela fonte de corrente/tensão do eletroímã e monitorado por um Gaussímetro, conforme a figura 19.

### 3.3.3 Sensor Tipo Anel (SCM-SA)

Os sensores tipo anel (SCM-SA) foram desenvolvidos utilizando elementos PZT-5A em forma de anel com diâmetro externo,  $\varphi_{ext}$ , de 8 mm e diâmetro interno  $\varphi_{int}$ , de 4mm, conforme ilustra a figura 26. Como os elementos utilizados apresentam polarização no modo espessura e possuem 2 mm de espessura cada um, foi necessário sobrepor em série dois e três elementos piezelétricos para obter o SA2 e SA3, respectivamente. Desse modo, o primeiro sensor SCM-SA, possui um único elemento piezelétrico; o segundo dois elementos e o terceiro três elementos empilhados e acoplados, respectivamente, o sensor SCM-SA1, o sensor SCM-SA2 e o sensor SCM-SA3.

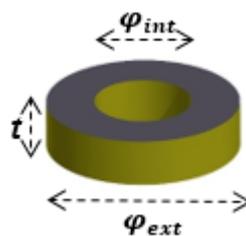


Figura 26: Representação dos elementos utilizados para a construção dos sensores SCM-SA com 2, 4 e 6 mm de espessura.

Nesse grupo de sensores analisamos a resposta ME em função da espessura do elemento piezelétrico, variando-se de 2 a 6 mm a espessura do elemento, conforme ilustra a tabela 5.

Tabela 5: Diâmetro externo ( $\varphi_{ext}$ ) e interno ( $\varphi_{int}$ ) do elemento piezelétrico, o diâmetro do fio de cobre ( $\varphi_{fio}$ ), espessura do sensor ( $t_{sensor}$ ), comprimento da bobina ( $L_{bobina}$ ) e o número de espiras da bobina (N), de cada sensor SCM-SA.

Sensor	$\varphi_{ext}$ (mm)	$\varphi_{int}$ (mm)	$\varphi_{fio}$ (mm)	$t_{sensor}$ (mm)	$L_{bobina}$ (mm)	N
1	8	4	0,23	2	1,6	7
2	8	4	0,23	4	3,2	14
3	8	4	0,23	6	4,8	21

Para os sensores SCM-SA a bobina de excitação também foi construída utilizando fio de cobre AWG31, enrolada justaposta ao elemento piezelétrico. Além disso, em todos os sensores SCM-SA foram respeitados o sentido do enrolamento, para obter a mesma orientação do  $h_{AC}$  e a mesma direção e sentido de polarização nos empilhamentos dos elementos cerâmicos dos sensores SA2 e SA3. A figura 27 ilustra uma representação esquemática dos três sensores após construídos.

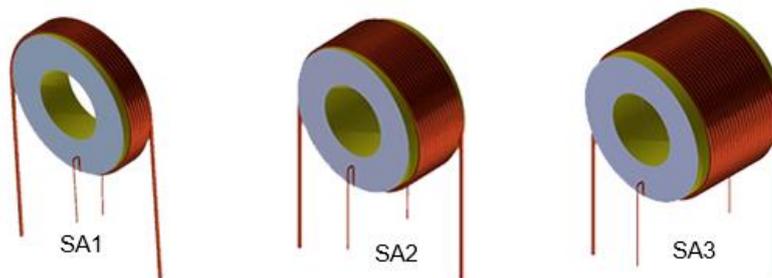


Figura 27: Representação da construção dos sensores tipo anel com elementos piezelétricos PZT-5A. Um elemento, SCM-SA1, dois elementos, SCM-SA2, e três elementos, SCM-SA3.

Os sensores SCM-SA foram projetados para otimizar seu funcionamento com base na combinação entre Força de Lorentz no eletrodo e ou Força de Lorentz na espira da bobina, conforme esquematizado na figura 28. Nessa disposição, o campo magnético oscilante induz corrente elétrica de Foucault na face condutora, em meio a campos magnéticos contínuos ( $H_{DC}$ ), essas correntes geram uma Força de Lorentz radial resultante na face condutora, induzindo uma tensão mecânica periódica na face do piezelétrico e, conseqüentemente, induzindo uma polarização por meio do efeito piezelétrico direto [ 53 ], assim como nos sensores contruídos com elementos piezelétricos em forma de disco. Além dessa contibuição, a Força de Lorentz produzida na espira da bobina, devido ao campo  $H_{DC}$ , e a corrente elétrica passando

na espira justaposta do anel, essa Força gera uma tensão mecânica no elemento piezelétrico, assim como nos sensores SCM-SR.

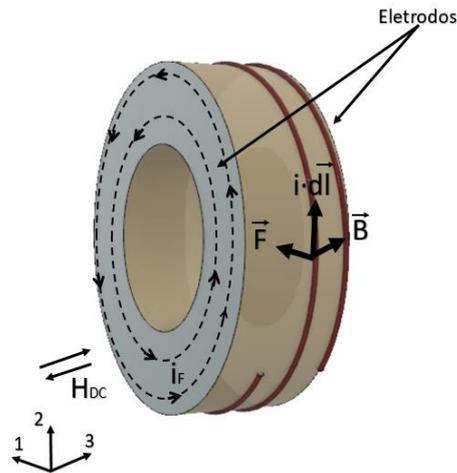


Figura 28: Representação do princípio físico de funcionamento dos sensores anel. Deformação gerada por Força de Lorentz do fio de cobre e pelas correntes de Foucault.

De modo geral, podemos dizer que o princípio físico de funcionamento dos sensores SCM-SA é uma combinação do princípio físico de funcionamento dos sensores tipo disco e retangular. A resposta magnetoelétrica (ME) em função da espessura foi analisada aplicando nos três sensores SCM-SA uma corrente elétrica alternada ( $i_{AC}$ ) na bobina justaposta, gerada pelo gerador de funções Agilent 33210A, e medida pelo amplificador *Lock-In* (SRS844). Para tanto, foi aplicada uma mesma corrente elétrica para as três bobinas. Já o campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) foi gerado e controlado pela fonte de corrente/tensão do eletroímã e monitorado por um Gaussímetro.

### 3.3.4 Sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico (SCM-MP)

Os sensores do grupo II, SCM-MP, são sensores mais robustos e mais interessantes, porém são mais complexos na sua constituição. Conforme já definido, os sensores SCM-MP foram construídos com elementos PZT-5A, entrepostos a dois elementos do material  $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,92}$  (Terfenol-D). Esses elementos de PZT-5A são

considerados bons transdutores e o elementos de Terfenol-D são altamente magnetostritivos, juntos podem apresentar uma resposta ME grande.

Um elemento de PZT-5A com 12 mm de comprimento, 6 mm de largura e 1,2 mm espessura, polarizado no modo transversal (T), foi intercalado por dois elementos magnetostritivos de Terfenol-D, com sentido de magnetização longitudinal (L), formando assim o sensor SCM-MP (Terfenol-D/PZT/Terfenol D), em uma combinação  $L_m-T_p-L_m$ , conforme ilustra a figura 29.

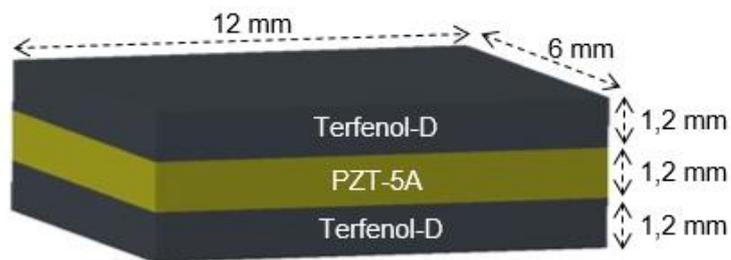


Figura 29: Elementos de Terfenol-D sobrepondo um elemento Piezelétrico, PZT-5A.

Os elementos magnetostritivos e piezelétrico foram colados com resina epóxi Araldite® Hobby e devidamente envolvidos por um fio de cobre (AWG31) formando uma bobina perpendicular à direção dos elementos, conforme ilustra a figura 30.

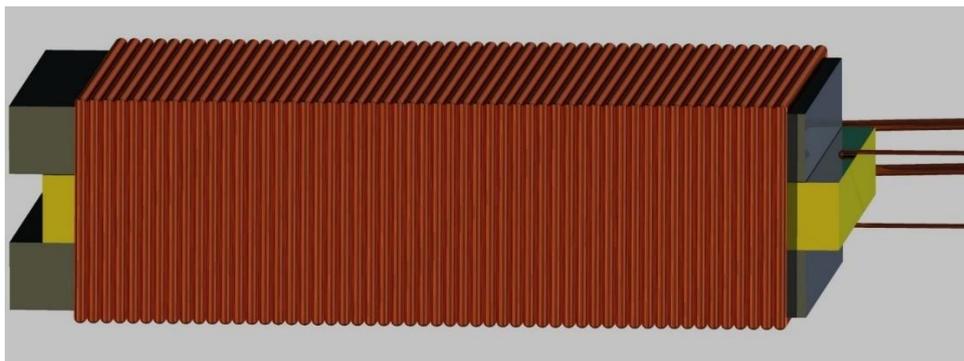


Figura 30: Representação da construção do sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico: um elemento piezelétrico PZT-5A entreposto a dois elementos magnetostritivo Terfenol-D.

Um campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ) foi gerado por uma corrente elétrica de 1,5 mA circulando na espira e controlada pelo gerador de funções Agilent (33210A). A diferença de fase entre o campo  $h_{AC}$  (sinal do gerador) e o sinal de saída ( $V_s$ ) sensor

foi medido usando um amplificador Lock-In (SRS844). Já o campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) a ser medido foi gerado e controlado pela fonte de corrente/tensão do eletroímã e monitorado por um Gaussímetro.

Inicialmente o  $h_{AC}$  gera no material magnetostritivo do SCM uma deformação mecânica na mesma frequência da corrente elétrica da bobina. Quando o sensor SCM-MP se encontra em meio a um campo externo  $H_{DC}$  que possui a mesma direção da magnetização do Terfenol-D, há uma interação entre o campo  $H_{DC}$  e o campo  $h_{AC}$ , capaz de alterar a deformação do material magnetostritivo, deformar mecanicamente o composto piezelétrico e gerar uma resposta ME. Quando a frequência é a frequência de ressonância ME do sensor SCM-MP, a resposta ME em função de um campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) é máxima. Além disso, foi analisado a influência da bobina justaposta ou não, deixando-a afastada milimetricamente dos elementos e assim livre da Força de Lorentz produzida pelas espiras. Para ambos os casos, foram respeitadas as mesmas condições de campo  $h_{AC}$  e  $H_{DC}$ .

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 3 apresentamos as configurações experimentais dos protótipos de SCM caracterizados nesta tese. Vamos agora apresentar os resultados para os vários tipos de sensores desenvolvidos do grupo I (SCM-SD, SCM-SR e SCM-SA), que utilizam materiais piezelétricos PZT-5A, e do grupo II, que são os sensores SCM-MP, formado por materiais magnetostritivos e materiais piezelétrico. Para ambos os grupos, temos as caracterizações em campo magnético contínuo,  $H_{DC}$ , se deram pela configuração apresentada na figura 19. Os resultados deste capítulo enfatizam a caracterização dos SCM, com relação à frequência de ressonância ME ( $f_{ME}$ ), à resposta ME em tensão elétrica ( $V_s$ ) e coeficiente de tensão ME ( $\alpha_V^*$ ). Por fim, o capítulo se encerra com aplicações utilizando o sensor SCM-MP de forma passiva para construir uma ponta medidora de corrente elétrica alternada em condutores retilíneos, de forma não invasiva. Para tanto, uma nova configuração será apresentada para medidas de campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) e também corrente elétrica alternada ( $I_{AC}$ ).

### 4.1. Sensor Tipo Disco (SCM-SD)

Ao analisarmos um elemento piezelétrico tipo disco, tendo em vista apenas suas propriedades elétricas, vemos que ele se comporta como um circuito RLC em série com um capacitor em paralelo. Esse circuito pode ser descrito pela parte real (condutância,  $G$ ) e imaginária (susceptância,  $B$ ) da admitância complexa. Desta forma, os três elementos piezelétricos idênticos utilizados na construção dos sensores SCM-SD podem ter suas propriedades elétricas caracterizadas pelas medidas de condutância e susceptância em função da frequência. A resposta de um desses elementos é apresentada na figura 31, que ilustra um pico de ressonância piezelétrica próximo de 192 kHz. Tal medida foi importante para determinamos a frequência de

ressonância piezelétrica do elemento, antes e depois das inserções das conexões, cabos e fixações.

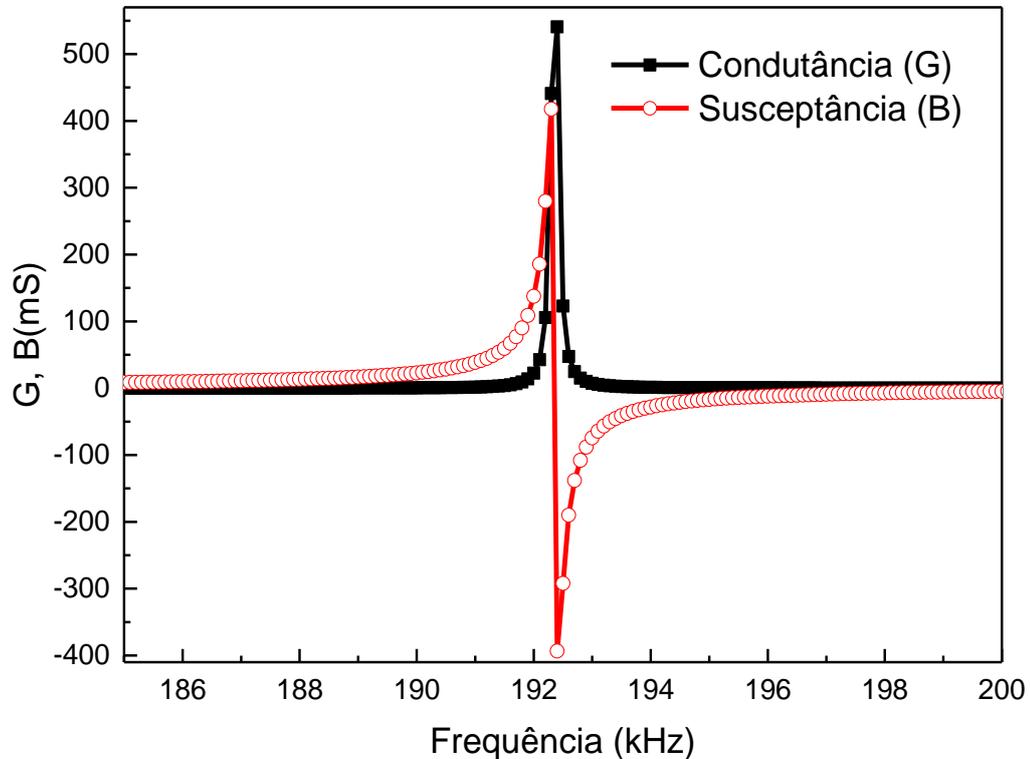


Figura 31: Condutância, G, e Susceptância, B, em função da frequência de ressonância de um dos elementos piezelétrico.

Além disso, medimos a impedância de cada uma das bobinas em função da frequência, destacando seus valores, para a região da frequência de ressonância ME, conforme ilustrado na figura 31. Para investigar a resposta ME em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ), as bobinas dos sensores SCM-SD foram submetidas a uma corrente elétrica,  $i_{AC}$ , (na frequência de ressonância ME) iguais para todas as bobinas. Para tanto, o potencial elétrico aplicado foi de 7,80  $V_{pp}$ , 8,06  $V_{pp}$  e 8,90  $V_{pp}$  entre os terminais da bobina do sensor SCM-SD1, SCM-SD2 e SCM-SD3, respectivamente.

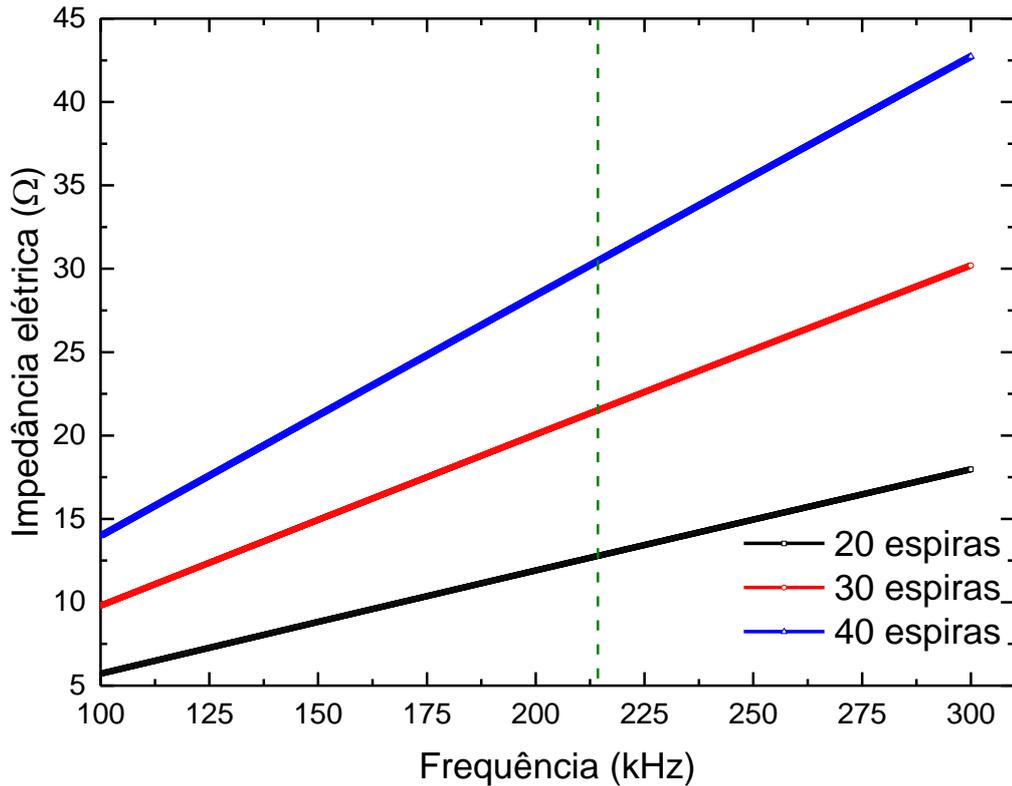


Figura 32: Impedância ( $Z$ ) em função da frequência, para as bobinas de 20, 30 e 40 espiras. A reta vertical indica o valor da impedância na frequência de ressonância magnetoelétrica do sensor SCM-SD ( $\approx 215$  kHz).

Considerando que o campo magnético oscilante não é uniforme no interior da bobina, e sendo  $h_{AC} = B_x$ , da equação A5 (Anexo), obtida por meio da lei de Biot Savart e Ampère, obtivemos a seguinte relação para o campo magnético produzido pela bobina ( $h_{AC}$ ) [52],

$$h_{AC} = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i \cdot a^2}{2 \cdot (x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (32)$$

em que, “ $i$ ” é a corrente elétrica na bobina, “ $a$ ” é o raio da bobina, “ $x$ ” é a distância de uma extremidade a outra da bobina e  $N$  é o número de espiras. Como podemos ver, na expressão 32  $h_{AC}$  depende da distância  $x$ . Ou seja, assim o a intensidade do campo  $h_{AC}$ , calculada em função da distância dentro de cada bobina está ilustrada no gráfico da figura 33.

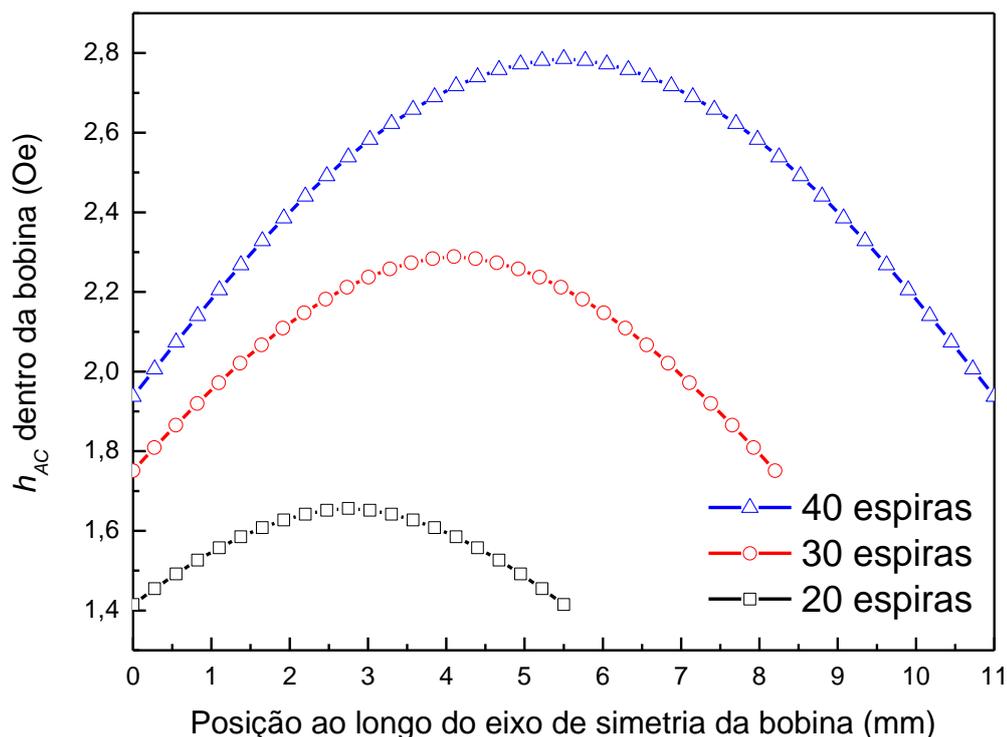


Figura 33: Campo magnético alternado (calculado) em função da posição ao longo do eixo de simetria da bobina. Simulação realizada para bobina: 20 espiras - 5,5 mm, 30 espiras - 8,2 mm e 40 espiras - 11 mm.

Levando em consideração que todas as bobinas foram submetidas a uma corrente elétrica alternada ( $i_{AC}$ ) constante de 100 mA, nota-se no gráfico da figura 33, que a intensidade do  $h_{AC}$  é maior no centro da bobina do que nas extremidades do eixo de simetria. A tabela 6 lista as características dos sensores e a intensidade do  $h_{AC}$  para o sensor SCM-SD1, 2 e 3.

Tabela 6: Diâmetro do elemento piezelétrico, diâmetro da bobina, o diâmetro do fio de cobre, espessura do elemento piezelétrico, comprimento de cada bobina e o número de espiras da bobina e  $h_{AC}$  no centro de cada bobina, de cada sensor tipo disco.

Sensor	$\varphi_{\text{elemento}}$ (mm)	$\varphi_{\text{bobina}}$ (mm)	$\varphi_{\text{fio}}$ (mm)	$t_{\text{elemento}}$ (mm)	$L_{\text{bobina}}$ (mm)	N	$h_{AC}$ (Oe) ( $x=0$ )
1	12,2	15	0,23	0,5	5,5	20	1,67
2	12,2	15	0,23	0,5	8,2	30	2,51
3	12,2	15	0,23	0,5	11,0	40	3,35

Realizamos a caracterização da resposta ME para cada sensor SCM-SD por meio de um programa de aquisição de dados registrando a resposta ME em função

do  $H_{DC}$ , usando a configuração apresentada na figura 19, sob a ação de um campo magnético contínuo,  $H_{DC}$ , de 0 a 2 kOe. Em meio a esse campo  $H_{DC}$  e à temperatura ambiente (300 K) foram posicionados os sensores SCM-SD. A aquisição dos dados possibilitou a construção dos gráficos da tensão elétrica ( $V_s$ ) em função da intensidade do  $H_{DC}$ . Esse procedimento foi repetido três vezes, deslocando o elemento piezelétrico em forma de disco dentro da bobina (sobre seu eixo de simetria) em três posições: extremidade à esquerda, centro e extremidade à direita. As respostas de cada posição, são apresentadas respectivamente, nas figuras 34, 35 e 36.

Comparando o gráfico das figuras 34, 35 e 36 nota-se que  $V_s$  é diretamente proporcional ao  $h_{AC}$ , visto que,  $h_{AC-SD3} > h_{AC-SD2} > h_{AC-SD1}$ . Analisando o gráfico da figura 35 nota-se que a tensão elétrica ( $V_s$ ) é maior quando o elemento piezelétrico em forma de disco se localiza no centro da bobina. Mas quando o elemento piezelétrico se encontra na extremidade esquerda ou direita do eixo de simetria da bobina, a resposta de  $V_s$  é praticamente a mesma, como ilustrado nos gráficos das figuras 34 a 36.

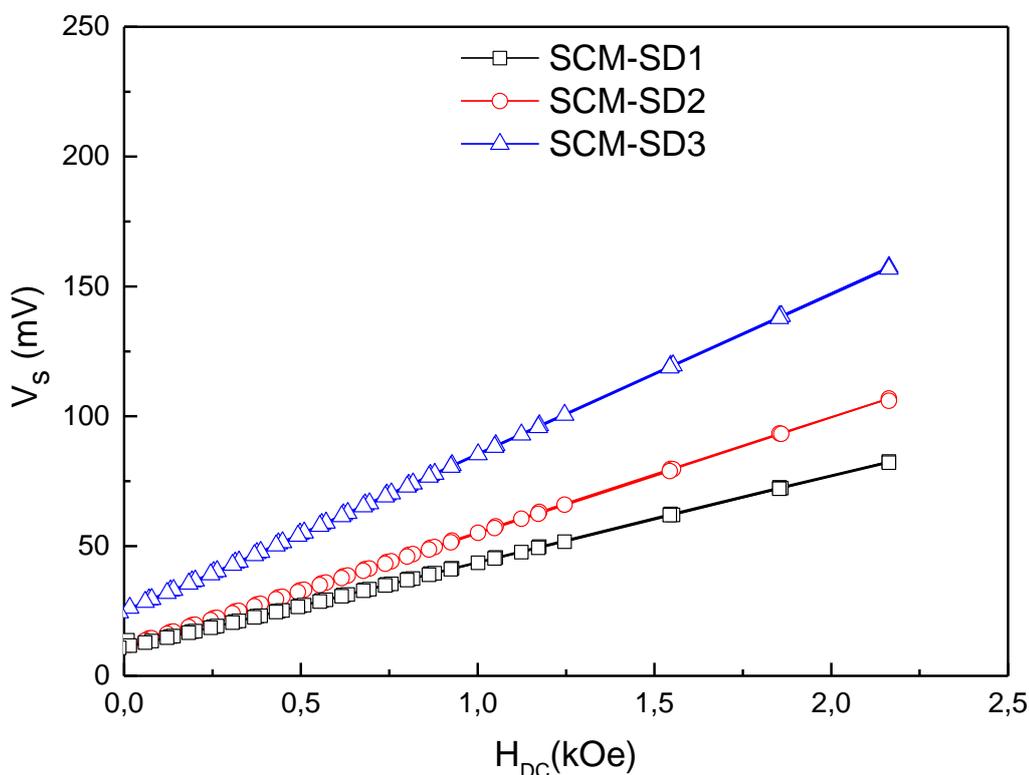


Figura 34: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para a frequência de ressonância igual a 215 kHz. Material PZT-5A na extremidade à direita da bobina.

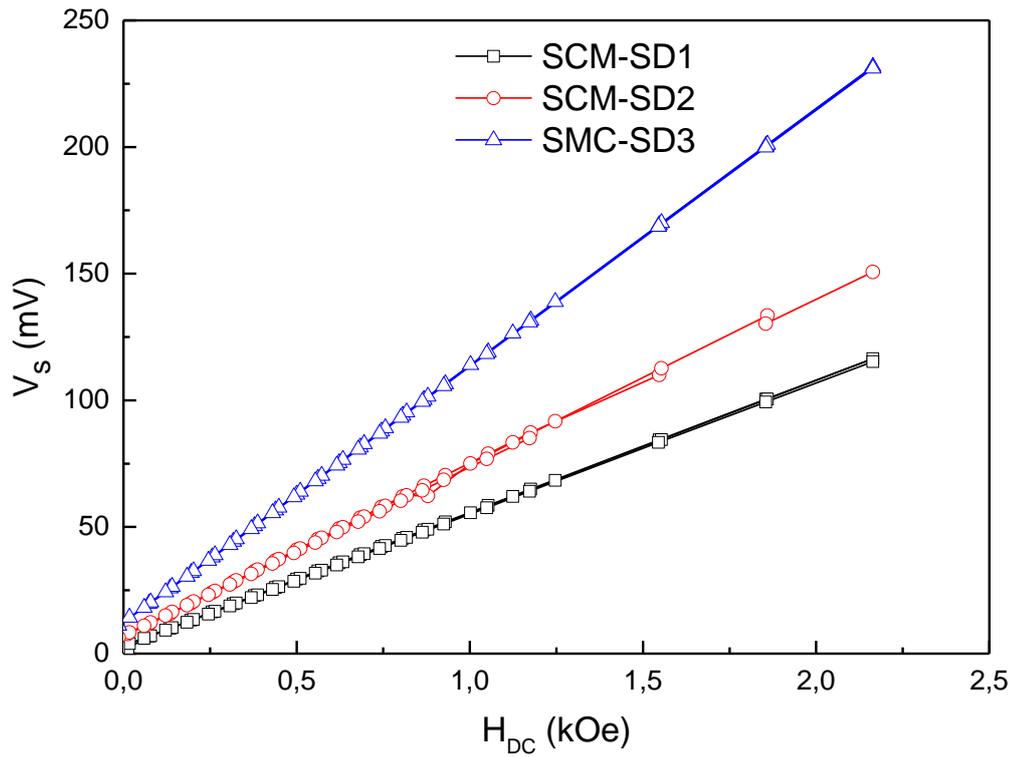


Figura 35: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para a frequência de ressonância igual 215 kHz. Material PZT-5A no centro da bobina.

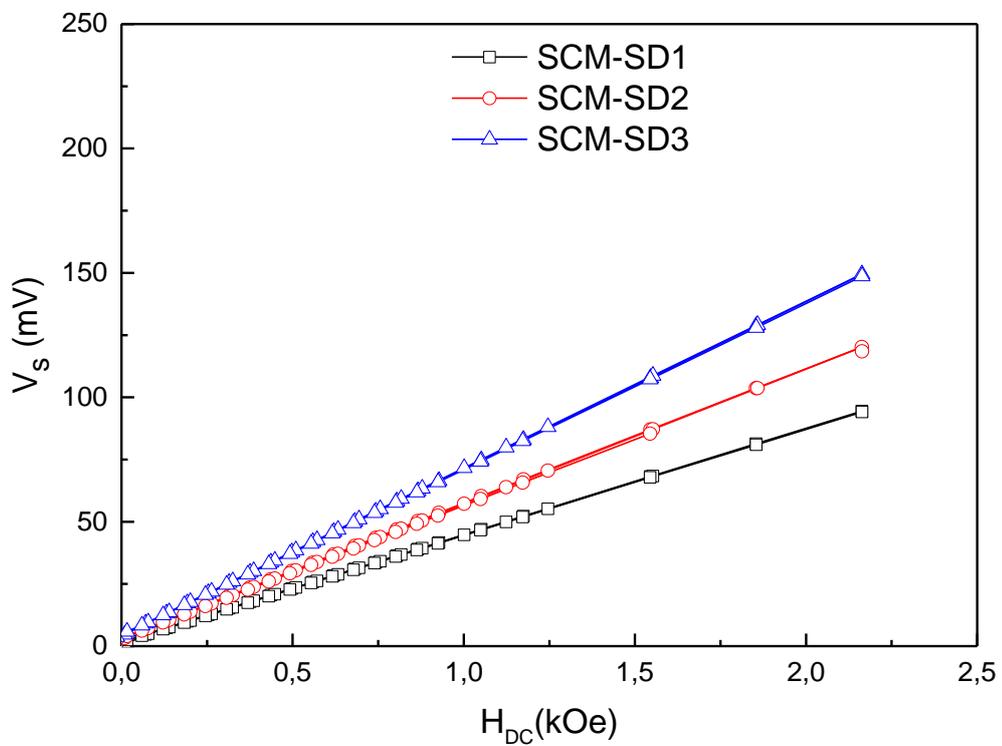


Figura 36: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para a frequência de ressonância igual a 215 kHz. Material PZT-5A na extremidade à esquerda da bobina.

Na figura 37, podemos observar a resposta da tensão elétrica ( $V_s$ ) e campo magnético oscilante ( $h_{AC}$ ), em função da corrente alternada ( $i_{AC}$ ), para um intervalo de 30 a 120 mA, em cada bobina.

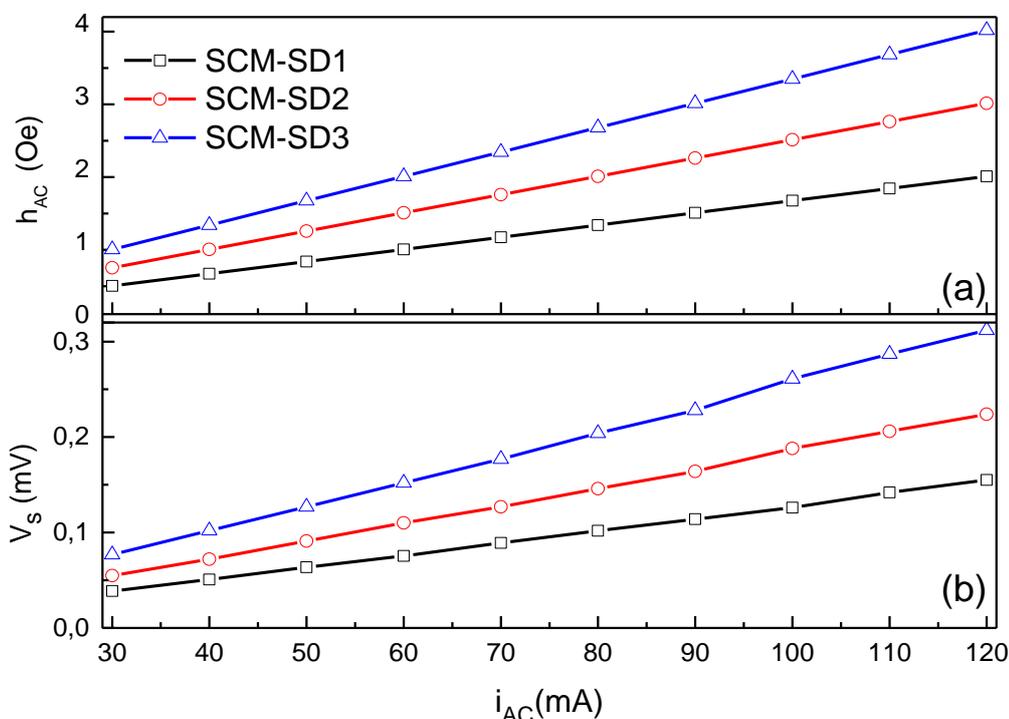


Figura 37: **(a)** Campo magnético oscilante,  $h_{AC}$ , em função da corrente elétrica na bobina, ( $i_{AC}$ ) e campo magnético,  $H_{DC}$  fixo de 0,6 kOe; **(b)** Tensão elétrica em função da corrente elétrica na bobina, ( $i_{AC}$ ), na frequência de ressonância igual a 215 kHz, para o sensor SCM-SD1, 2 e 3.

O gráfico da figura 37(a) ilustra claramente o comportamento linear do campo magnético oscilante,  $h_{AC}$ , em função da corrente elétrica alternada,  $i_{AC}$ , que circula em cada bobina. Com um  $H_{DC}$  igual a 0,6 kOe, verifica-se a linearidade na resposta da tensão elétrica ( $V_s$ ) em função da corrente elétrica nas bobinas. Conforme ilustrado na figura 37(b), a tensão elétrica ( $V_s$ ) gerada é diretamente proporcional a corrente elétrica aplicada na bobina.

Uma vez verificado que  $V_s$  é maior na condição central da bobina, podemos ainda expressar essa resposta de forma normalizada em V/Oe, ou seja: a tensão elétrica de saída (mV) dividida pelo campo magnético da bobina ( $h_{AC}$ ), definindo o coeficiente ME  $\beta(h_{AC})$  escrito na forma:

$$\beta = \frac{V_s}{h_{AC}} \left[ \frac{mV}{Oe} \right] \quad (33)$$

no qual  $h_{AC}$  foi determinado pela equação (32) no centro de cada bobina, e o valor de  $V_s$  foi obtido a partir do gráfico da figura 37. O comportamento do  $\beta$  em função de  $H_{DC}$  para os três sensores SCM-SD, está ilustrado no gráfico da figura 38.

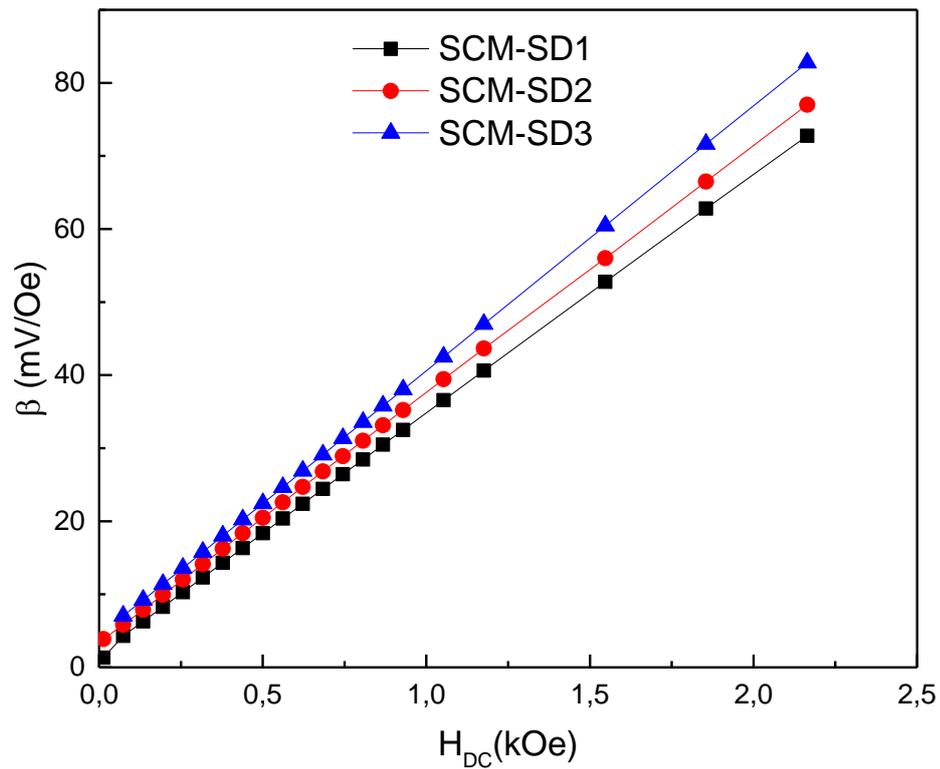


Figura 38: Coeficiente ME ( $\beta$ ) em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ). Tomando  $h_{AC}$  para o centro de cada bobina.

Por fim, utilizando a equação (31), dada por:  $\alpha_V^* = \frac{V_s [V]}{i_{AC} [A] \cdot H_{DC} [Oe]}$ , e tomando como resposta ME o valor de  $V_s$  do gráfico da figura 35, determinamos o coeficiente ME,  $\alpha_V^*$ , para os três sensores.

Os resultados dos coeficientes ME estão dispostos na tabela 7.

Tabela 7: Coeficientes ME,  $\alpha_V^*$ , para os sensores SCM-SD1, 2 e 3.

Sensor	$\alpha_V^*$ (mV/A. Oe)
SCM-SD1	0,60
SCM-SD2	0,75
SCM-SD3	1,15

Os resultados apresentados mostraram que o sensor SCM-SD3 apresentou o melhor valor para os coeficientes  $\beta$  e  $\alpha_V^*$ . O coeficiente  $\beta$  nos leva a concluir que mesmo utilizando elementos piezelétricos e corrente elétrica iguais nas bobinas, teremos coeficientes diferentes em função da intensidade  $h_{AC}$  ser diferente. Essa diferença é condição necessária para o sensor funcionar. Já o coeficiente  $\alpha_V^*$ , nos ajuda a quantificar o quando será obtido de resposta Vs em função do campo  $H_{DC}$ , sem se importar como o sensor SCM-SD foi construído. Comparado com outros trabalhos, que apresentam valores de  $\alpha_V^*$  mais expressivos (30 a 1600 mV/(Oe.A)) os sensores SCM-SD possuem um coeficiente de tensão ME muito baixo.

## 4.2. Sensor Tipo Retangular (SCM-SR)

Utilizando elementos piezelétricos PZT-5A, de geometria retangular, foram construídos seis sensores SCM-SR (1-5 e posteriormente o sensor SCM-SR6), cujas características geométricas e a intensidade do  $h_{AC}$  são apresentadas na tabela 8. O campo magnético da bobina ( $h_{AC}$ ) nesse caso, foi calculado pela equação A10 (Anexo).

Tabela 8: Comprimento, largura, espessura, modo de bobina e número de voltas em cada sensor.

Sensor	$l$ (cm)	$w$ (cm)	$t$ (cm)	Modo	N	$h_{AC}$ (Oe)
SCM-SR1	1,00	4,50	0,80	Bobina fixa	23	2,88
SCM-SR2	1,25	4,50	0,80	Bobina fixa	29	2,91
SCM-SR3	1,50	4,50	0,80	Bobina fixa	35	2,94
SCM-SR4	2,00	4,50	0,80	Bobina fixa	47	2,95
SCM-SR5	2,00	4,50	1,60	Bobina fixa	47	---
SCM-SR6	2,00	4,50	0,80	Bobina livre	47	---

Os sensores SCM-SR foram caracterizados em relação ao comprimento e espessura do elemento piezolétrico e posicionamento da bobina. Os elementos do material PZT-5A utilizados têm polarização na direção da largura (4,5 mm). Para as medidas do sensor SCM-SR mantivemos constante o  $h_{AC}$ , fixando a corrente alternada em aproximadamente 100 mA e monitoramos a impedância da bobina, que nesse caso foi praticamente constante.

Primeiramente, os sensores SCM-SR1, 2, 3 e 4, foram submetidos a testes de resposta em frequência, para se determinar a frequência de ressonância ME de cada um deles. O procedimento seguiu a mesma configuração da figura 19 e campo  $H_{DC}$  fixo em 1,0 kOe, em temperatura ambiente. A tensão elétrica (Vs) nos eletrodos do elemento piezolétrico foi registada em função da frequência ( $f$ ). Analisando a figura 39, nota-se, uma frequência de ressonância ME ( $f_{ME}$ ) próxima de 34 kHz. Nem sempre a frequência de ressonância ME do conjunto será a mesma frequência de ressonância piezolétrica do elemento isolado (neste caso, 400 kHz), como podemos observar no gráfico da figura 40, no qual o pico de ressonância piezolétrica ( $f_r$ ) ocorre entre 400 kHz sem a bobina e 300 kHz com bobina, bem diferente da  $f_{ME}$ , que a frequência que maximiza a resposta ME, como observado na figura 39. Desse modo, observamos que a bobina manteve sua impedância praticamente constante na frequência de ressonância de cada sensor SCM-SR.

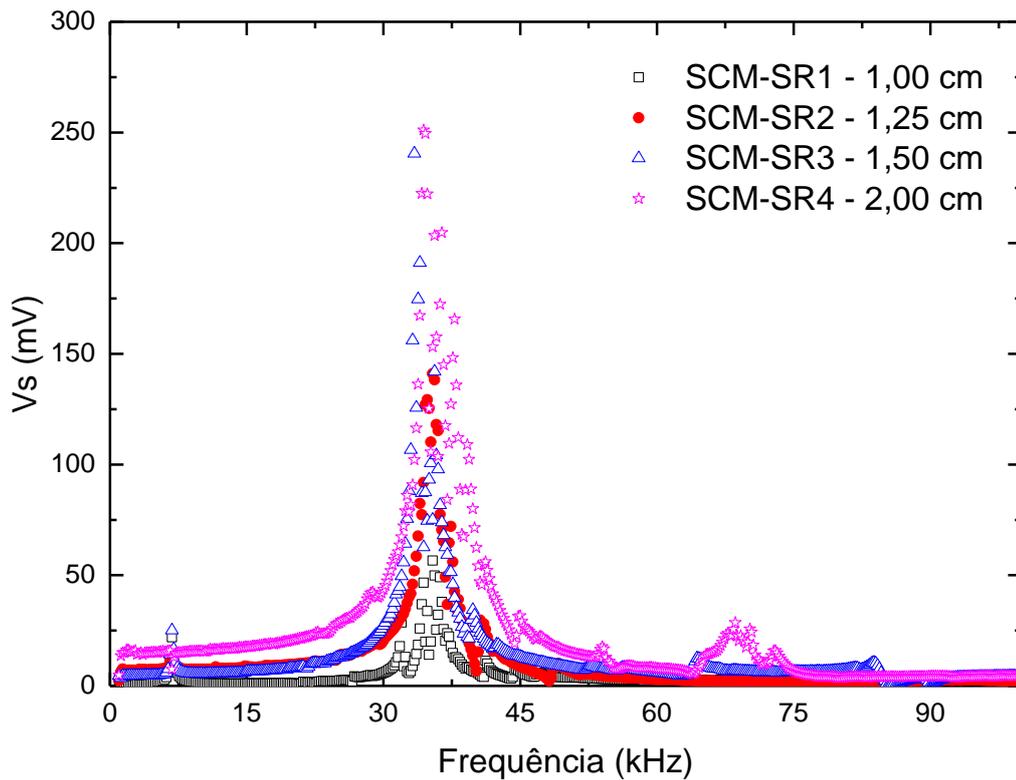


Figura 39: Tensão elétrica ( $V_s$ ) em função da frequência, para os sensores SCM-SR1, 2, 3 e 4, submetidos a um campo magnético contínuo de 1 kOe.

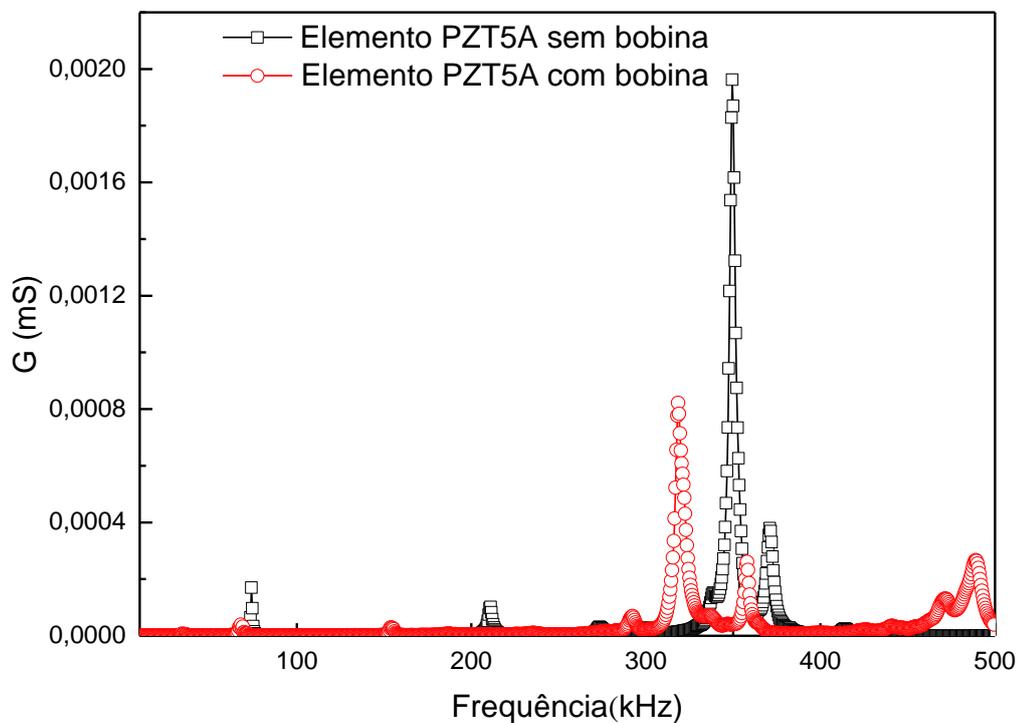


Figura 40: Condutância elétrica ( $G$ ) em função da frequência para um elemento piezoeletrico PZT-5A de geometria retangular, com e sem bobina enrolada no elemento.

Vemos ainda que se compararmos  $f_{ME}$  do sensor SCM-SR4, da figura 39, com  $f_r$  do elemento piezolétrico da figura 40, veremos que  $f_{ME} \ll f_r$ , então podemos concluir que a  $f_{ME}$  surge sobre condições predominantemente de uma interação entre o campo  $H_{DC}$  que se deseja medir e a corrente elétrica que circula a espira da bobina. Como esperado, essa interação, tensiona o fio da bobina por meio da Força de Lorentz, que por sua vez, gera uma deformação mecânica na  $f_{ME}$ . Os resultados dos sensores SCM-SR mostram que esta diferença na frequência se torna ainda mais evidente devido as características geométricas e do modo de polarização na direção da largura do elemento piezolétrico.

Ao analisar a resposta da condutância (G) ou admitância (B) do elemento piezolétrico sem bobina obtemos informações importantes verificando cuidadosamente a intensidade dessa resposta antes e depois de enrolar a bobina justaposta ao redor do elemento. No gráfico da figura 40 nota-se que sem ou com bobina justaposta há pouca alteração na frequência  $f_r$ . O enrolamento simplesmente limita o elemento com relação a sua deformação mecânica, e por isso a intensidade do pico de condutância no gráfico da figura 40 é menor para um elemento de PZT-5A com bobina do que um elemento sem bobina. Nesse caso, o enrolamento de fios de cobre dificulta a deformação mecânica do material, pois com uma massa maior limitamos a deformação do elemento piezolétrico do SCM.

Como descrito na metodologia dos sensores SCM-SR, a respostas desses sensores dependem da bobina justaposta. Para identificar essa dependência no princípio de funcionamento dos sensores vamos comparar a resposta ME do sensor SCM-SR4, cuja bobina se encontra justaposta, com o sensor SCM-SR6, cuja bobina se encontra livre do elemento piezolétrico. A figura 41, apresenta a resposta ME referente a tensão elétrica para os sensores SCM-SR4 e SCM-SR6 em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) em um intervalo de 0 a 1 kOe. Note que a intensidade da tensão elétrica aumenta linearmente com o  $H_{DC}$ , para o sensor SCM-SR4 e permanece constante próximo de zero para o sensor SCM-SR6. Diante desses resultados podemos concluir que haverá uma tensão elétrica nos eletrodos do elemento piezolétrico somente quando o sensor SCM-SR for construído com a bobina justaposta ao elemento, maximizando a resposta ME quando a tensão mecânica produzida no elemento piezolétrico for modulada na  $f_{ME}$ . Além disso, tanto o sensor SCM-SR4 quanto o sensor SCM-SR6 possuem uma pequena área coberta com

eletrodo, assim, a intensidade das correntes de Foucault será minimizada, assim como a Força de Lorentz, a ponto de a tensão elétrica gerada nos eletrodos ser praticamente zero para o sensor SCM-SR6.

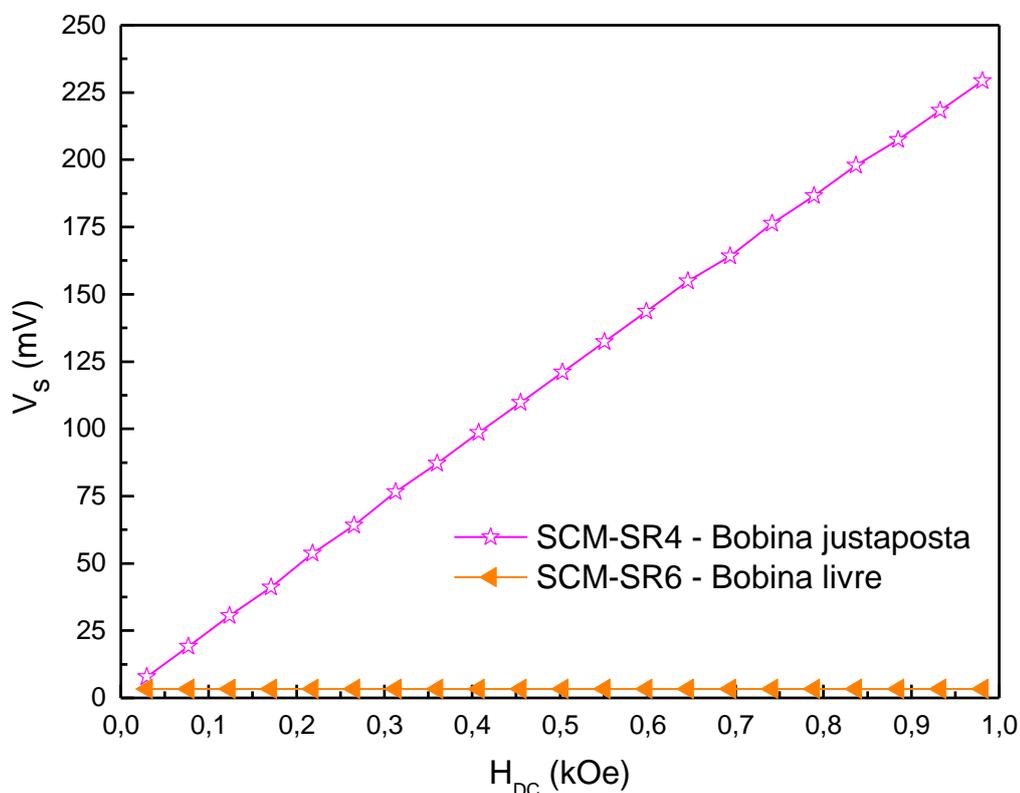


Figura 41: Tensão elétrica em função do campo magnético, para os sensores SCM-SR4 – bobina justaposta e SCM-SR6 – bobina livre. Corrente elétrica ( $i_{AC}$ ) constante de 100 mA e  $f_{ME} \cong 34$  kHz.

Das observações levantadas até agora fica claro que o princípio de funcionamento dos sensores SCM-SR está fundamentado na Força de Lorentz, parcialmente do fio de cobre sobre o elemento piezelétrico e das correntes de Foucault. Porém, essas correntes são muito baixas, seu efeito pode ser desprezado. Para uma melhor elucidação construímos um novo sensor, denominado sensor SCM-SR5, e fizemos as mesmas caracterizações do sensor SCM-SR4, mantendo as mesmas condições de corrente elétrica na bobina e  $H_{DC}$ . As medidas para os sensores SCM-SR5 e SCM-SR4 são apresentadas na figura 42. Vemos que a intensidade da tensão elétrica do sensor SCM-SR5 é menor que a do sensor SCM-SR4. Isso se deve ao fato de que o elemento utilizado para construir o SR5 possui o dobro de espessura

do elemento utilizado em SR4, apresentando mais massa e deformando menos e consequentemente respondendo com menor intensidade.

Por fim, a resposta ME foi analisada em função do comprimento dos elementos piezelétricos. Para isso aplicamos as mesmas condições iniciais de corrente elétrica na bobina e os mesmos  $H_{DC}$ , de modo que os sensores SCM-SR1, 2, 3 e 4, foram submetidos a um campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ) no intervalo de 0 a 1kOe. A figura 45 ilustra a resposta da tensão elétrica para cada sensor em função do campo  $H_{DC}$  enquanto que a figura inserida na figura 43 ilustra a mesma resposta normalizada pelo comprimento de cada elemento piezelétrico.

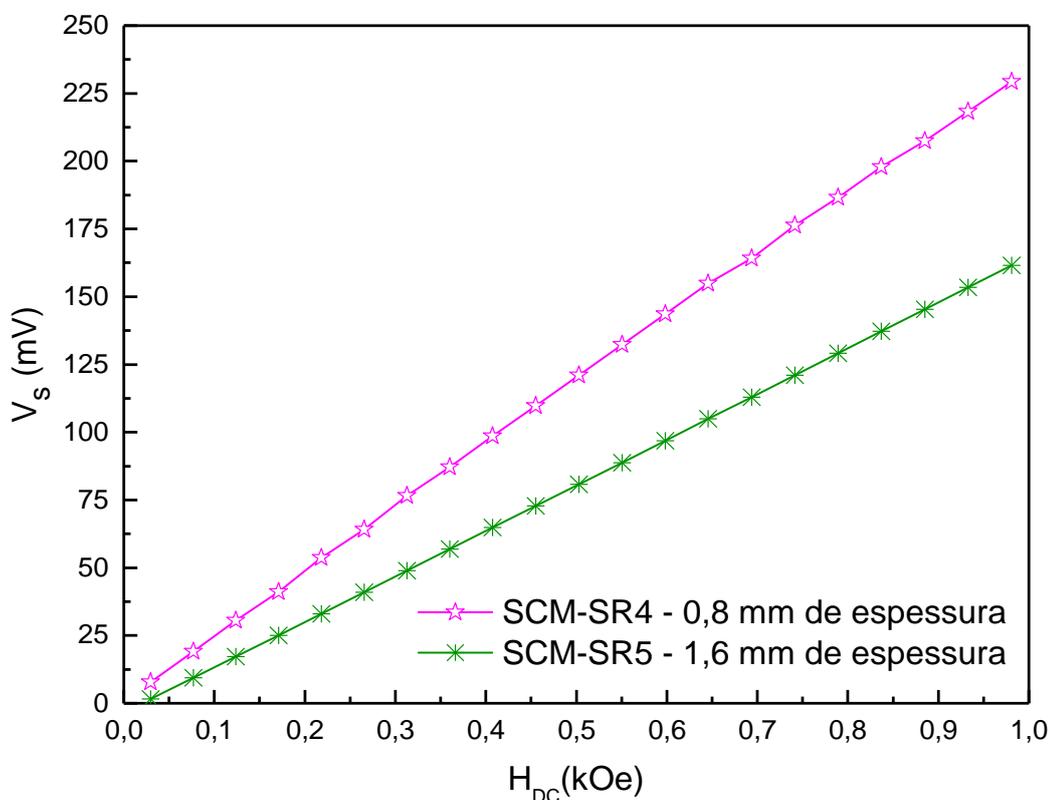


Figura 42: Tensão elétrica em função do campo, para os sensores SCM-SR4 – 0,8 mm de espessura e SCM-SR5 – 1,6 mm de espessura. Corrente elétrica ( $i_{AC}$ ) de 100 mA e  $f_{ME} \cong 34$  kHz.

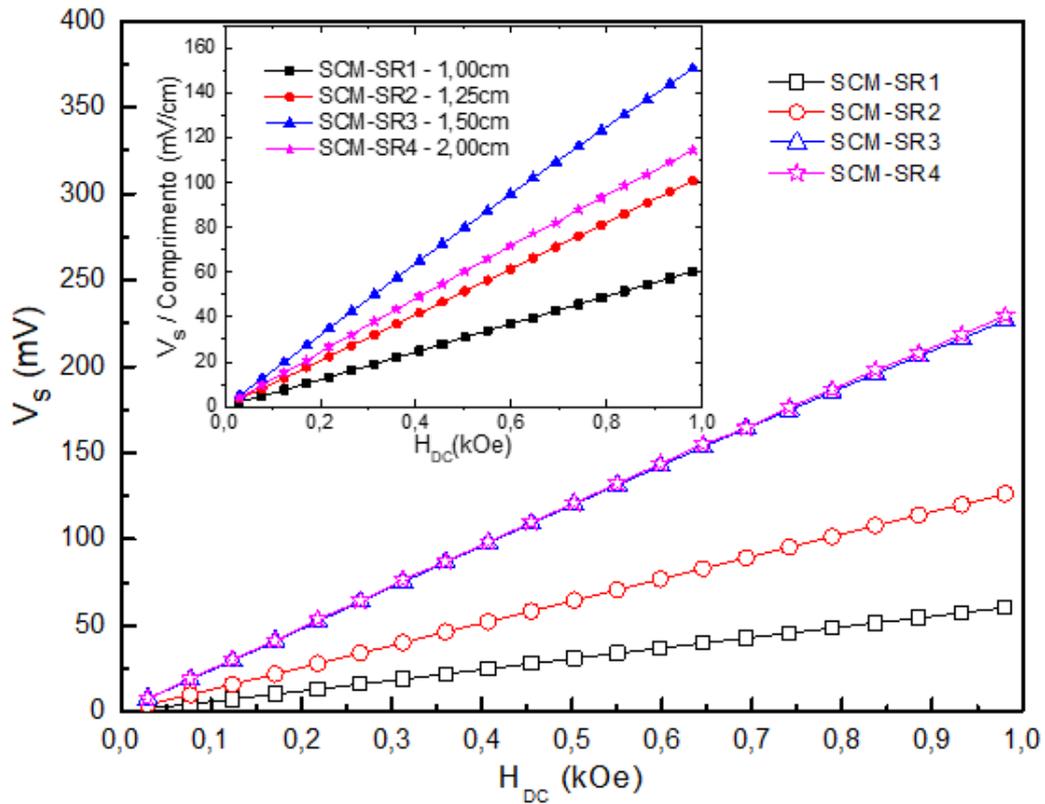


Figura 43: Tensão elétrica em função do campo, para os sensores de diferentes comprimentos, SCM-SR1 – 10 mm, SCM-SR2 – 12,5 mm, SCM-SR3 – 15 mm e SCM-SR4 – 20 mm. Corrente elétrica ( $i_{AC}$ ) de 100 mA e  $f_{ME} \cong 34\text{kHz}$ .

Em ambos os casos, nota-se uma resposta linear com inclinação que cresce com o aumento do comprimento até o sensor SCM-SR3 e depois diminui para o sensor SCM-SR4. Ou seja, à medida que o comprimento do elemento piezelétrico de cada sensor SCM-SR aumenta, a intensidade da tensão elétrica também aumenta. Porém, até um certo valor limite, pois para comprimentos maiores de 15 mm (1,5 cm) há uma saturação no valor de  $V_s$ . Para tentar entender esse comportamento, vamos analisar o coeficiente  $\beta_{ME}$ , utilizando a equação 33 e os valores de  $V_s$  do gráfico da figura 43 para o campo  $h_{AC}$  de cada sensor. O resultado está ilustrado pelo gráfico da figura 44. Como o campo magnético  $h_{AC}$  (Tabela 8) é praticamente constante observamos um comportamento idêntico aos resultados apresentados no gráfico da figura 43, o que nos leva a concluir que as características geométricas da bobina justaposta ( $n^\circ$  de espiras) não alteram a forma com que o sensor SCM-SR responde magneto-eletricamente. Para nos certificarmos disso, vamos agora determinar o coeficiente  $\alpha_V^*$ .

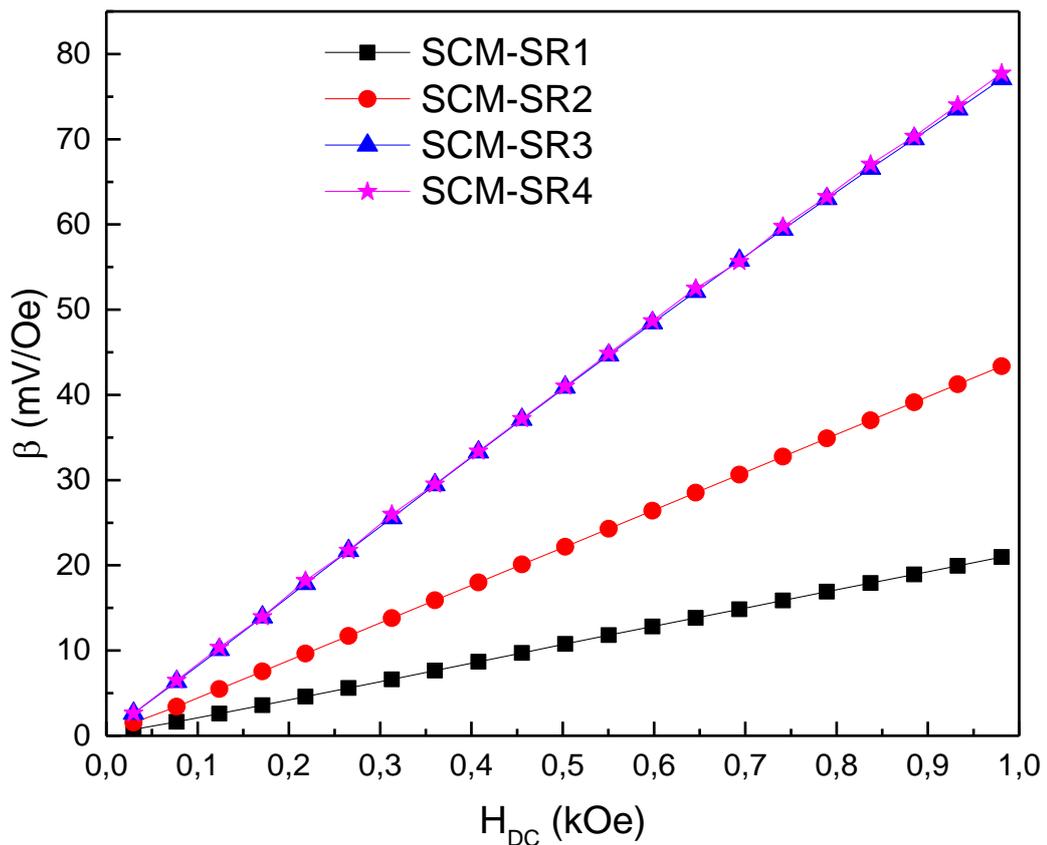


Figura 44: Coeficiente ME  $\beta$  em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ). Tomando  $h_{AC}$  para o centro de cada bobina.

Usando  $V_s$  obtido do gráfico da figura 43, e a equação (31),  $\alpha_V^* = \frac{V_s [V]}{i_{AC} [A] \cdot H_{DC} [Oe]}$ , obtivemos os valores do coeficiente ME,  $\alpha_V^*$ , que estão ilustrados no quadro inserido na figura 45.

Os resultados mostram que os sensores SCM-SR3 e SCM-SR4 apresentaram coeficientes  $\alpha_V^*$  muito próximos, de modo que os sensores foram normalizados em função do comprimento ( $L$ ), dos elementos piezelétricos de cada sensor. O comportamento do coeficiente  $\alpha_V^*$  normalizado em função do comprimento está ilustrado na figura 45. É interessante notar que o sensor SCM-SR3 apresenta o maior coeficiente  $\alpha_V^*$ .

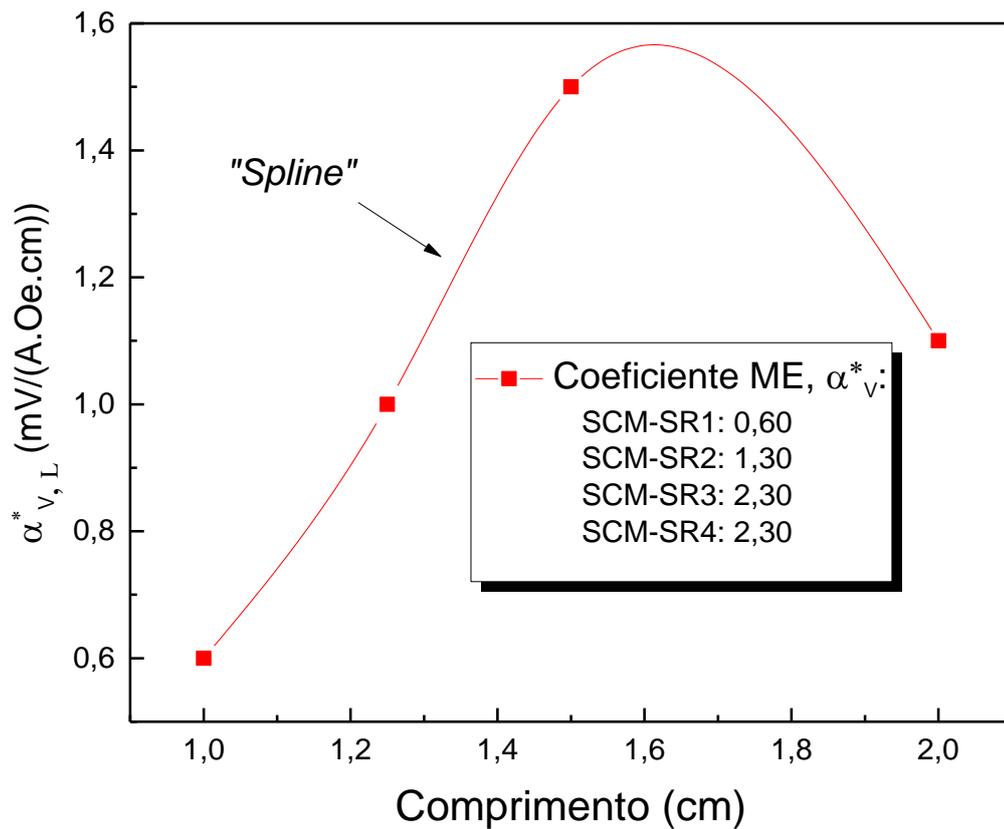


Figura 45: Coeficiente de tensão ME ( $\alpha_{V,L}^*$ ) de cada sensor em função do comprimento (cm) do elemento piezelétrico.

Os resultados organizados no quadro da figura 45 evidencia que, para essa categoria de sensores, os parâmetros geométricos do material piezelétrico, como por exemplo, comprimento e espessura, são os responsáveis por alterar o valor do coeficiente  $\alpha_{V,L}^*$ .

### 4.3. Sensor Tipo Anel (SCM-SA)

Para a geometria tipo anel foram construídos três sensores: SCM-SA1, SCM-SA2 e SCM-SA3, de espessuras, 2 mm, 4mm e 6 mm, respectivamente, e diâmetro externo,  $\varphi_{ext}$  de 8 mm e diâmetro interno  $\varphi_{int}$  de 4 mm, conforme ilustrado na figura 46. Os elementos piezelétricos PZT - 5A em formato de anel possuem eletrodos metálicos em suas superfícies e direção de polarização no modo espessura.

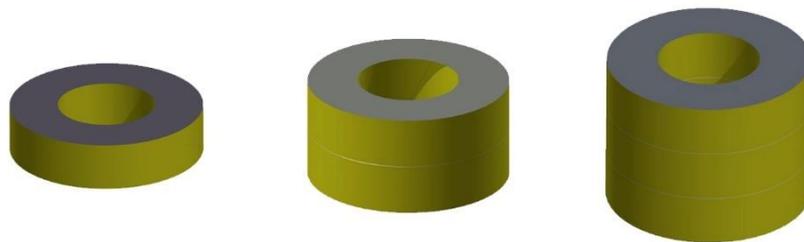


Figura 46: Elementos cerâmicos piezelétrico PZT5-A tipo anel, de espessuras, 2 mm, 4 mm e 6 mm, respectivamente.

A construção desse modelo de sensor foi motivada pela geometria dos elementos piezelétricos e por serem mais espessos, o que possibilitou envolvê-los por uma bobina justaposta. O sensor SCM-SA é um sensor que depende da Força de Lorentz, devido as correntes de Foucault, combinada com a tensão mecânica exercida pelo fio de cobre. Logo os sensores SCM-SA combinam os princípios físicos dos sensores SCM-SD e SCM-SR. Como nos demais sensores descritos até agora, uma parcela da Força de Lorentz surge quando elemento piezelétrico envolvido por uma bobina justaposta ao anel que se encontra em meio a um  $H_{DC}$  perpendicularmente ao plano do anel. A resposta ME para  $V_s$ , é maximizada quando a corrente elétrica da bobina se encontra na frequência de ressonância magnetoelétrica.

As caracterizações pertinentes para os sensores SCM-SA foram realizadas usando o mesmo padrão aplicado nos sensores SCM-SD e SCM-SR, conforme ilustrado na figura 19 (da metodologia). Primeiramente, foi analisada a resposta ME em função da frequência, considerando um  $H_{DC}$  fixo de 0,5 kOe e depois, em função de um  $H_{DC}$  variável, de 0 a 1,0 kOe na frequência de ressonância magnetoelétrica e

em temperatura ambiente. A corrente elétrica,  $i_{AC}$ , foi mantida praticamente constante e próxima de 145 mA, enquanto que o campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ) foi calculado com a equação A6 (Anexo). Para facilitar a análise e a comparação das características de cada sensor organizamos os dados conforme segue na tabela 9.

Tabela 9: Diâmetro externo e interno do elemento piezelétrico, o diâmetro do fio de cobre, espessura do elemento piezelétrico, comprimento da bobina e o número de espiras da bobina e campo magnético da bobina ( $h_{AC}$ ), de cada sensor SCM-SA.

Sensor	$\varphi_{ext}$ (mm)	$\varphi_{int}$ (mm)	$\varphi_{fio}$ (mm)	$t_{elemento}$ (mm)	$L_{bobina}$ (mm)	N	$h_{AC}$ (Oe)
SCM-SA1	8	4	0,23	2	1,6	7	1,54
SCM-SA2	8	4	0,23	4	3,2	14	3,22
SCM-SA3	8	4	0,23	6	4,8	21	4,83

Primeramente, determinou-se a frequência de ressonância magnetoelétrica ( $f_{ME}$ ). Os resultados estão apresentados na figura 47, na qual se observa que o pico de máxima resposta ME ocorre em frequências específicas para cada sensor SCM-SA. Essa frequência é inversamente proporcional à espessura e, portanto, muda para cada sensor, ou seja,  $f_{ME1} > f_{ME2} > f_{ME3}$ . Os resultados apontaram uma  $f_{ME}$  de 161 kHz, 157 kHz e 151,5 kHz, respectivamente para os sensores SCM-SA1, SCM-SA2 e SCM-SA3. Assim, como nos sensores SCM-SD, os sensores SCM-SA apresentam uma  $f_{ME}$  muito próxima da frequência de ressonância piezelétrica, como está ilustrada na figura 48. Nesse caso, após o enrolamento, vê-se um pequeno deslocamento da frequência piezelétrica para a direita e uma redução na amplitude, que é devida ao elemento receber mais massa e se tornar mais limitado para se deformar.

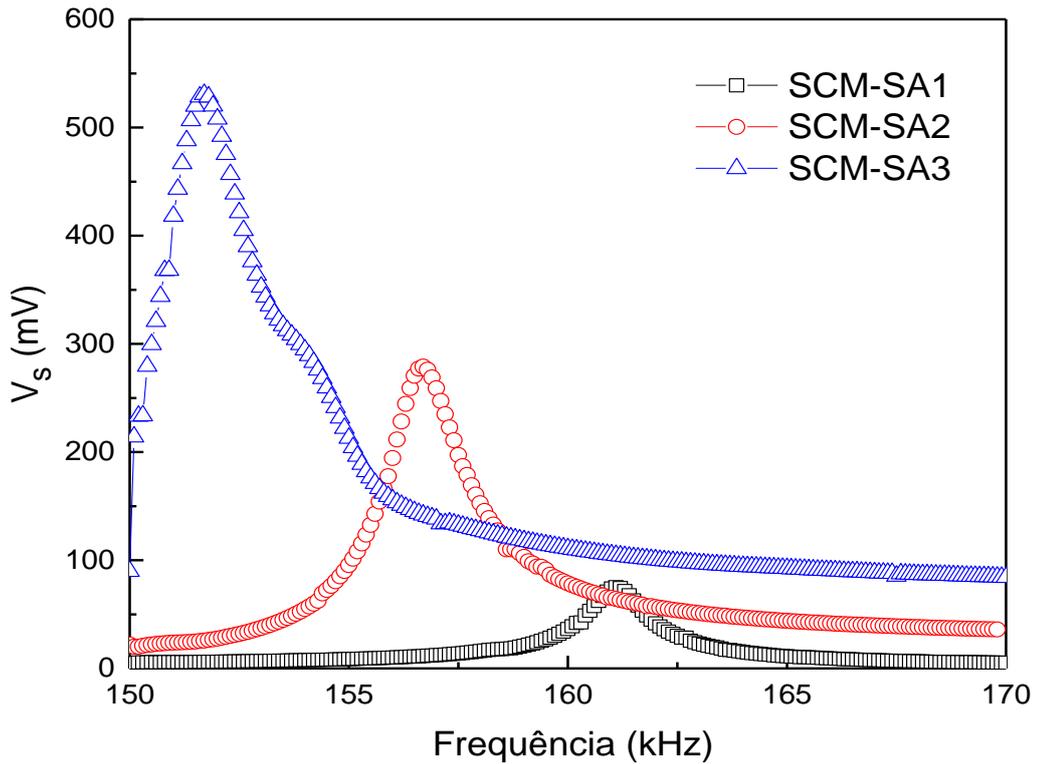


Figura 47: Tensão elétrica em função da frequência, para os três sensores tipo anel, em meio a um campo  $h_{DC}$  de 1 kOe, para os sensores SCM-SA1, 2 e 3.

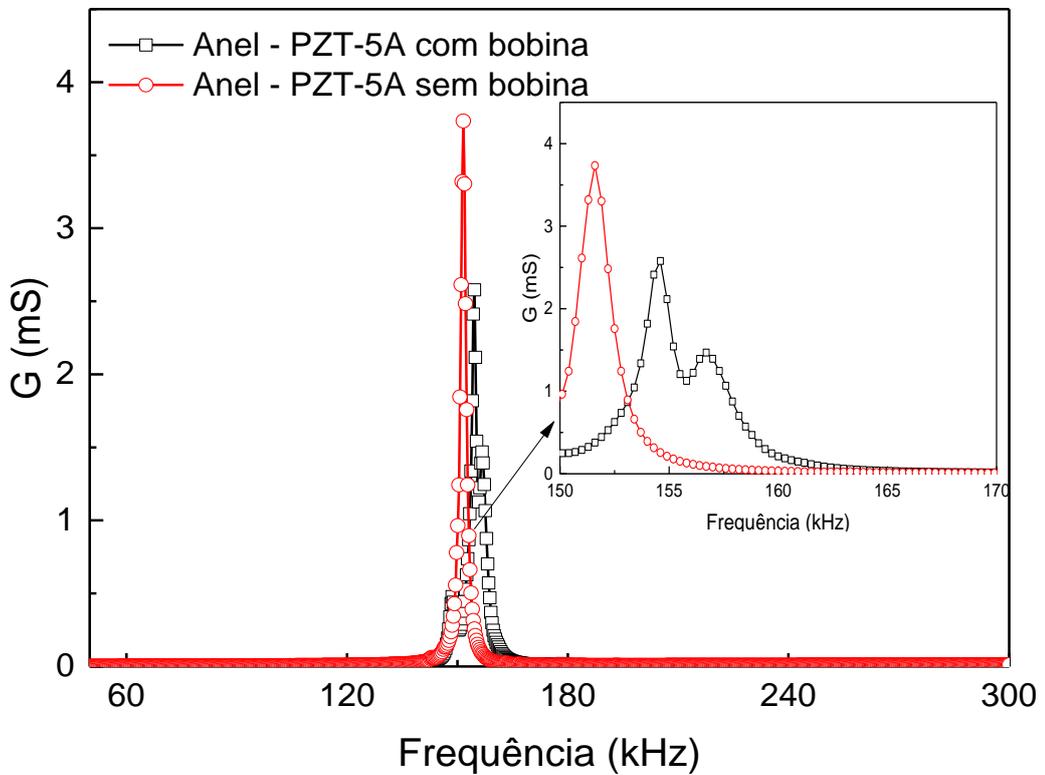


Figura 48: Condutância (G) em função da frequência para um elemento piezelétrico PZT-5A tipo anel com e sem bobina enrolada em seu contorno. No gráfico interno, temos a resposta ampliada.

Analisando a figura 48, fica evidente que a amplitude de  $V_s$  nesse tipo de sensor é diretamente proporcional a espessura, uma vez que,  $V_{s, SCM-SA3} > V_{s, SCM-SA2} > V_{s, SCM-SA1}$ . Porém, este resultado é passivo de uma interrogação, uma vez que essa categoria de sensores apresenta uma tensão elétrica de “*offset*”, pois  $V_s$  inicialmente é diferente de zero, como ilustra o gráfico inserido na figura 49. Considerando essa tensão de “*offset*” e subtraindo a mesma da resposta em cada caso, obtemos três retas normalizadas, como ilustrado no gráfico da figura 49. Serão com esses resultados que determinaremos o coeficiente ME,  $\alpha_V^*$ .

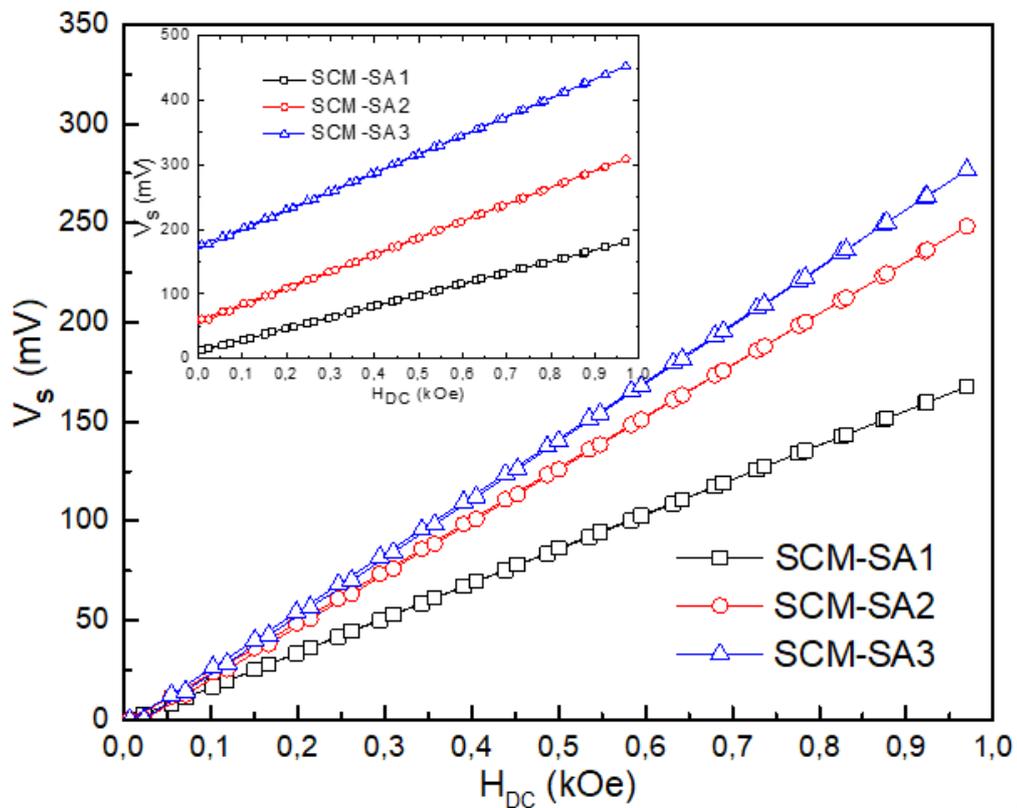


Figura 49: Tensão elétrica em função do campo magnético contínuo para os três sensores sem tensão de *offset*. O gráfico inserido ilustra a resposta de  $V_s$  direto do sensor, para os sensores SCM-SA1, 2 e 3.

Com o resultado de  $V_s$  obtido do gráfico da figura 49, e a equação (31),  $\alpha_V^* = \frac{V_s [V]}{i_{AC} [A] \cdot H_{DC} [Oe]}$ , determinamos o coeficiente  $\alpha_V^*$  para os sensores tipo anel e listamos na tabela 10.

Tabela 10: Coeficientes de tensão ME,  $\alpha_V^*$  para os sensores SCM-SA1, 2 e 3.

Sensor	$\alpha_V^*$ (mV/A. Oe)
SCM-SD1	1,13
SCM-SD2	1,66
SCM-SD3	2,00

Os valores obtidos para  $\alpha_V^*$  nessa categoria de sensores demonstraram que se aumentarmos muito a espessura dos elementos torna-se possível o aumento do valor do campo magnético ( $h_{AC}$ ), pois possibilita um maior número de espiras em torno do elemento piezelétrico e, portanto, um maior coeficiente ME,  $\alpha_V^*$ , como no caso do sensor SCM-SA3. Porém, utilizando a equação (33),  $\beta = \frac{V_s}{h_{AC}} \left[ \frac{mV}{Oe} \right]$  determinamos o coeficiente  $\beta$ , calculando-o em função do campo  $h_{AC}$  e dos valores de  $V_s$  obtidos do gráfico da figura 49. O coeficiente  $\beta$  está ilustrado no gráfico da figura 50. Para nossa surpresa, nos deparamos com uma resposta inversa a resposta do coeficiente  $\alpha_V^*$ . Isso significa que nem sempre ter o maior  $h_{AC}$  implica em ter maior sinal  $V_s$ . O coeficiente  $\beta$  nos ajuda a comprovar isso, pois  $\beta$  é maior para o SA1 e não para SA3, como era o esperado.

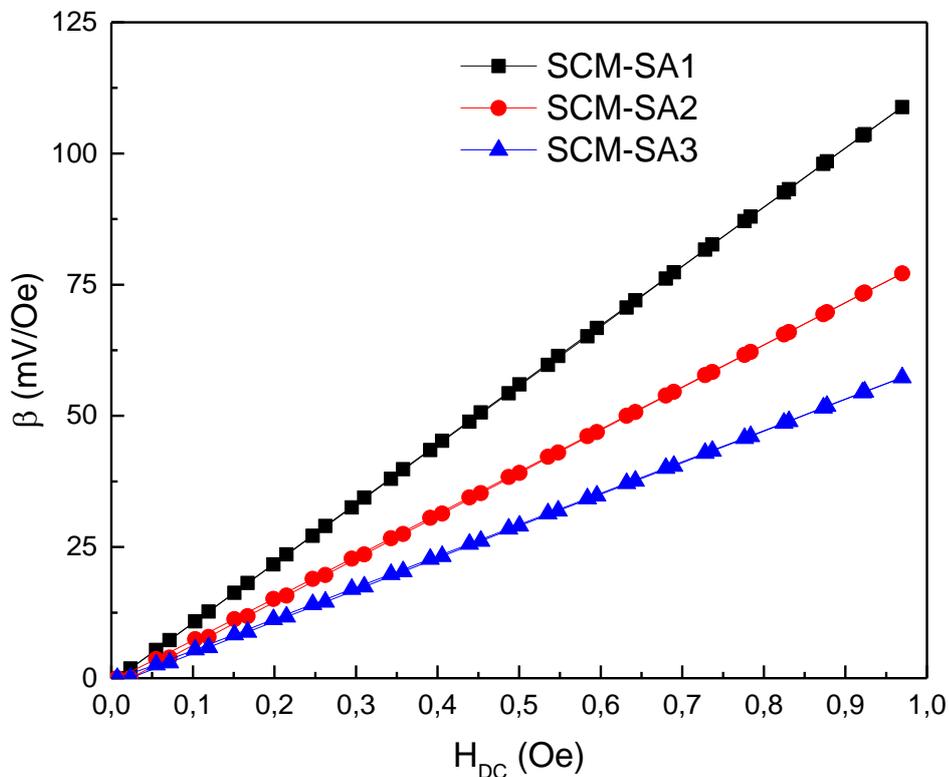


Figura 50: Coeficiente ME  $\beta$ , para um campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ) em função do campo magnético contínuo ( $H_{DC}$ ).

#### 4.4. Sensor Magnetoelétrico/Piezelétrico (SCM-MP)

O sensor magnetoelétrico/piezelétrico (SCM-MP) foi desenvolvido utilizando um elemento PZT-5A, de 12 mm de comprimento, 6 mm de largura e 1,2 mm espessura, polarizado no modo transversal (T), entreposto por dois elementos do compósito Terfenol-D, de mesma dimensão e com magnetização longitudinal (L), formando assim um sensor SCM-MP para campo magnético contínuo, ilustrado na figura 51.

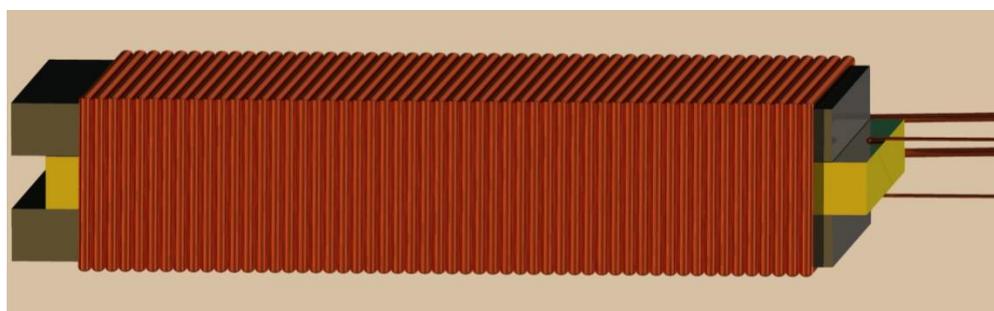


Figura 51: Representação do sensor magnetoelétrico/piezelétrico (Terfenol-D/PZT/Terfenol D), com magnetização longitudinal ( $L_m$ ) e polarização transversal ( $T_p$ ), i.e., a configuração  $L_m$ - $T_p$ - $L_m$ .

As caracterizações pertinentes para o sensor SCM-MP (compósito laminar) foram realizadas usando o mesmo método aplicado nos sensores apresentados até aqui, conforme ilustrado na configuração experimental da figura 19. Por meio desse procedimento foram investigados a frequência de ressonância ME ( $f_{ME}$ ) para  $H_{DC}$  fixo, a resposta de  $V_s$  e do coeficiente ME,  $\alpha_V^*$  em função do  $H_{DC}$ , para a frequência de ressonância magnetoelétrica.

No sensor SCM-MP, cujo o modo de configuração é o  $L_m$ - $T_p$ - $L_m$ , o campo magnético é aplicado paralelamente a direção de magnetização do material magnetostritivo (Terfenol-D) e, por consequência, o mesmo se deforma na mesma direção. A deformação pressiona o material PZT-5A na mesma direção perpendicular. Desse modo, gera no material piezelétrico uma tensão elétrica  $V_s$ . Essa configuração experimental foi escolhida devido à praticidade de montagem, uma vez que os elementos piezelétricos adquiridos já se encontravam polarizados nessa direção. Da mesma forma que os demais sensores, as caracterizações com relação a resposta

ME foram realizadas em temperatura ambiente. O primeiro teste realizado no sensor SCM-MP foi a determinação da resposta ME em relação à fixação da bobina: fixa (justaposta) ou livre, sobre os elementos. Medimos e comparamos a resposta de  $V_s$  para o sensor SCM-MP com a bobina justaposta e depois com a bobina livre, sem tocar nos elementos, mantendo as mesmas características, mesmo número de espiras e mesma corrente  $i_{AC}$  (1,5 mA). A figura 52 ilustra um gráfico que expressa a resposta de  $V_s$  em função do  $H_{DC}$ , para uma frequência  $f_{ME}$  de 101,9 kHz, na condição de bobina livre e de bobina justaposta. Como o Terfenol-D é um material magnetostritivo que possui uma certa histerese magnética, optamos por aplicar um campo  $H_{DC}$  e logo em seguida, retorná-lo ao ponto de partida para analisar o seu comportamento.

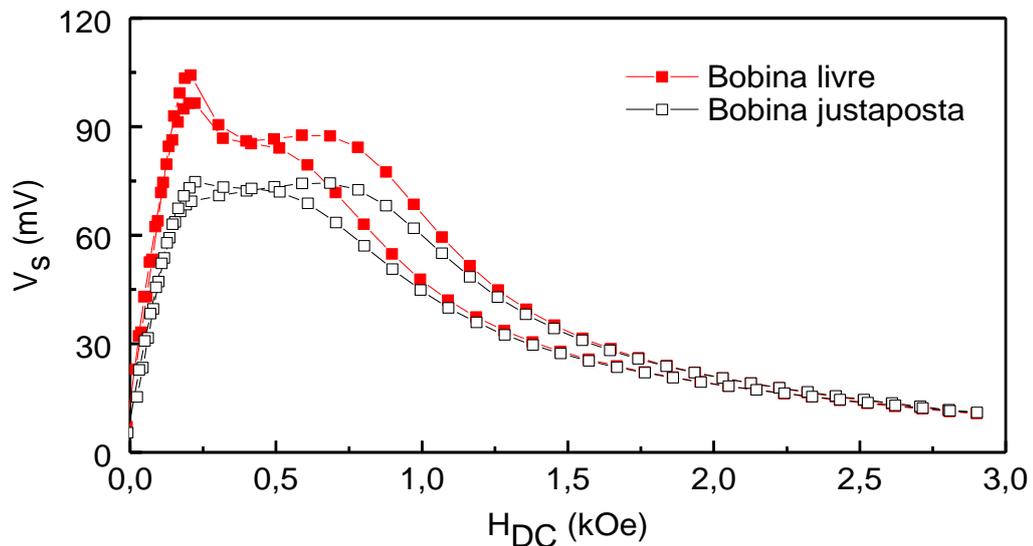


Figura 52: Tensão elétrica em função do campo magnético  $H_{DC}$  (0 a 3 kOe e 0 Oe novamente), para uma frequência  $f_{ME}$  de 101,9 kHz e  $i_{AC}$  de 1,5 mA.

Os resultados para o sensor SCM-MP nos mostram que ele responde melhor quando está livre para se deformar. Portanto, assim seguiremos com as outras análises, com a bobina livre. Na sequência, foi investigado a dependência da  $f_{ME}$  em função do  $H_{DC}$ . Esses resultados são observados na figura 53, no qual o gráfico da figura 53(a) ilustra a resposta  $V_s$  em função da frequência e o gráfico da figura 55(b) a fase em função da frequência.

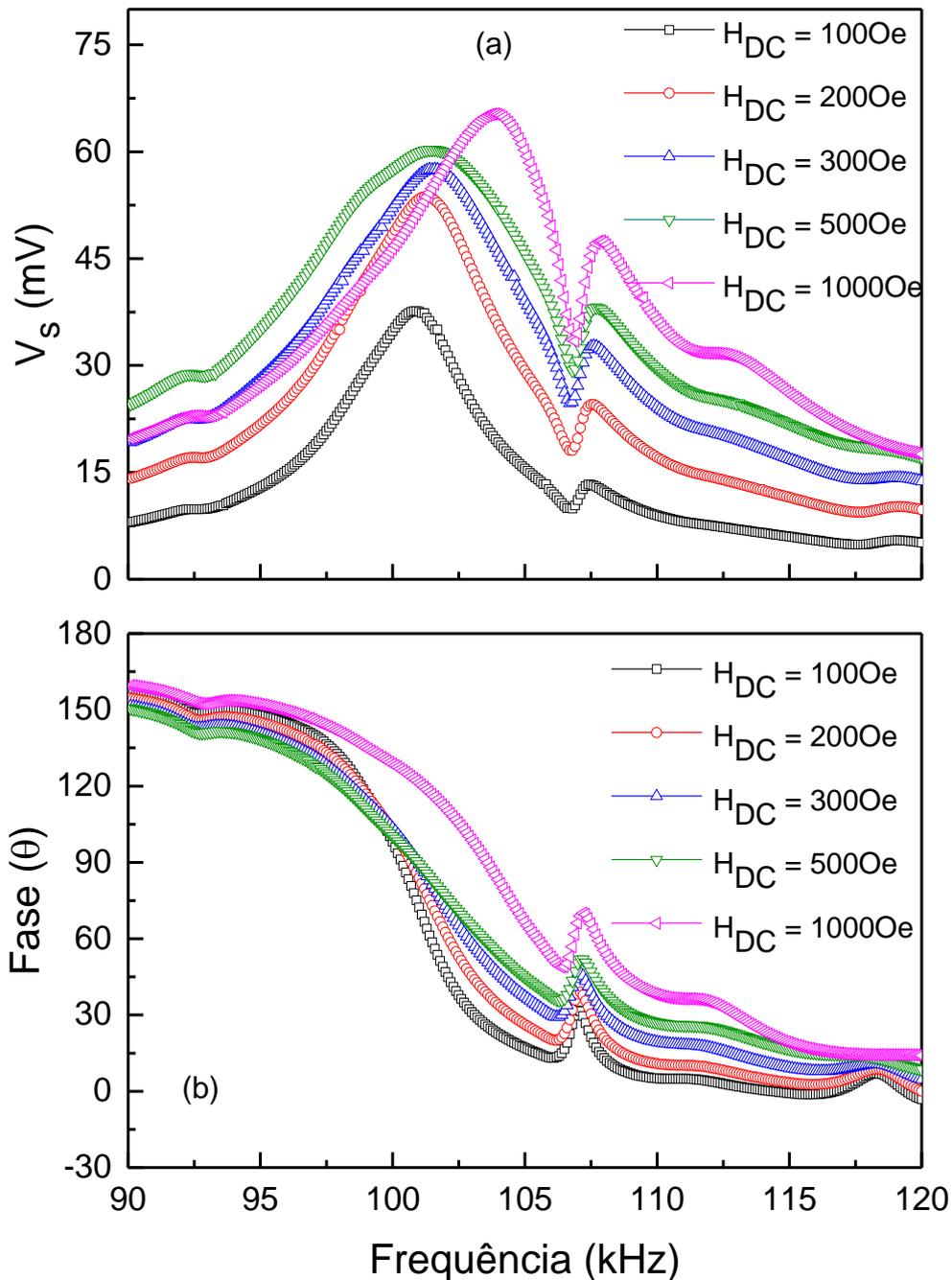


Figura 53: No gráfico (a): Tensão elétrica em função da frequência. No gráfico (b): Fase em função da frequência. Ambos os gráficos são para diferentes intensidades de H<sub>DC</sub>: 100 Oe, 200 Oe, 300 Oe, 500 Oe e 1000 Oe.

Observa-se na figura 55 uma relação entre a máxima intensidade de tensão elétrica de saída ( $V_s$ ) e a correspondente  $f_{ME}$  em função do campo H<sub>DC</sub>. Dessa forma, podemos compreender melhor o comportamento do gráfico da figura 53(a), no qual temos claramente o deslocamento da  $f_{ME}$  com o aumento do campo magnético H<sub>DC</sub>.

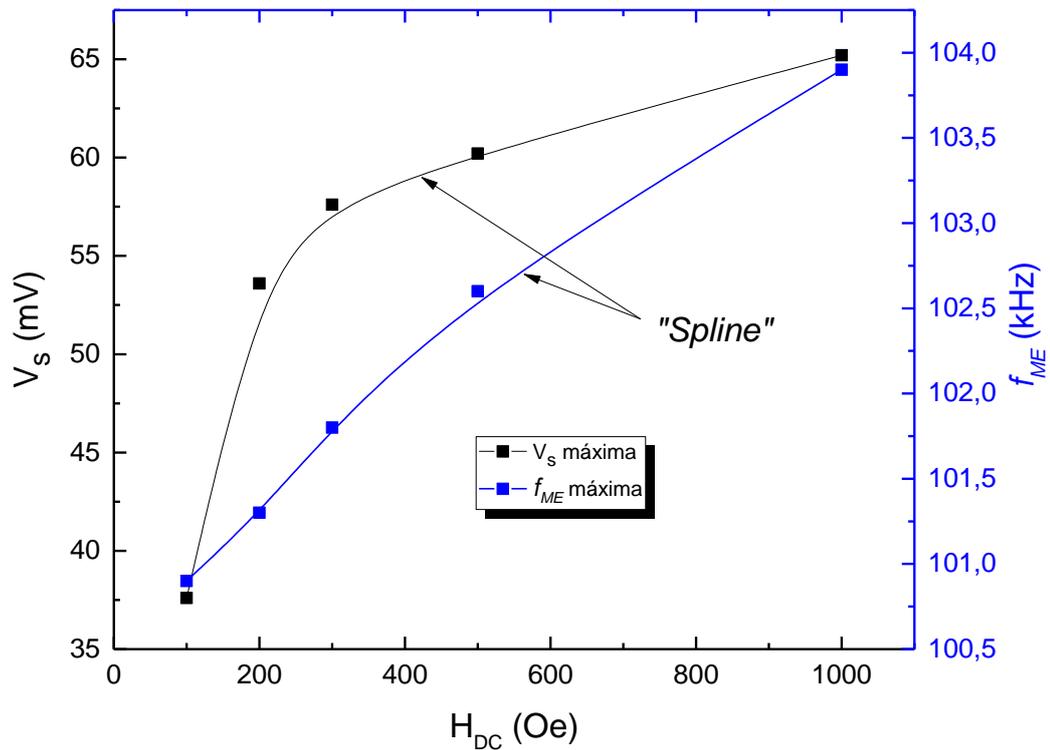


Figura 54: Tensão elétrica e Fase em função da frequência magnetostritiva  $f_{ME}$ , pontualmente na máxima resposta ME, para campo  $H_{DC}$  específicos: 100 Oe, 200Oe, 300 Oe, 500 Oe, 1 kOe

Os resultados mostram que ao submeter o sensor SCM-MP a cinco valores de  $H_{DC}$  diferentes, 100 Oe, 200 Oe, 300 Oe, 500 Oe e 1000 Oe, observamos que a resposta  $V_s$  e  $f_{ME}$  aumenta de forma não linear com a intensidade do campo magnético  $H_{DC}$ . Esses valores de  $H_{DC}$  serão tratados, mais adiante, como campo magnético de referência ( $H_{DC Ref.}$ ), uma vez que o sensor SCM-MP será caracterizado para alguns desses campos. É muito provável que quando o sensor SCM-MP se encontra em meio a um campo magnético paralelo a direção de magnetização do elemento sensor, esse campo altera as propriedades do material magnetostritivo, que por sua vez, modifica o valor da permeabilidade magnética ( $\mu$ ) do centro da bobina, no qual está localizado os compósitos laminares. Conseqüentemente, esse fato pode ser o responsável por deslocar a frequência  $f_{ME}$ . Para comprovar essa variação da permeabilidade magnética, analisamos a curva de impedância ( $Z$ ) da bobina do sensor SCM-MP em função da  $f_{ME}$  para um campo  $H_{DC}$  de 0 a 2 kOe. As respostas são apresentadas no gráfico da figura 55, em que fica evidente que o pico de máxima

intensidade da impedância ( $Z$ ) se desloca para a direita com aumento do campo  $H_{DC}$ , modulando diretamente a frequência de ressonância magnetoelétrica ( $f_{ME}$ ) do sensor SCM-MP.

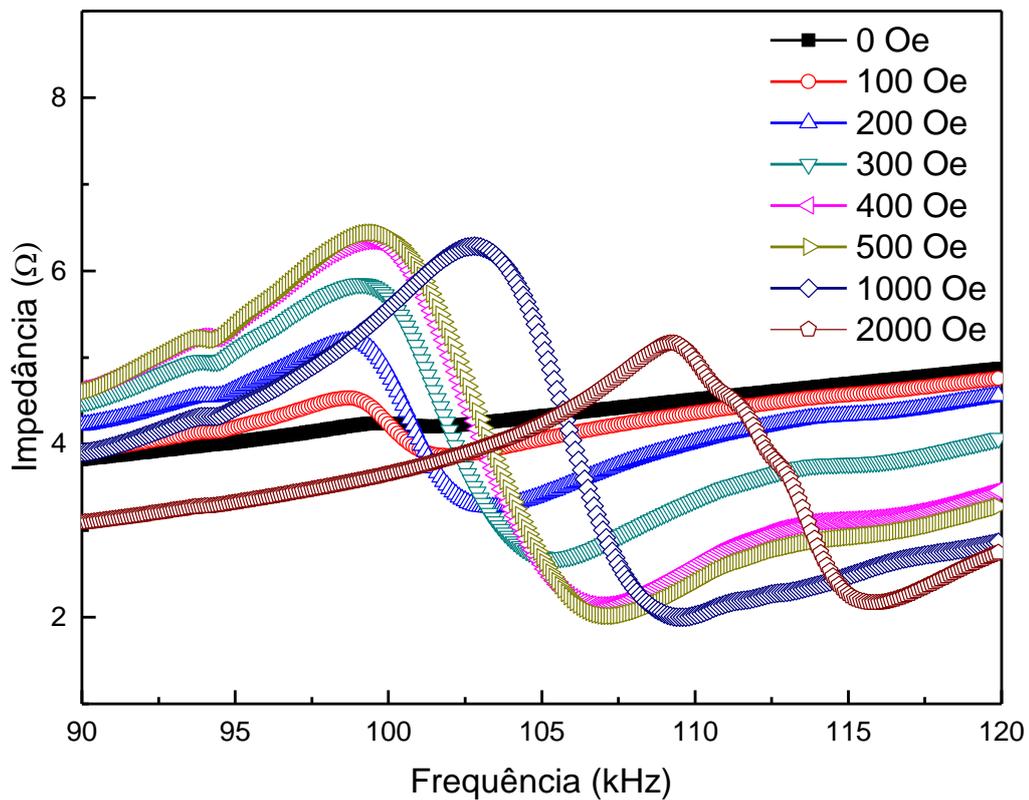


Figura 55: Impedância em função da frequência, para o sensor SCM-MP, em meio a diferentes intensidades de campo magnético  $H_{DC}$ .

Para a investigação do coeficiente  $\alpha_V$  em função do  $H_{DC}$ , foi analisada a resposta ME do sensor SCM-MP na frequência  $f_{ME}$ . Para tanto, fixamos um  $H_{DC}$  e conseqüentemente uma  $f_{ME}$ . Os resultados são apresentados em quatro gráficos, ilustrados na figura 58. Os gráficos da figura 56(a), (b) e (c) e (d) apresentam o comportamento de  $V_s$  em função de  $H_{DC}$ , variando-o de 0 a 3 kOe e retornando a 0Oe novamente, neste caso, manteve-se sempre fixa a corrente elétrica alternada ( $i_{AC}$ ) na bobina em aproximadamente 1,5 mA e, conseqüentemente, o mesmo campo magnético alternado ( $h_{AC}$ ).

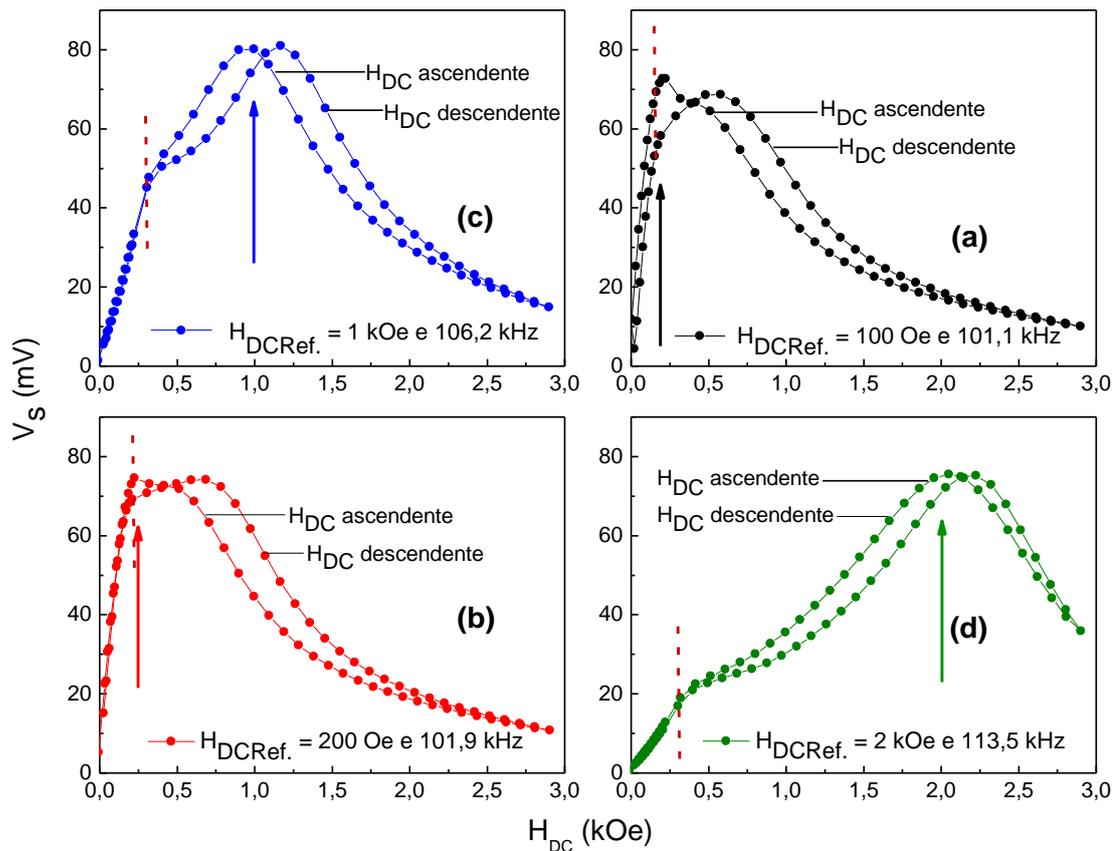


Figura 56: Tensão elétrica em função do campo magnético  $H_{DC}$ . As setas verticais indicam o primeiro pico de máxima resposta ME nas frequências  $f_{ME}$ : (a) 101,1 kHz; (b) 101,9 kHz; (c) 106,2 kHz e (d) 113,5 kHz.

No gráfico da figura 56(a), o sensor sensivelmente é calibrado para um  $H_{DC}$  de referência ( $H_{DC\ Ref.}$ ) igual a 100 Oe ( $f_{ME} = 101,1$  kHz). A seta vertical indica o pico de máxima resposta  $V_s$ , para o  $H_{DC}$  ascendente, próximo 100 Oe. De forma semelhante, os gráficos da figura 56(b), (c) e (d), ilustram a resposta de  $V_s$  para  $H_{DC}$  de referência de intensidade igual a 200 Oe ( $f_{ME} = 101,9$  kHz); 1 kOe ( $f_{ME} = 106,2$  kHz) e 2,0 kOe e ( $f_{ME} = 113,5$  kHz), respectivamente. De fato, calibrar o sensor SCM-MP para um dado valor de  $H_{DC}$  de referência implica em calibrar a sua frequência de ressonância magnetoelétrica. Esses resultados, revelam uma característica surpreendente desse modelo de sensor, i.e., apontam para uma aplicação tecnologicamente inovadora na área de sensores de campo magnético, até então, pouco explorada.

Nos quatro gráficos da figura 56, a resposta ME é praticamente linear para  $H_{DC} < 400$  Oe. Nas figuras 56 (a) e (b), nota-se, também, que a resposta ME descreve um comportamento típico exponencial para um  $H_{DC}$  maior que  $H_{DC\ Ref.}$ , isso se deve ao fato de que a deformação do Terfenol-D satura para valores de campo magnético

acima de 0,4 kOe [33]. Na situação das figuras 56(c) e (d),  $H_{DC \text{ Ref.}}$  é encontrado um pouco elevado,  $H_{DC} > 500 \text{ Oe}$ . Embora a saturação ocorra em qualquer das situações isso pode ser visto com bons olhos, pois possibilita que o sensor SCM-MP detecte baixas intensidades de  $H_{DC}$  ( $\sim 20 \text{ Oe}$ ), mas também, valores mais altos (1, 2, 3 kOe, etc.), desde que seja devidamente ajustado sua  $f_{ME}$ .

Novamente os resultados apresentados para o sensor SCM-MP mostram que estes sensores necessitam de análise mais cuidadosa uma vez que a resposta ME é alterada com o valor do campo  $H_{DC}$  a ser determinado. Isto pode ser um grande problema em altos campos, porém, nos direciona para uma família de SCM na qual podemos detectar campos magnéticos de diferentes intensidades (intervalo), ajustar o sensor e tratá-lo como uma categoria inteligente auto sintonizável.

Para  $H_{DC} < 100 \text{ Oe}$  observamos um comportamento praticamente linear no gráfico da tensão elétrica em função do  $H_{DC}$ , que pode ser visto com mais detalhes na figura 57. Trata-se da resposta  $V_s$  do sensor SCM-MP, calibrado para quatro diferentes  $H_{DC}$  de referência (conforme discussões relativas à figura 56).

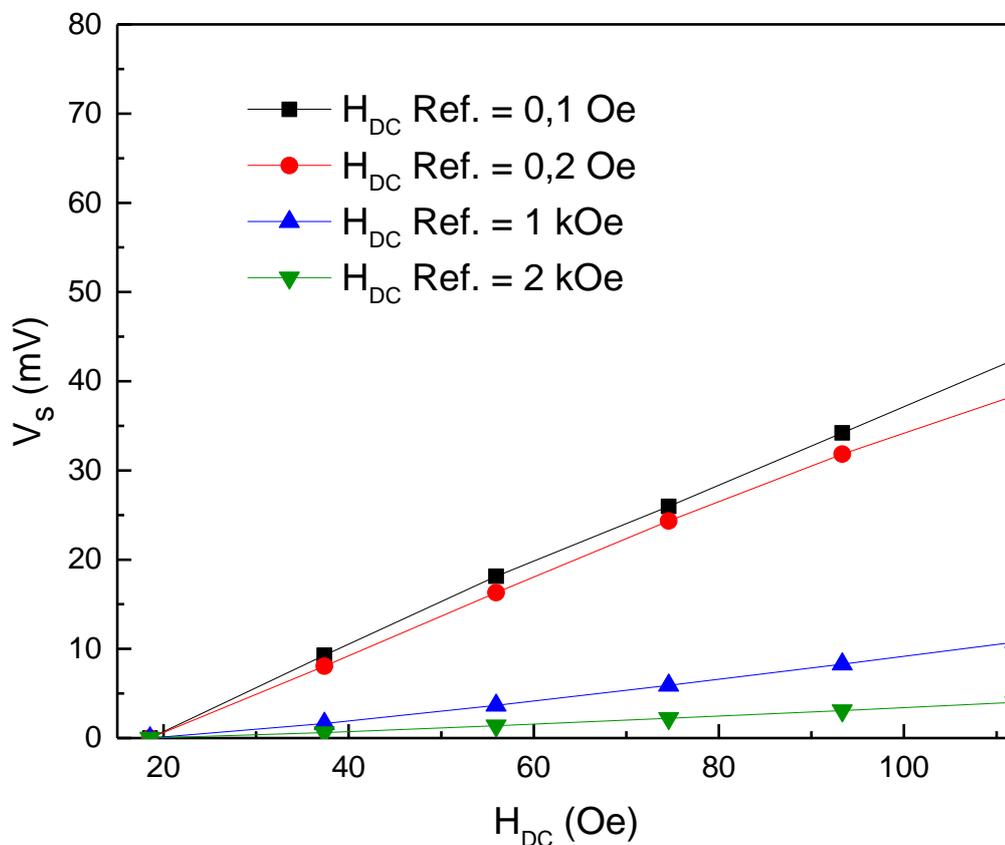


Figura 57: Tensão elétrica em função do campo magnético  $H_{DC}$ , para  $H_{DC}$  de Referência igual a 100 Oe, 200 Oe, 1 kOe e 2 kOe.

Note que para  $H_{DC} < 100$  Oe o sensor SCM-MP apresentou uma resposta linear conforme já era esperado e apresentado na literatura [27, 33]. Essa linearidade é refletida no coeficiente  $\alpha_V^*$ , e confirmada por outros trabalhos no qual afirmam que o Terfenol-D apresenta uma saturação na deformação ao serem submetidos a um  $H_{DC} > 0,4$  kOe [5, 27, 33]. Portanto, utilizando a equação (31)  $\alpha_V^* = \frac{V_S[V]}{I[A].H_{DC}[Oe]}$ , obtivemos diferentes valores para o coeficiente ME,  $\alpha_V^*$ , conforme ilustrado no quadro dentro da figura 58.

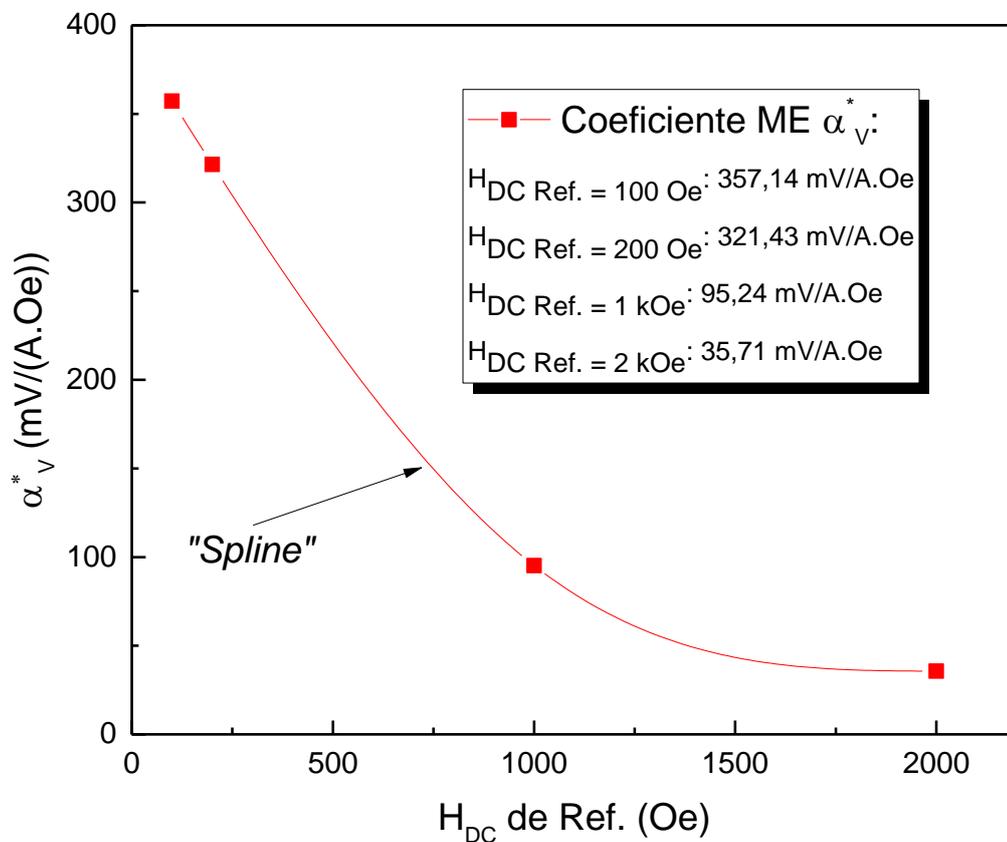


Figura 58: Coeficiente de tensão ME,  $\alpha_V^*$ , em função do campo magnético de referência.

Desse modo, podemos perceber que o maior coeficiente  $\alpha_V^*$  para o sensor SCM-MP foi de 357,14 mV/(A.Oe), calibrado para medir um  $H_{DC} = 100$  Oe e, conforme o  $H_{DC}$  aumenta,  $\alpha_V^*$  diminui. A sensibilidade para campos magnéticos até 200 Oe é 150 vezes maior que o melhor resultado dos sensores construídos somente com

materiais piezelétricos. Além disso o sensor SCM-MP é 300 vezes maior que os resultados apresentados em outros trabalhos [5, 35, 38, 40, 42, 43].

# CAPÍTULO 5

## 5. APLICAÇÕES INTELIGENTES E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

Analisando os resultados apresentados no capítulo 4 e comparando os diferentes tipos de sensores construídos nesse trabalho, notamos que quatro sensores se destacam, são eles, os sensores SCM-SD3, SCM-SR3, SCM-SA3 e SCM-MP. A tabela 11, ilustra os resultados para o coeficiente ME,  $\alpha_V^*$  e a frequência de ressonância magnetoelétrica,  $f_{ME}$ , de cada sensor.

Tabela 11: Relação dos coeficientes de tensão ME,  $\alpha_V^*$ , e a frequência de ressonância magnetoelétrica,  $f_{ME}$ , de cada sensor.

Modelo	$\alpha_V^*$ (mV/Oe. A)	$f_{ME}$ (kHz)
SD3	1,15	215,0
SR3	2,30	34,0
SA3	2,00	152,0
SCM-MP (100 Oe)	357,14	101,1

Diante desses resultados, fomos motivados a utilizar o sensor SCM-MP para medidas de campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) e corrente elétrica alternada ( $I_{AC}$ ), como uma aplicação final para este trabalho. O sensor SCM-MP nos direciona para aplicações tecnologicamente inovadoras, pois é multifuncional e apresenta características sintonizáveis que se destacam em seu meio de aplicação. Além disso, as curvas de caracterização deste sensor podem ser interpretadas por sistemas eletrônicos embarcados inteligentes, podendo levar o seu uso a um outro patamar de aplicação ou estado da arte. Trata-se de sensores inteligente, robustos, sensíveis a campo magnético e não invasivos. Portanto, utilizando a mesma configuração ( $L_m$ - $T_p$ - $L_m$ ) do sensor SCM-MP, construímos um protótipo de medida de campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) e de corrente elétrica AC, para uma ampla faixa de frequência (50 Hz – 150 kHz).

## 5.1. Descrição e motivação de utilização do sensor SCM-MP para medição de campos magnéticos AC

A proposta de aplicação do sensor SCM-MP foi motivada pela necessidade de medir-se campos magnéticos oscilantes produzidos por correntes elétricas ( $I_{AC}$ ) em cabos elétricos, ou fios condutores de energia elétrica em redes de distribuição de energia, 110 V ou 220 V, em 60 Hz; sistemas de proteção de conversores DC/AC e AC/DC; fontes chaveadas de alta potência; e sistemas de aquecimento por indução eletromagnética. Nessas fontes, em especial, é de extrema importância o monitoramento da corrente elétrica, o que pode evitar que transistores IGBT dos conversores AC/DC operem em regiões de sobre corrente devido a variação brusca no valor da carga resistiva do circuito. Esses sensores tendem a oferecer mais segurança para a fonte impedindo que ela entre em faixas de curto circuito e se auto danifique.

Os resultados obtidos nas caracterizações do sensor SCM-MP para  $H_{DC}$ , da seção anterior, nos levou a concluir que o compósito laminar (Terfenol-D/PZT-5A/Terfenol-D) para ser utilizado como um transdutor, necessita de um campo magnético alternado,  $h_{AC}$ , para responder a um outro campo externo AC/DC. Porém agora, que estamos interessados em construir um sensor de campo oscilante (e corrente elétrica alternada), por praticidade, podemos substituir o campo  $h_{AC}$ , por um campo contínuo, denominado  $h_{DC}$ . Para tanto, serão necessárias algumas modificações básicas no modelo do sensor SCM-MP, como por exemplo, a substituição da bobina do conjunto sensor SCM-MP, por ímãs permanentes, cuja função, descreveremos com mais detalhes logo adiante. Como não precisaremos excitar o compósito com uma corrente elétrica alternada na bobina, vamos chamá-lo de sensor SCM-MP passivo, todas as vezes que se referir ao sensor de campo magnético oscilante ou corrente elétrica alternada, agora denominado,  $H_{AC}$  e  $I_{AC}$ , respectivamente.

Considerando que quando uma corrente elétrica alternada ( $I_{AC}$ ) percorre um fio condutor surge um campo magnético oscilante ( $H_{AC}$ ), observa-se na figura 59 que colocando o fio condutor perpendicular à direção da magnetização do Terfenol-D teremos um campo magnético,  $H_{AC}$  externo, no qual se encontra perpendicular a um campo magnético contínuo,  $h_{DC}$ , proveniente dos ímãs permanentes.

Conseqüentemente, esse acoplamento magnetoelétrico produz uma oscilação mecânica fazendo com que a cerâmica PZT-5A gere um sinal resposta ME proporcional a intensidade de vibração do elemento magnetostritivo, Terfenol-D.

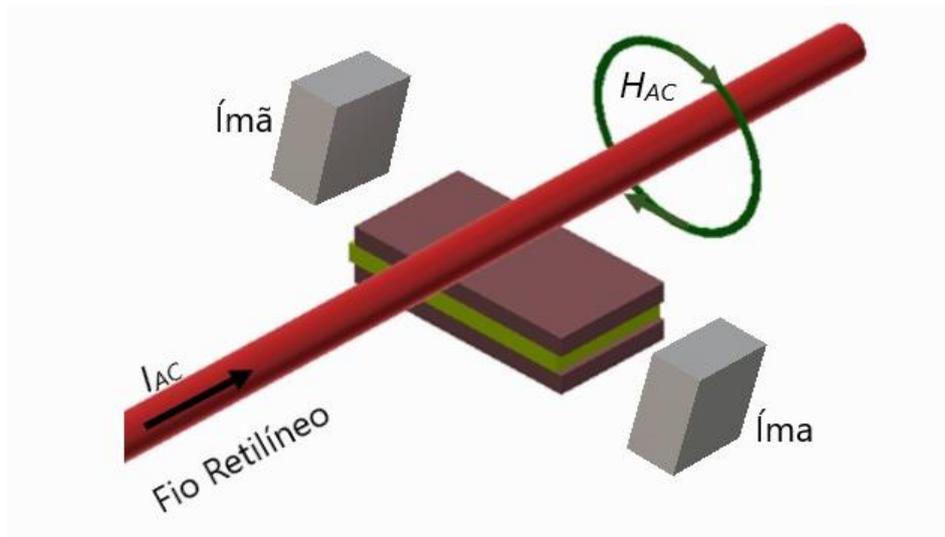


Figura 59: Disposição esquemática das partes do sensor SCM-MP passivo.

Sendo assim, montamos um novo sensor com características únicas. Para isto, será necessário colocarmos algumas especificações, nas quais ajudarão a maximizar a resposta ME desse sensor, para torná-lo competitivo com os sensores de corrente elétrica já existente no mercado. Para tanto devemos:

- A) Produzir um campo  $h_{DC}$  da ordem de aproximadamente 0,4 kOe, para estabelecer um campo magnético constante longitudinalmente em toda a extensão dos elementos do sensor;
- B) Minimizar os ruídos elétricos, ou atenuar campo elétricos sobre uma boa faixa de frequência de operação interessada de 25 Hz – 150 kHz;
- C) Realizar um bom isolamento térmico afim de assegurar e manter a calibração do sensor em intervalo de trabalho entre 30 – 50 °C;
- D) Facilitar a sua instalação sobre cabos condutores de corrente elétrica;
- E) Permitir o interfaceamento com sistemas inteligentes embarcados;
- F) Torná-lo compacto, leve, robusto, e insensível à ambientes agressivos;

- G) Maximizar o sinal de resposta para evitar alto custo em conversores analógicos digitais no sistema embarcado.

## 5.2. Fabricação e montagem do sensor SCM-MP passivo para campos magnéticos AC

Da revisão bibliográfica concluímos que o material Terfenol - D apresenta uma boa resposta para a deformação frente a um campo magnético aplicado. Ficou claro por meio dos resultados do sensor SCM-MP para  $H_{DC}$  que podemos ter um sistema, formado por um compósito (Terfenol-D/PZT-5A/Terfenol-D), bastante sensível à campo magnético de baixa intensidade. Considerando a hipótese de que o  $H_{AC}$  aplicado no conjunto da figura 59 será de baixa intensidade, apostamos que o campo seja suficiente para produzir uma deformação no material Terfenol-D, devido ao seu baixo campo coercitivo desse material. Porém, para haver um sinal elétrico de medida, verifica-se que devemos submeter o sistema a um campo magnético contínuo,  $h_{DC}$ , que seja capaz de promover a saturação do Terfenol-D na direção de magnetização, de forma que ao aproximarmos o sensor SCM-MP passivo do campo magnético alternado,  $H_{AC}$ , externo, teremos o Terfenol-D se deformando em torno de um ponto médio de trabalho, análogo a polarização DC de transistores. Mantendo a mesma geometria e mesma configuração apresentada na figura 31, fica claro a necessidade de um campo magnético de sustentação denominado  $h_{DC}$  de valor fixo e constante. Mediante os resultados no gráfico da figura 53, para o sensor SCM-MP, vimos que para esta geometria o Terfenol-D apresenta frequência magnetoelétrica ( $f_{ME}$ ) próxima à 100 kHz. Acima dessa frequência, ocorre atenuação na intensidade da constante  $\mu_{33}$ , que acarreta uma menor deformação do material Terfenol e, conseqüentemente, uma diminuição da transferência de energia mecânica para o material piezelétrico, diminuindo a resposta ME. Por outro lado, ao se observar o gráfico da figura 7 observa-se que o sistema responde de forma linear com o aumento do campo externo até um valor máximo aplicado, sendo este da ordem de 0,4 kOe (30 kA/m) [33, 49].

Como pretendemos utilizar este sensor para determinar a corrente elétrica ( $I_{AC}$ ) por meio do campo magnético ( $H_{AC}$ ) produzido pela mesma, vamos denominar a partir de então, o termo, sensibilidade de corrente elétrica ( $S_I$ ), no qual expressa a resposta ME para o sensor SCM-MP passivo. Nessa aplicação, podemos dizer que o coeficiente  $\alpha_V$  e a sensibilidade de corrente elétrica alternada ( $S_I$ ) dependem fortemente do campo magnético  $h_{DC}$ , i.e., da intensidade dos ímãs permanentes que irá o sensor SCM-MP passivo. A solução encontrada foi o uso de ímãs com alta intensidade de campo magnético ( $\sim 5$  kOe), dispostos um frente ao outro, para se produzir um  $h_{DC}$  mínimo de 0,4 kOe na região central equidistante dos ímãs e na direção da magnetização do Terfenol-D. Na figura 60, apresentamos o diagrama esquemático para o sensor pretendido. Nesse caso, os ímãs encontrados com as características exigidas, isto é, que sejam suficientemente pequenos e fortes, foram os ímãs de NdFeB, que tínhamos disponível em nosso laboratório (ímãs de “NdFeB N35”, 4,5x40,5x1 mm).

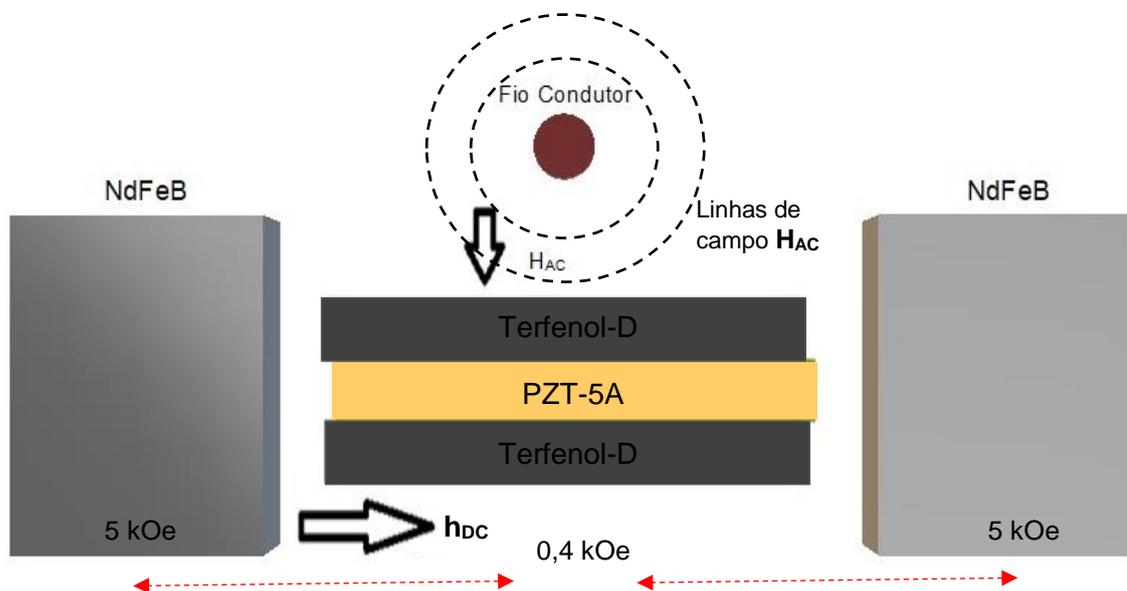


Figura 60: Disposição esquemática das partes do sensor SCM-MP passivo, vista lateral.

Esses ímãs de NdFeB podem ser encontrados em lojas especializadas de materiais eletrônicos desde 1984, e são capazes de produzir alto valor de campo magnético comparado com os outros materiais magnéticos convencionais. É possível encontrar peças de NdFeB disponíveis comercialmente em diversos formatos,

tamanhos e espessuras. A tabela 13 apresenta as propriedades do material NdFeB disponíveis comercialmente [ 54 ]. Observa-se que o NdFeB apresenta grande densidade de fluxo magnético ( $B_r$ ), podendo atingir 0,4 kOe, em uma pequena área de trabalho, tornando possível produzirmos um  $h_{DC}$  dentro de um pequeno espaço, o que atende as necessidades de projeto para o sensor SCM-MP passivo.

Tabela 12: Propriedades para os ímãs de NdFeB utilizados [54].

Propriedades	Símbolo	NdFeB
Densidade de fluxo magnético residual (T)	$B_r$	1,32 ~ 1,38
Campo coercivo (KA/m)	$H_c$	$\geq 955$
Campo coercivo intrínseco (KA/m)	$H_{ci}$	$\geq 1353$
Produto de máxima energia ( $KJ/m^3$ )	$(B.H)_{m\acute{a}x.}$	318 ~342
Permeabilidade Relativa	$\mu_r$	~1,05
Densidade	$\rho$	7450 - 7650
Máxima temperatura de operação ( $^{\circ}C$ )	$T_{m\acute{a}x.}$	120

Por meio de um Gaussímetro (Lake Shore 425) com ponta Hall posicionada entre as peças magnéticas de neodímio, foi medido o campo magnético produzido pelos ímãs de NdFeB disponíveis no laboratório. Dessas medidas concluímos que seriam necessárias seis peças de NdFeB, para atingirmos o campo de 0,4 KOe de saturação do Terfenol-D. Uma vez definidos os ímãs para a produção de um campo magnético ( $h_{AC}$ ) médio de saturação do Terfenol-D, fez-se necessário a construção de uma caixa metálica para suportar e fixar os ímãs e também o cabo de saída da resposta  $V_s$  do sensor. Por outro lado, tomou-se o cuidado de que a essa caixa metálica também deveria servir como caixa de blindagem de campo elétrico externo, indesejados, captados pelos fios que saem dos eletrodos do composto PZT-5A. Na prática e na indústria, é comum ter equipamentos elétricos emitindo ruídos de interferência eletromagnéticas (EMI), tais como motores, computadores, lâmpadas fluorescentes, rádios receptores, que são diversos equipamentos que transmitem ondas eletromagnéticas que podem interferir no sinal de resposta do sensor. Por se tratar de medidas de campos magnéticos AC, as interferências eletromagnéticas podem ser sentidas pelo sensor e conseqüentemente, tornarem-se um ruído elétrico que se sobrepõe à resposta do sensor que, no caso de amplificação do sinal, deve

ser filtrado, aumentando o custo de circuitos eletrônicos para tratamento do sinal resposta. Sendo assim, a caixa metálica serve de sustentação das partes do sensor e também como blindagem de sinais espúrios. Na figura 61, apresentamos diagrama da caixa metálica aberta, contendo o sensor em perspectiva.

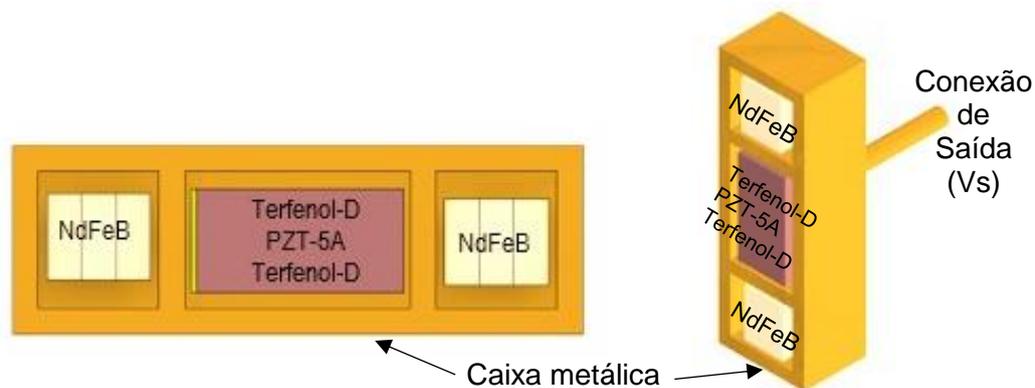


Figura 61: Disposição esquemática das partes do sensor SCM-MP passivo em perspectiva, dentro da caixa metálica aberta.

Na figura 64, apresentamos uma ilustração real do sensor SCM-MP passivo, em aberto (protótipo construído para medidas de  $H_{AC}$  e  $I_{AC}$ ). Note que o sensor está envolto por uma blindagem feita com material metálico fina (0,2 mm), porém, rígida o suficiente para dar sustentação mecânica às partes do sensor. Por meio de testes chegamos à conclusão que a melhor espessura da caixa de blindagem seria a mais fina possível, e com material de baixa condutividade térmica. Verificamos que as propriedades térmicas dos metais, entre os materiais disponíveis no laboratório (latão, cobre e alumínio) o latão é o que mais se aproxima das propriedades de baixa condutividade térmica e bom isolamento eletromagnético. A figura 62 ilustra o sensor construído. Na figura 65(a) nota-se a distribuição do sensor dentro da caixa metálica, e na figura 66 (b) o sensor finalizado, já com o cabo coaxial para comunicação remota.

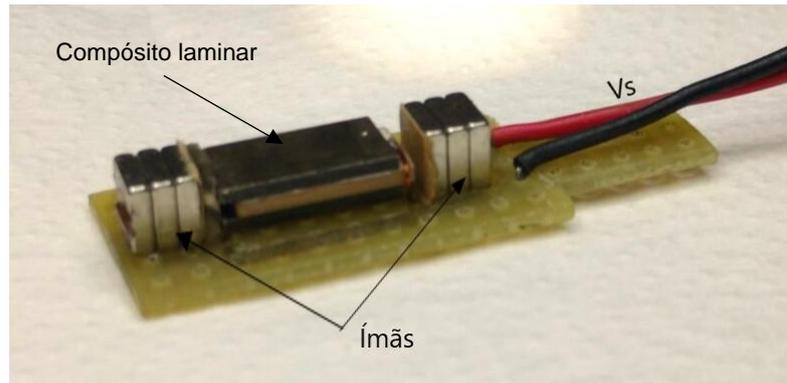


Figura 62: Disposição da montagem real do sensor SCM-MP passivo entre os ímãs de NdFeB e a respectiva conexão de saída ( $V_s$ ).

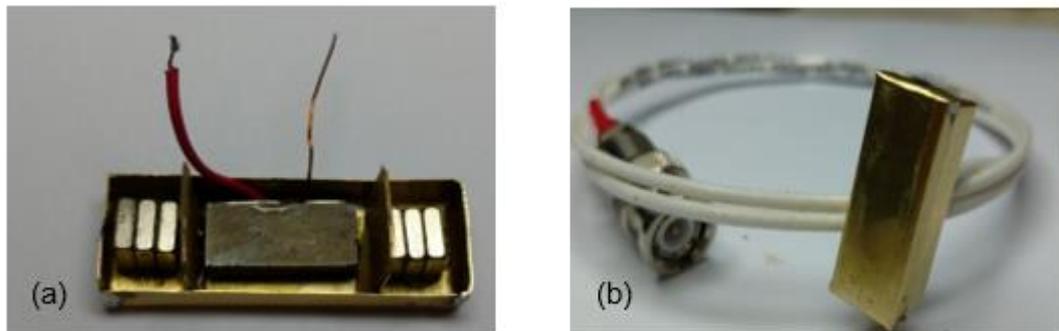


Figura 63: (a) Distribuição do sensor SCM-MP passivo dentro da caixa metálica e (b) sensor finalizado com o cabo coaxial para comunicação remota.

### 5.3. Configuração experimental para caracterização do sinal de resposta do sensor SCM-MP passivo

O diagrama experimental da montagem utilizada para caracterização do sensor SCM-MP passivo está ilustrado na figura 64. Foram utilizados um computador e um programa de aquisição de dados, conectado via GPIB a um Osciloscópio Tektronix (TBS1052B), um Gaussímetro (Lake Shore 425) e um Gerador de ondas arbitrarias Tektronix (AFG3021B). Já na figura 65, apresentamos a ilustração dos equipamentos dispostos sobre a mesa de teste e dois sensores SCM-MP passivos (um aberto e outro fechado), com blindagem metálica.

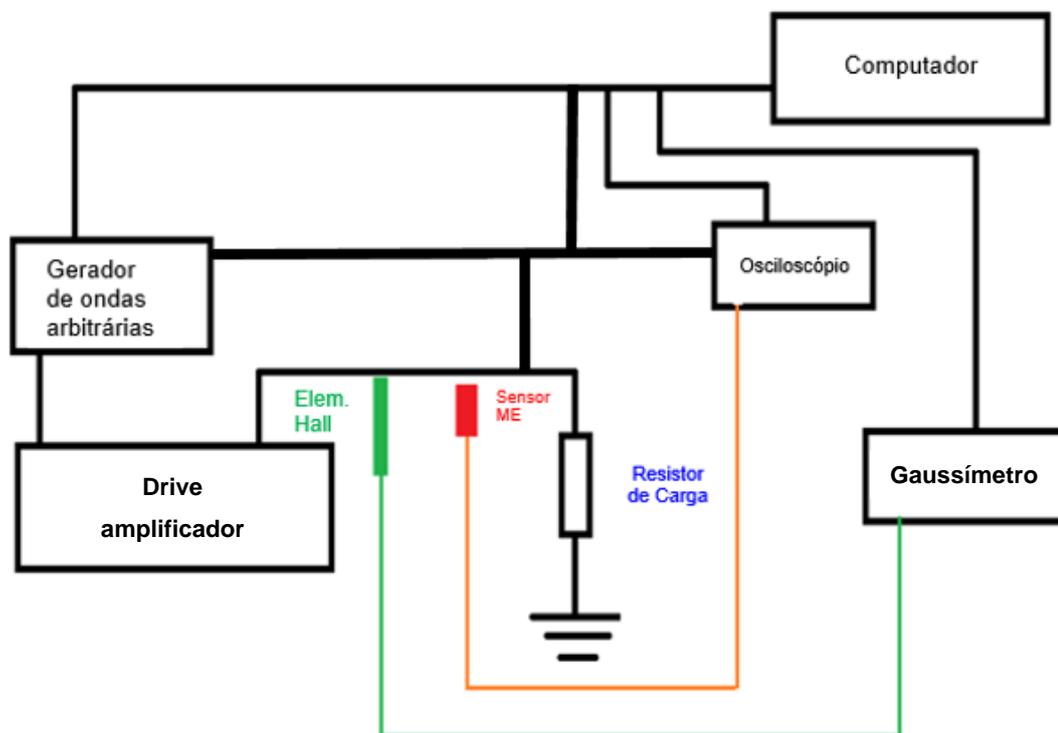


Figura 64: Diagrama experimental da montagem utilizada para caracterização de dois sensores SCM-MP passivos (um aberto e outro fechado), com blindagem metálica.

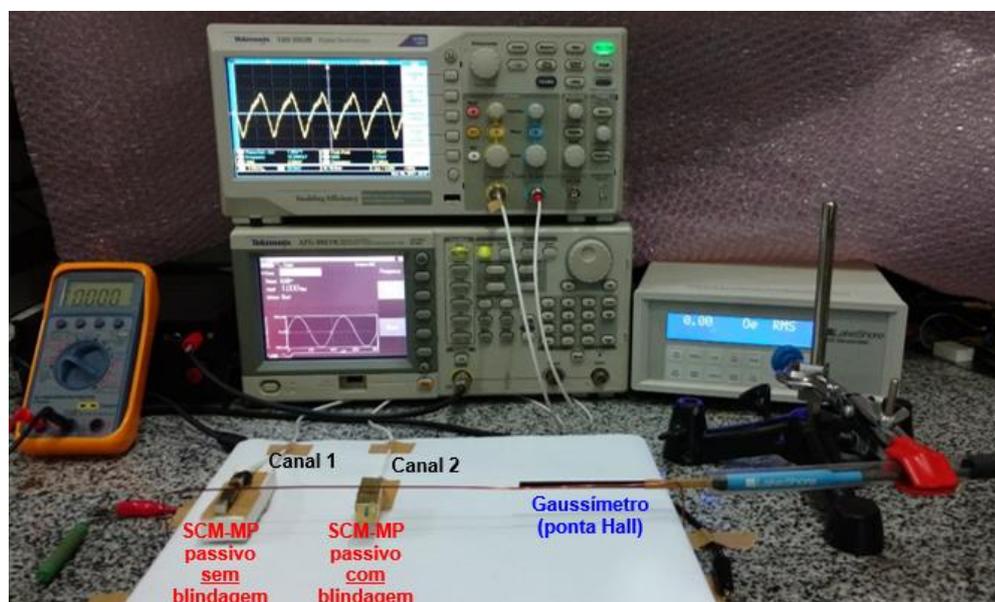


Figura 65: Disposição dos equipamentos utilizados para caracterização de dois sensores SCM-MP passivos (um aberto e outro fechado) com blindagem metálica.

O sinal senoidal de excitação da corrente elétrica a ser medida foi obtido com um gerador de funções arbitrárias Tektronix, com frequência que vão de 25 Hz até 150 kHz. O sinal do gerador foi amplificado por um “drive” amplificador, o que

proporcionou gerar picos de corrente de até 3 A aplicados em uma carga resistiva ( $R_L$ ) de  $10 \Omega$ . O valor da tensão elétrica medida no resistor de carga, com o osciloscópio, foi usado para calcular a corrente elétrica no fio condutor. Todos os valores foram tomados em RMS (do inglês, *Root Mean Square*), logo, a corrente elétrica na carga é eficaz. Um sensor Hall (*Lake Shore*) é utilizado como comparação para medidas do campo magnético gerado pela corrente alternada. Contudo, o Gaussímetro mostrou-se ser ineficiente para medidas de corrente de baixa intensidade e altas frequências, acima de 10 kHz enquanto o sensor SCM-MP mostrou ser superior, permitindo realizar medidas acima de 100 kHz. A ineficiência do Gaussímetro se deve tanto a parte eletrônica (condições de amplificação do sinal de resposta limitado à 10 kHz), quanto a própria física da ponta Hall (saturação de um semicondutor a frequências superiores a 10 kHz).

As figuras 66 e 67, ilustram o efeito da caixa de blindagem sobre o sinal resposta do sensor passivo. O sinal do sensor sem blindagem é mostrado no canal 1 (amarelo) do osciloscópio, e o sinal do sensor com blindagem é mostrado no canal 2 (azul). Note que os ruídos são eliminados totalmente quando se usa a blindagem metálica, possibilitando uma amplificação quase que direta do sinal eletrônico proveniente do sensor. Essa baixa relação sinal/ruído confere uma estabilidade de sinal elétrico para medidas de corrente de baixa intensidade, na faixa de mA e amplificação do sinal do sensor. Nota-se ainda, mais função da blindagem, o isolamento a energia estática do corpo humano, quando se toca o sensor com a mão, como ilustrado na figura 67. Observa-se que a intensidade do sinal resposta do canal 1 é alterada (figura 67(a)), mas nada acontece ao fazermos o mesmo com o sensor com blindagem (figura 67(b)).

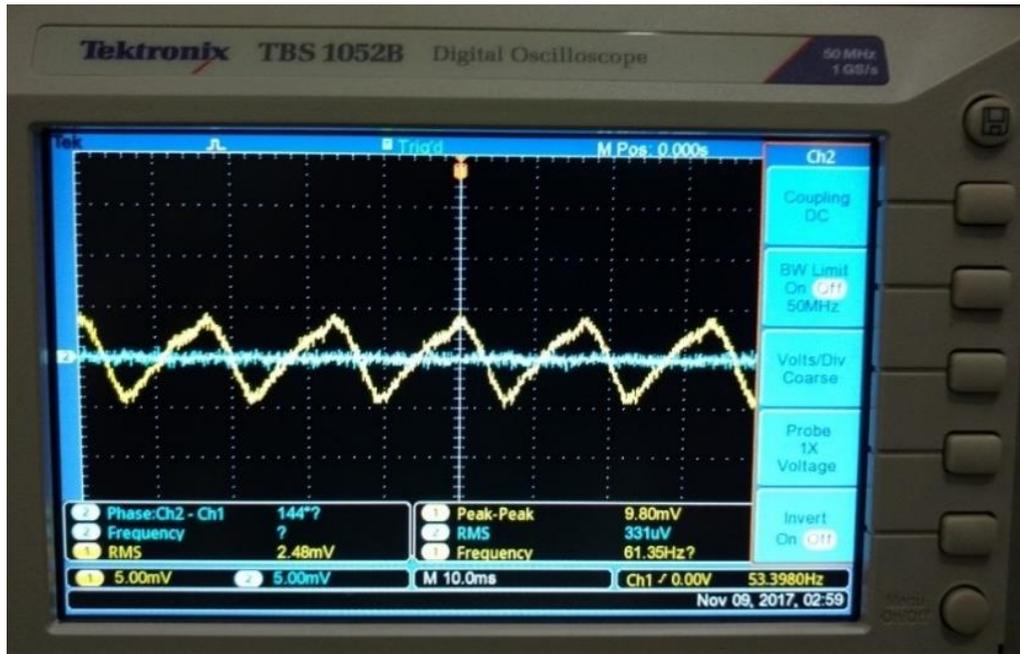


Figura 66: Sinal resposta do sensor SCM-MP passivo sem blindagem, canal 1 (amarelo) e com blindagem, canal 2 (azul), para uma corrente elétrica alternada igual a zero ( $I_{AC} = 0$  A), i.e., gerador de funções arbitrárias desligado. Escala para os canais 1 e 2 igual a 5,00 mV/divisão.

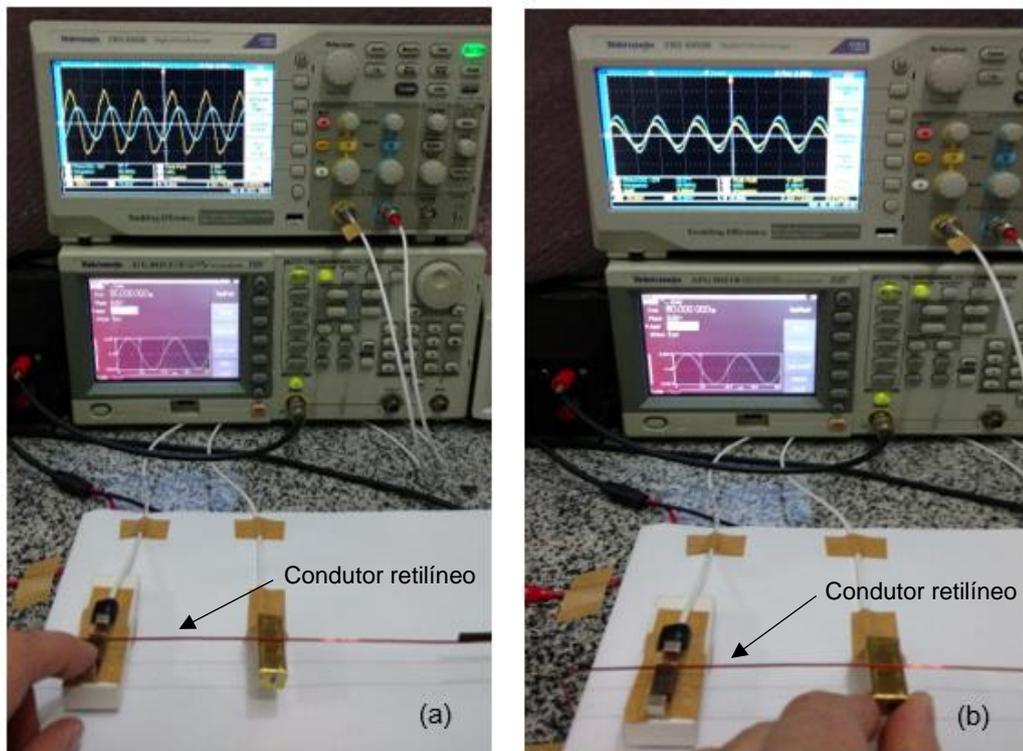


Figura 67: Ilustração da influência da energia estática ao manusear ou tocar o sensor SCM-MP passivo para medida da tensão elétrica ( $V_s$ ) em função da corrente elétrica ( $I_{AC}$ ). Sensor (a) sem blindagem, com a escala do canal 1 igual a 500 mV/divisão; e do canal 2 igual a 10 mV/divisão e (b) com blindagem, cuja escala do canal 1 e 2 são iguais a 10 mV/divisão.

## 5.4. Caracterização do sinal resposta do sensor SCM-MP passivo

Nesta seção apresentaremos uma sequência de resultados nos quais se observa a resposta ME gerada pelo sensor SCM-MP passivo para campo magnético AC. Esses resultados nos permitiram levantar alguns parâmetros de mérito para o sensor passivo. Na figura 68, o sinal resposta de  $V_s$ , em função da frequência para uma corrente fixa de 0,5 A (RMS), é apresentado. Note que em baixas frequências, o sinal aumenta quase que linearmente até 1 kHz, quando sofre uma inversão de fase. Acima dessa frequência o sinal  $V_s$  diminui até apresentar um ponto de mínimo em 50 kHz e depois volta a aumentar até um ponto de máximo (60 mV) à frequência de ressonância magnetoelétrica ( $f_{ME}$ ) 104 kHz. Acreditamos que a variação da fase em baixas frequências (< 1 kHz) diz respeito ao domínio do Terfenol no sistema, enquanto que a segunda inversão em altas frequências reflete o domínio do elemento PZT. Não chegamos a uma conclusão de como usar o sinal da fase para inferir algum comportamento de  $H_{AC}$ . Contudo, acreditamos que a variação na fase pode nos dizer se o campo medido está aumentando ou diminuído, bem como o sentido do campo aplicado no sensor SCM-MP passivo e assim, facilitar sua sintonia de operação, maximizando a sua resposta. O gráfico inserido na figura 68 enfatiza a resposta  $V_s$  em escala logarítmica (eixo x).

Na figura 69, é apresentado o comportamento do sinal  $V_s$  em função de várias frequências, para regimes de baixas frequências. Observa-se que a tensão elétrica de saída  $V_s$  do sensor SCM-MP passivo, em função da corrente elétrica (em RMS) para diferentes frequências, enfatizado um regime de baixas intensidades de corrente. Observa-se, ainda, que o sinal  $V_s$  aumenta linearmente com o aumento da corrente e que a inclinação da reta aumenta com o acréscimo da frequência, até a frequência de 104 kHz, que é a frequência de ressonância do compósito (Terfenol-D/PZT/Terfenol-D). Acima da frequência de ressonância magnetoelétrica ( $f_{ME}$ ) a resposta  $V_s$  volta a diminuir, como veremos mais adiante por meio da definição e do cálculo do coeficiente de sensibilidade de corrente ( $S_I$ ). Esta constatação está ligada a atenuação da resposta magnetostriativa do Terfenol-D, na qual para essa geometria se encontra próxima de 100 kHz. Mesmo assim, o sensor SCM-MP passivo, demonstra ser muito superior a ponta Hall do Gaussímetro, que é limitado (10 kHz).

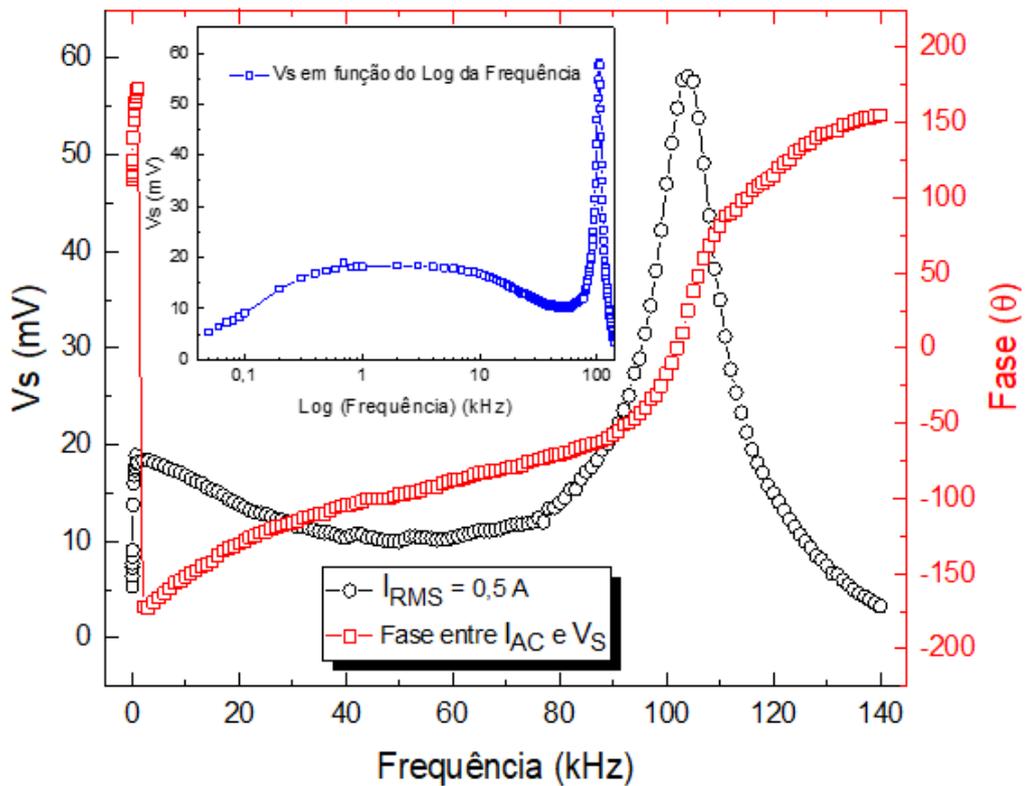


Figura 68: Tensão elétrica,  $V_s$ , em função da frequência, para uma corrente elétrica alternada de 0,5 A. A figura interna ilustra a mesma resposta, porém com o eixo x em escala logarítmica.

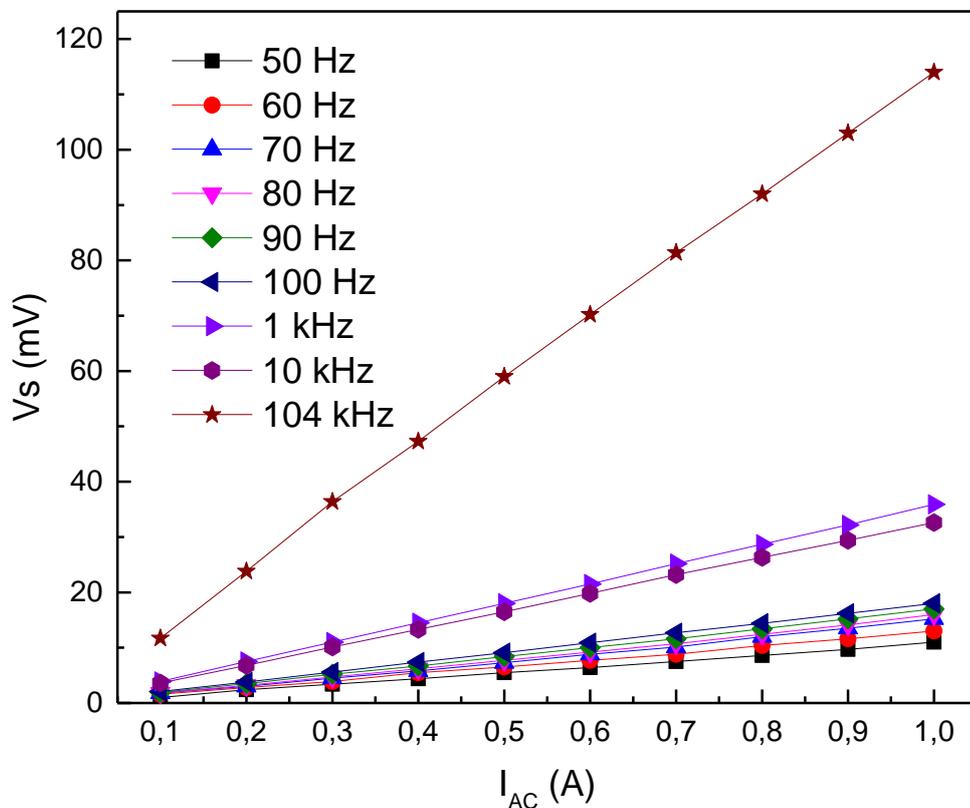


Figura 69: Tensão elétrica,  $V_s$ , em função da corrente elétrica alternada (em RMS), para diferentes valores de frequência.

Buscando simular a operação do sensor SCM-MP em diferentes regimes de temperatura, investigamos o seu comportamento em função da temperatura. As respostas para  $V_s$  são apresentadas pelo gráfico da figura 70. Tais medidas, foram realizadas com o sensor passivo blindado, colocado dentro de um forno mufla fechado, variando a temperatura e aguardando um tempo de aproximadamente 10 min para estabilização e equilíbrio térmico. Com um sensor termopar colocado com pasta térmica sobre o sensor SCM-MP passivo, foi determinada a temperatura na caixa de blindagem do sensor de campo  $H_{AC}$ . Uma vez observado que a temperatura estava estabilizada (precisão de 0,1 °C), registramos a medida de  $V_s$  em função da corrente elétrica alternada, aplicada no fio condutor de teste. É interessante notar no gráfico da figura 70, que o sinal  $V_s$  diminui com o aumento da temperatura. Esse comportamento, pode ser associado a alguns fatores, como por exemplo, a qualidade do acoplamento magnético, que diminui sob condições acima da temperatura ambiente. Os motivos vão desde uma pequena mudança nas propriedades dos materiais (Terfenol-D e PZT-5A), até mesmo, na resina epóxi utilizada na construção do compósito empregado no sensor SCM-MP passivo.

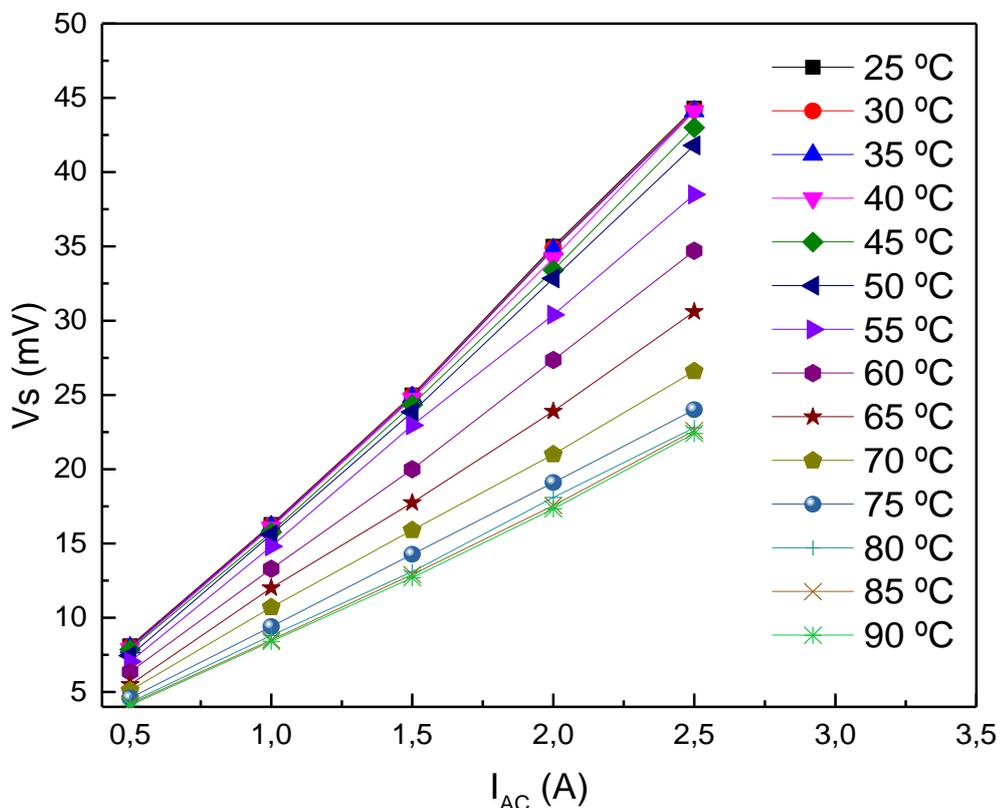


Figura 70: Tensão elétrica,  $V_s$ , em função da corrente elétrica alternada (RMS), para diferentes valores de temperatura do sensor SCM-MP.

Como a resposta  $V_s$  do sensor SCM-MP passivo é influenciada por condições externas que afetam diretamente a sua sensibilidade, como por exemplo, a campo elétrico, variação de temperatura, solda e conexões do coaxial, etc., é comum expressar o coeficiente ME  $\alpha_V$  como um coeficiente de sensibilidade a corrente elétrica alternada ( $S_I$ ), o qual está ilustrado no gráfico da figura 71, sob a ação de uma corrente fixa de 0,5 A (0,2 Oe) em função da frequência. Note que a máxima sensibilidade a corrente elétrica ocorre na  $f_{ME}$ , como já era esperado. Já na figura 72, o coeficiente  $S_I$  é analisado em função da temperatura para vários valores de  $I_{AC}$ . Note que a resposta  $S_I$ , com relação a temperatura, não é linear, porém esse fato pode ser perfeitamente compensado por um algoritmo de linearização eletronicamente, como já acontece em muitos sensores do tipo Hall e na ponta de medir corrente da Tektronix (A622).

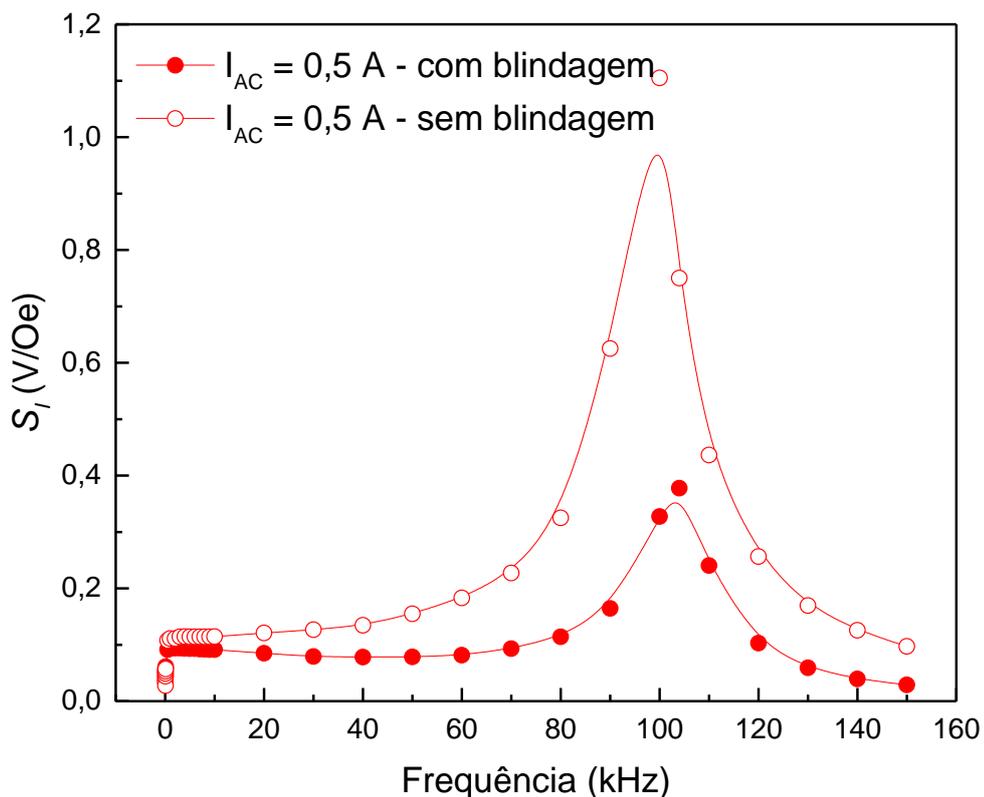


Figura 71: Coeficiente de sensibilidade a corrente elétrica alternada em função da frequência, para uma corrente elétrica de 0,5 A, com e sem blindagem.

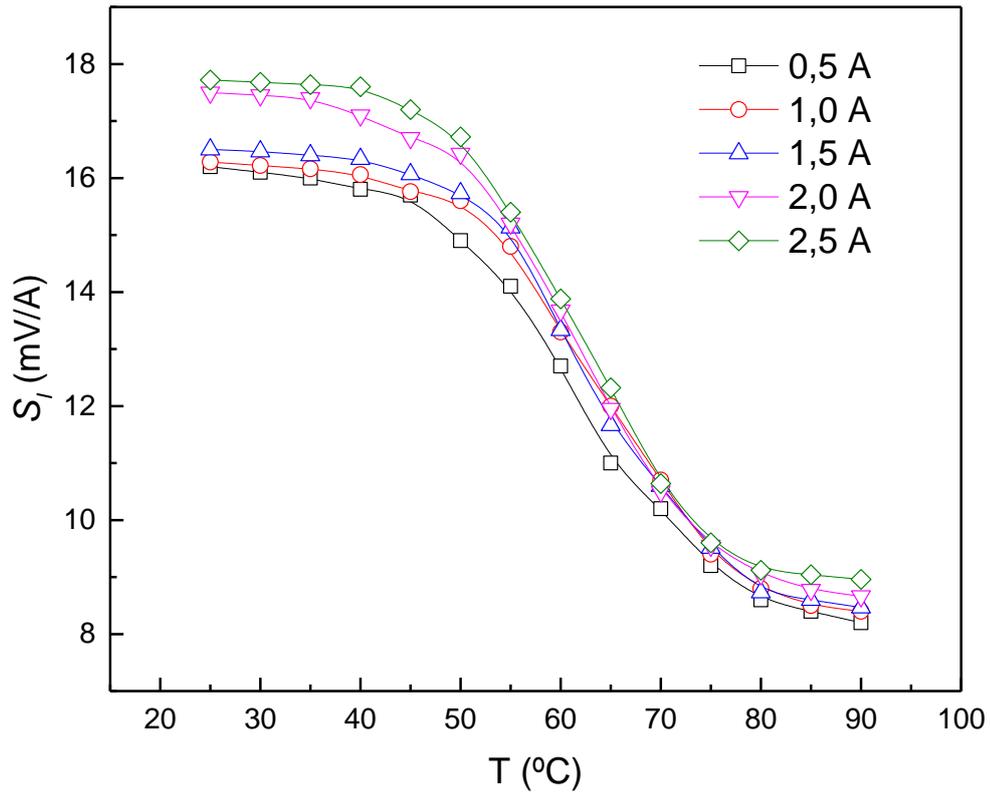


Figura 72: Coeficiente de sensibilidade a corrente elétrica alternada em função da temperatura para diferentes valores de corrente elétrica, na frequência de 60 Hz.

Como cada corrente elétrica,  $I_{AC}$ , corresponde a uma intensidade de campo magnético  $H_{AC}$ , na figura 73 podemos observar os valores das correntes medidas e seu correspondente valor em campo magnético alternado, de modo que o sensor pode ser calibrado tanto em função da corrente elétrica do condutor retilíneo de prova ou do campo magnético gerado pelo mesmo.

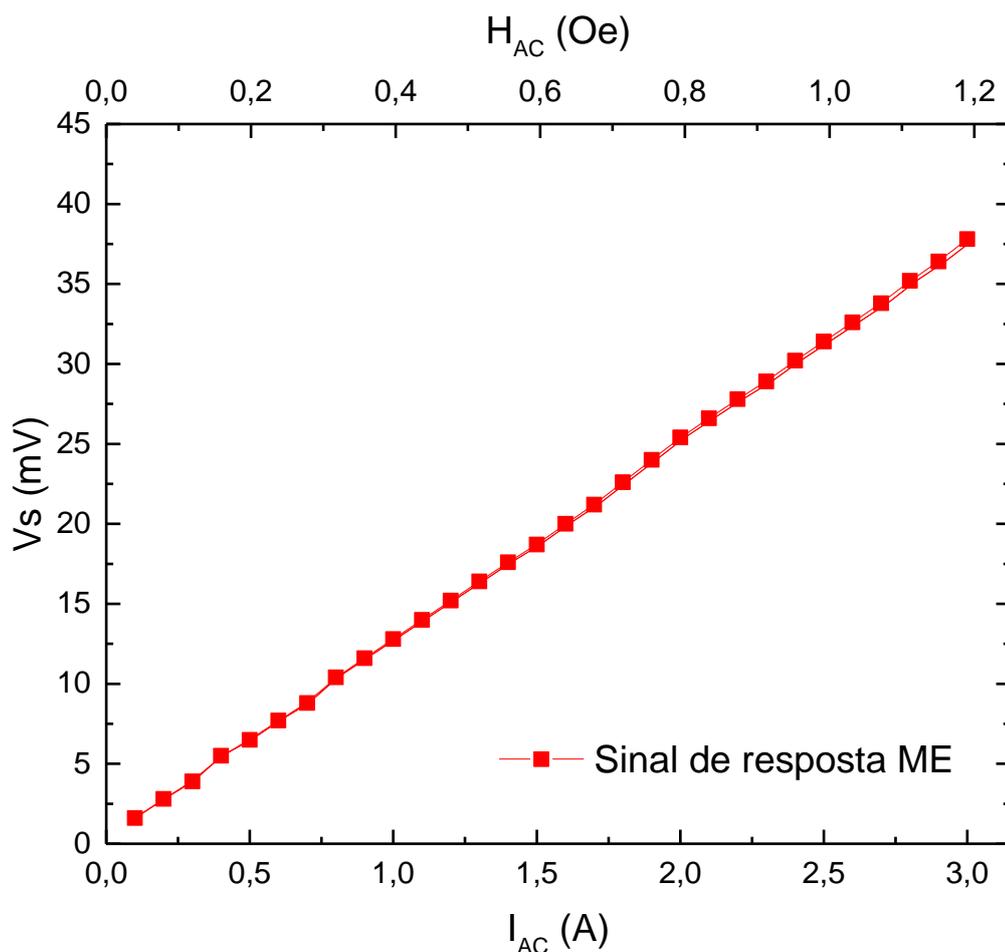


Figura 73: Tensão elétrica em função da corrente elétrica alternada ( $I_{AC}$ ) e/ou campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ), para uma frequência de 60 Hz.

Os dados levantados por meio das caracterizações e ilustrados nas figuras até agora, mostram que o sensor SCM-MP passivo pode ser bastante interessante para aplicações de medidas de corrente em redes de distribuição de 60 Hz. A resposta apresentada tem boa relação sinal/ruído e sensibilidade direta sem amplificação para correntes de baixa intensidade, desde 100 mA até 3 A. A baixa intensidade de ruído elétrico chama a atenção e possibilita o uso de amplificadores operacionais de instrumentação para aumentar a sensibilidade desse sensor, possibilitando medidas de correntes na faixa de microampères. Todas estas características mencionadas, faz do sensor SCM-MP passivo, muito superior a outros sensores de corrente elétrica alternada convencionais já existentes no mercado, como por exemplo, ponta Hall, bobinas de corrente, resistores *Shunt*, etc. Além disso, se considerarmos que o PZT nessa configuração (Terfenol-D/PZT5A/Terfenol-D) é capaz de gerar energia elétrica (por meio do acoplamento magnetoelétrico), suficiente para alimentar pequenos

circuitos eletrônicos, de fato poderá nos levar a uma nova aplicação, i.e., a micro geração de energia elétrica, para sistemas micro autoalimentados.

Buscando uma situação mais próxima da realidade de um chão de fábrica e uma aplicação tecnologicamente inovadora, apresentamos na figura 74 uma ilustração do sensor SCM-MP passivo operando em eletrônica de potência, acoplado a um sistema de aquecimento por indução magnética, no qual circula corrente elétrica de alta intensidade em carga indutiva. Em sistemas de aquecimento por indução magnética, as correntes elétricas são de alta intensidade e podem ser de alta ou de baixa frequência, sendo o seu monitoramento importante para ajustar a corrente na carga indutiva a medida que à carga metálica se aquece no sistema. O sensoriamento da corrente elétrica nesses sistemas é geralmente complexo, porém, crucialmente importante pois, possibilita a construção de fontes auto sintonizáveis. Observe ainda na figura 74, a inserção do sensor SCM-MP passivo, encapsulado com um material isolante, no canto superior direito e logo abaixo uma ponta convencional usada em tais medidas de corrente elétrica para sistemas de alta potência. Trata-se de uma ponta Tektronix (A622), de alto custo, na faixa de 1000 dólares. Essa ponta, mede, usando bobinas indutivas, até 100 A e frequências de até 100 kHz. A ponta Tektronix é mais precisa para altas correntes e ineficiente para medidas de corrente de baixa intensidade. Já o sensor SCM-MP passivo, se comparado com a ponta Hall ou Tektronix, é muito mais eficiente para baixas correntes ( $\sim 100$  mA), mas sofre atenuação para correntes mais altas (acima de 10 A), uma vez, que a resposta do sensor SCM-MP passivo não passou ainda, por nenhum tratamento ou compensação.

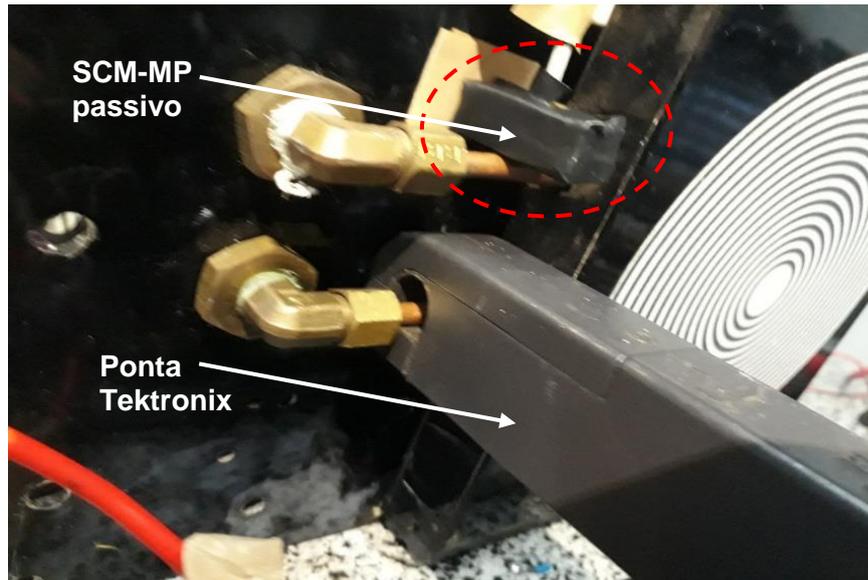


Figura 74: Medidas de alta corrente elétrica em sistema de indução magnética, utilizando o sensor SCM-MP passivo (círculo pontilhado) e uma ponta indutiva medidora de corrente elétrica – Tektronix (A622).

Outro fato que nos chamou a atenção nessa aplicação de eletrônica de potência está relacionado à incapacidade de medida do equipamento Gaussímetro da *Lake Shore*, bastante usado neste trabalho e que também é um equipamento de alto custo. O mesmo se mostrou ineficiente para medidas de corrente elétrica no sistema em questão (fio retilíneo). Nesse aspecto, o sensor SCM-MP se destaca e se mostra mais versátil que a ponta de efeito Hall da *Lake Shore* e a ponta por bobinas da Tektronix. A figura 75 ilustra o sinal resposta na tela do osciloscópio tanto para a ponta Tektronix, quanto para a ponta sensor SCM-MP passivo. Os resultados refletem a corrente na bobina de indução magnética de um sistema de aquecimento de indução magnética de baixa potência de 5 kW. Note que os dois sinais estão com mesma frequência e amplitude de sinal, entretanto a ponta Tektronix possuem um circuito elétrico amplificador (operacional) que aumentam o ganho da ponta e também elimina ruídos elétricos. Chama-nos a atenção, o fato de que o sinal do sensor passivo é um sinal puro advindo do composto magnetoelétrico, sem nenhum circuito amplificador e ou de eliminação de ruído. A diferença de fase entres os dois sinais está na faixa de  $90^\circ$  e acreditamos que se deve aos circuitos amplificadores internos da ponta Tektronix, uma vez o fabricante não apresenta nenhuma informação sobre a fase da ponta de corrente. Por outro lado, não analisamos a fundo o sinal de fase para a

utilização do sensor passivo porque estamos interessados somente na magnitude da corrente elétrica.

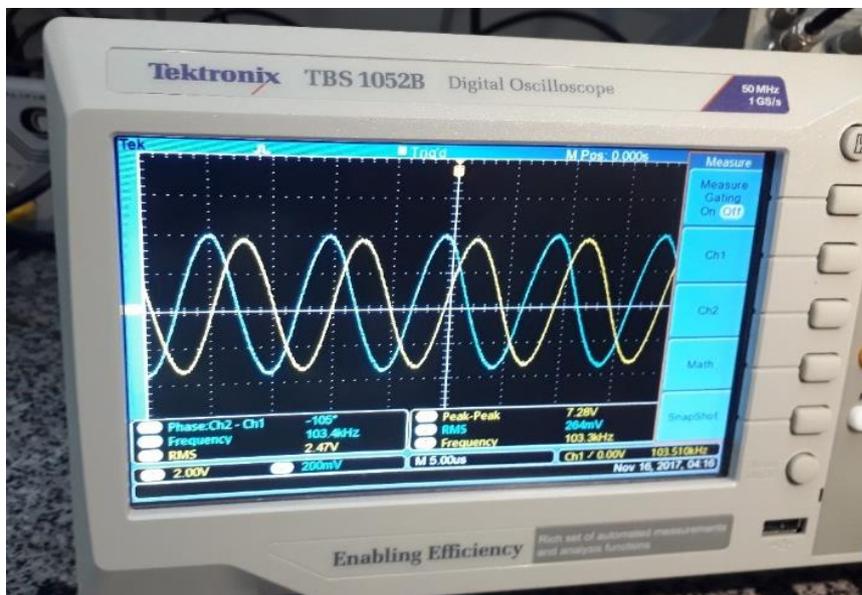


Figura 75: Sinal resposta para uma corrente de 200 mA – 104 kHz. Ponta indutiva Tektronix (A622) – canal 1 e sensor SCM-MP passivo – canal 2.

São as características e os resultados do sensor SCM-MP passivo que reflete o seu estado da arte, quando comparado com o sensor da Lake Shore e o sensor da Tektronix, que são consideradas importantes marca de equipamentos de medidas de precisão em laboratórios. Além disso, o sensor SCM-MP passivo é totalmente de aproximação (não invasivo), não necessita de bobinas indutoras e também não requer o uso de um resistor *Shunt*, colocado em série, para medidas de corrente elétrica. Sendo assim, poderá ser utilizado para medir corrente elétrica alternada em placas de circuito impresso, apresentando uma resposta linear para baixas correntes e segurança para medidas de correntes elétricas de alta intensidade. O ganho de tensão apresenta linearidade com o aumento da intensidade da corrente, que se mantém constante, para aplicações em temperatura ambiente. Para provar isso, submetemos o sensor SCM-MP passivo às correntes elétricas de altas intensidade, até 32 A. O resultado está ilustrado na figura 76. Observa-se que a resposta do sensor SCM-MP passivo tem uma leve variação em sua linearidade para medidas acima de 15 A. Acreditamos que esta alteração esteja relacionada ao início da saturação na deformação do elemento Terfenol-D. Utilizando a equação A2 que se encontra em anexo, calculamos a intensidade do campo gera por essa corrente elétrica, na qual é

da ordem de 300 Oe, e portanto, é próximo do campo de saturação do material Terfenol-D (400 Oe) [33]. Curiosamente, a mesma saturação aconteceu com o sensor SCM-MP quando foi submetido as caracterizações de campos magnéticos contínuos, conforme ilustramos na Figura 56.

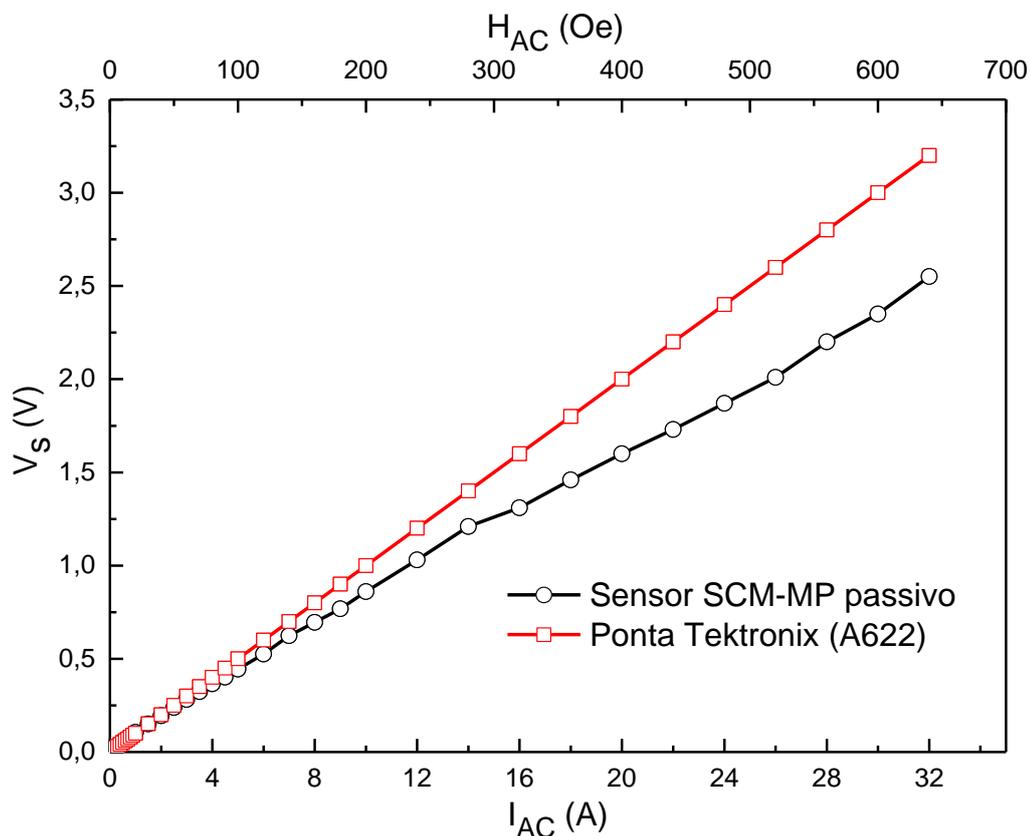


Figura 76: Tensão elétrica e Campo magnético alternado ( $H_{AC}$ ) em função da corrente elétrica alternada, para uma frequência de 104 kHz em regime de alta corrente.

Devemos deixar claro que o sensor passivo está sendo caracterizado de forma totalmente pura, sem nenhum circuito de amplificação, como por exemplo, circuitos operacionais ou linearização, como acontece a ponta de corrente Tektronix.

Na tabela 13, ilustramos alguns parâmetros relevantes e importantes que refletem a figura de mérito do sensor SCM-MP passivo. Acreditamos que as figuras de mérito dos sensores desenvolvidos neste trabalho possam ser melhoradas com uma produção dos sensores mais criteriosos em sua otimização de construção (colagem, tamanho, blindagem, etc.).

Tabela 13: Parâmetros que refletem a figura de mérito do sensor SCM-MP passivo

Parâmetro	Símbolo	Valor
Intervalo de medida de corrente (A)	$I_{AC}$	0,1 – 100
Sensibilidade de corrente em 25 °C (mV/A)	$S_I$	12,8
Temperatura de trabalho (°C)	$T_W$	25 - 90
Sensibilidade de corrente: (25 - 50°C) e (50 - 90°C) (mV/A/°C)	$S_{I-T}$	(-0,05) e (-0,2)
Blindagem efetiva de campo elétrico (dB)	$S_E$	> 40
Dimensões (mm)	L x w x t	40x10x10
Peso (g)	W	30

## 5.5. Aplicação inteligente utilizando o sensor SCM-MP passivo para monitoramento de corrente elétrica

Atualmente o conceito de sensores inteligentes para monitoramento de corrente elétrica e sua integração em uma rede sem fios ou *wireless*, tem se tornado altamente relevante na área de sensoriamento remoto à distância. Desenvolver uma tecnologia inovadora por meio de eletrônica embarcada aplicada no sensoriamento de medidas de corrente elétrica alternada, poderá levar o sensor SCM-MP passivo a um dispositivo tecnológico diferenciado. Uma boa vantagem para se atingir esse objetivo, está no fato de que o sensor SCM-MP passivo não depender de uma fonte de alimentação externa, como no caso dos sensores do **grupo I** (sensores construídos com materiais piezelétricos e bobinas). Portanto, o sensor SCM-MP passivo, é um dispositivo tecnologicamente inovador, que requer somente energia para alimentação da eletrônica embarcada em caso de rede wireless de grande distância.

Com base nessa motivação, nossas perspectivas são no sentido da montagem de uma unidade embarcada proposta como aplicação final para o sensor SCM-MP passivo. Esta unidade consiste de uma placa microprocessada com microcontroladores de tecnologia Microchip e seu diagrama está ilustrado na figura 77. Em função deste projeto estar sendo patenteado, somente o diagrama em blocos está sendo apresentado. Trata-se de uma placa dotada de um conversor analógico

digital (A/D) de alta resolução, uma saída Ethernet para comunicação em rede internet e também possibilidade de expansão para saída *WiFi* para comunicação com um APP *Android* ou *IOS*, por meio da rede ethernet ou protocolo *Bluetooth*. Um algoritmo de programa lerá a resposta  $V_s$  do sensor passivo e realizará as operações matemáticas de acordo com os coeficientes obtidos nos gráficos de  $V_s$ , apresentados nesta seção de resultados. Desta forma, os dados da corrente elétrica, frequência e intensidade de campo magnético poderão ser monitorados por um computador ou APP. Os componentes eletrônicos serão todos SMD, o que tornará a unidade embarcada pequena, leve e econômica. A alimentação da placa embarcada pode ser realizada por uma bateria recarregável de 9 V. Em função do pedido de patente associado a este trabalho, não estamos apresentando maiores detalhes de desenho, circuito e ponta de medida.

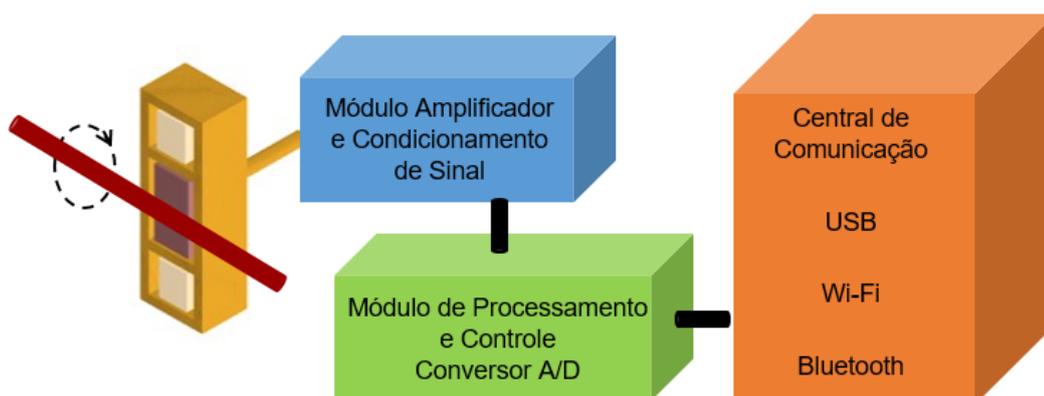


Figura 77: Representação esquemática da aplicação e uso do sensor SCM-MP passivo como sensor de medida de campo magnético ou corrente elétrica alternada.

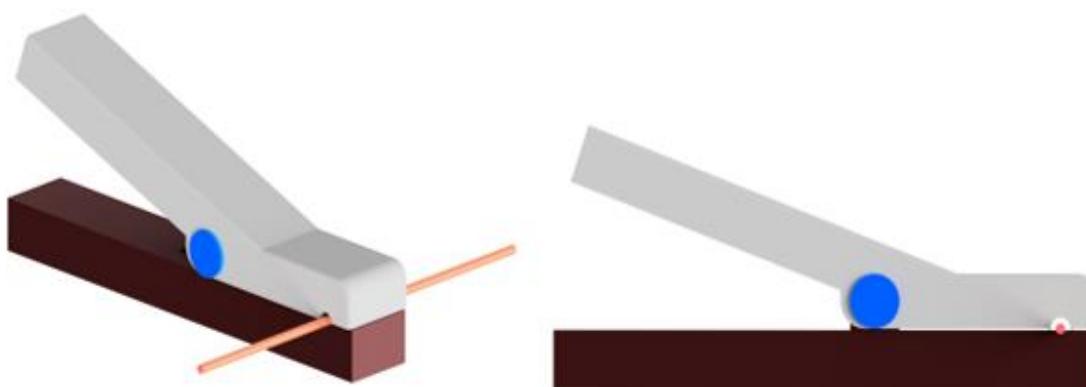


Figura 78: Representação da ponta de corrente elétrica alternada, protótipo do sensor SCM-MP passivo. Protegido por um pedido de patente PI.

Na tabela 14, temos as especificações do sensor SCM-MP passivo de campo magnético e corrente elétrica alternada, proposto como perspectiva final deste trabalho com pedido de patente encaminhado.

Tabela 14: Especificações do sensor protótipo magnetoelétrico inteligente para corrente elétrica alternada.

<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Intervalo de medida de corrente (A)	I	0,01 – 3
Sensibilidade de corrente em 30°C (mV/A)	S <sub>I</sub>	12,8
Temperatura de trabalho (°C)	T <sub>w</sub>	25 - 70
Sensibilidade de corrente: (25 - 50°C) e (50 - 90°C) (mV/A/°C)	S <sub>I-T</sub>	(-0,05) e (-0,2)
Blindagem efetiva de campo elétrico (dB)	S <sub>E</sub>	> 40
Dimensões (mm)	L x w x t	40x10x10
Peso (g)	W	30g
Microcontrolador		16 Bit, 16MHz <i>Clock</i>
Power		<1,5W
Tempo de atraso		< 20 ms
Tempo de operação contínua		>7h (NimH)
Tensão elétrica de operação		4,5 – 5,5V
Ganho de tensão elétrica		10x

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Nesse trabalho foi apresentado um estudo detalhado sobre sensores de campo magnético de estado sólido, utilizando materiais piezelétricos de diferentes geometrias e também materiais magnetostritivos. Uma importante revisão bibliográfica foi observada, nos mostrando que existem vários trabalhos envolvendo estes sistemas, porém a maioria deles exploram de forma predominante a fenomenologia dos efeitos, ao invés de uma aplicação final ou mesmo a otimização de construção dos sensores magnetoelétricos. Nesse contexto, esse trabalho buscou apresentar uma otimização e entendimento dos parâmetros que maximizam a construção dos sensores ME, com os materiais já disponíveis no mercado de componentes eletrônicos. Foram estudados e fabricados dois grupos de sensores: I e II. Os resultados obtidos nos deram informações relevantes para o entendimento da otimização destes sensores e seu princípio físico de funcionamento.

Os resultados obtidos para os sensores do grupo I comprovaram o efeito magnetoelétrico extrínseco em cerâmicas puramente ferroelétricas quando essas apresentam geometria em forma de discos, retângulos e anel, com eletrodos condutores em sua superfície, em meio a um campo magnético formado por uma componente estática e outra oscilante. Para os sensores SCM com elemento piezelétrico, retangulares e anel, apresentamos justificativas, que nos leva a crer na existência de uma possível sobreposição de princípios físicos: a Força de Lorentz, no eletrodo; e Força de Lorentz, da espira da bobina sobre o material; nos quais podemos concluir que os dois fenômenos observados levam à um mesmo ponto, o efeito piezelétrico direto. Além do mais, demonstramos o quanto o coeficiente ME,  $\alpha_V$ , depende das características geométricas e de polarização dos elementos piezelétricos.

Com relação ao segundo grupo, o sensor SCM-MP, construído com o material magnetostritivo, Terfenol-D, e piezelétrico, PZT-5A, apresentou alto coeficiente ME,  $\alpha_V$ , demonstrando viabilidade e aplicação na área de sensoriamento de campo

magnético ou corrente elétrica, de modo não invasivo. Diante dos resultados dos sensores construídos nesse trabalho, escolhemos o sensor SCM-MP, para aplicá-lo como um sensor de corrente elétrica AC, que denominamos de sensor SCM-MP passivo. A esse sensor, foi incorporado um circuito eletrônico de aquisição e conversão dos dados, tornando-o um sensor inteligente de corrente elétrica alternada em redes de distribuição de 60 Hz. Além disso, aplicações de uso em alta frequência também foi demonstrado, comprovando a versatilidade do sensor SCM-MP passivo em uma aplicação de chão de fábrica.

Outro fator que chamou a atenção foi a comparação do sinal resposta direto do sensor passivo, que mostrou ser superior em ganho de resposta quando comparado com uma ponta de efeito Hall, já com sistemas amplificadores de sinal, no caso um equipamento da Lake Shore. Seguindo a mesma comparação, também o comparamos com a ponta de corrente comercial Tektronix (A622) que opera por princípio físico de bobina de indução. Em todas as duas comparações reais o sensor SCM-MP passivo mostrou superioridade. Frente a estas duas comparações de sucesso, com equipamentos comerciais acreditamos ter um vasto campo de aplicação para o sensor SCM-MP passivo, frente os resultados apresentados e a sua facilidade de construção, comparado com os sensores comerciais mencionados.

Por fim, podemos concluir que se trata de um trabalho tecnologicamente inovador, portanto, fizemos um pedido de patente PI, no qual, esse pedido está sendo requerido ao INPI, órgão responsável pela proteção de patentes no Brasil.

# CAPÍTULO 7

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 
- [1] MONTANHER, D. Z. “*Compósitos Laminares Magnetoelétricos Aplicados ao Sensoriamento de Campos Magnéticos*”. Tese (Doutorado em Física) – Universidade Estadual de Maringá. UEM. Maringá, Paraná. 95 f. (2013).
- [2] VAN SUCHETELENE, J. “*Philips Res*”. Rep. <https://doi.org/PRREA9>, **27**, 28 (1972).
- [3] NEWNHAM, R.E. “*Ferroelectrics*”, **68**(1/4) 1 (1986).
- [4] UCHINO, K. “*Ferroelectric Devices*”. Marcel Dekker, Inc., New York (2000).
- [5] RYU J., PRIYA S., UCHINO K. and KIM H.E. “*Magnetolectric Effect in Composites of Magnetostrictive and Piezoelectric Materials*”. Journal of Electroceramics, **8**, 107 (2002).
- [6] Portal de Periódicos CAPES. Buscar por assunto e enviar. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br/>>. Acessado em: 30/03/2017.
- [7] FETISOV, Y. K. CHASHIN, D. V., and SRINIVASAN, G., “*Piezoinductive effects in a piezoelectric ring with metal electrodes*”. Journal of Applied Physics **106**, 044103 (2009).
- [8] KRYKANOV, I. M., KOPLIK, A. B., FETISOV, Y. K. and CHASHIN, D. V. “*Permanent Magnetic Field Sensor Based on a Piezoelectric Ring*”. Technical Physics Letters, **36**, 838 (2010).
- [9] FETISOV, Y. K., CHASHIN, D. V., SEGALLA, A. G. and G. SRINIVASAN. “*Resonance Magnetolectric Effects in a Piezoelectric Bimorph*”. Journal of Applied Physics **110**, 066101 (2011).
- [10] KHOMSKII D. “*Classifying multiferroics: Mechanisms and effects*”. Physics **2**, 20 (2009).
- [11] SCHMID, H. “*Ferroelectrics*”, **162**, 317 (1994).

- 
- [12] ASHER, E., RIEDER, H., SCHMID, H. and STOSSEL, H. J. Appl. Phys. **37**, 1404 (1966).
- [13] SMOLENSKII, G. A. and CHUPIS, I. E. "Ferroelectromagnets" Sov. Phys. Usp. **25**, 475 (1982).
- [14] ASTROV, D. N. "Magnetolectric Effect in Chromium Oxide" Soviet Physics JETP-USSR, **13**, 729 (1961).
- [15] FONER, S. and HANABUSA, M. "Magnetolectric Effects in  $Cr_2O_3$  and  $(Cr_2O_3)_{0,8}(Al_2O_3)_{0,2}$ ", Journal of Applied Physics, **34**,1246 (1963).
- [16] SHTRIKMAN, S. and TREVES, D. "Observation of the Magnetolectric Effect in  $Cr_2O_3$  Powders", Physical Review, **130**, 986(1963).
- [17] HORNREICH, R. "The Magnetolectric Effect: Some Likely Candidates, Solid State Communication", **7**,1081 (1969).
- [18] RADO, G. T. "Observation and Possible Mechanisms of Magnetolectric Effects in a Ferromagnet", Physical Review Letters, **13**, 335 (1964).
- [19] EERENSTEIN, W., MATHUR, N. D. and SCOTT, J. F. "Multiferroic and Magnetolectric Materials", Nature, **442**, 759 (2006).
- [20] TELLEGEN, B. D. H. "The Gyration, a New Electric Network Element", Philips Research Reports, **3**, 81 (1948).
- [21] BOOMGAARD, J. V. D., TERRELL, D. R., BORN, R. A. J. and GILLER, H. F. J. I. "An In situ Grown Eutectic Magnetolectric Composite Materials: Part 1 Composition and Unidirectional Solidification", Journal of Materials Science, **9**, 1705 (1974).
- [22] RUN, A. M. J. G., TERRELL, D. R. and SCHOLING, J. H. "An in situ Grown Eutectic Magnetolectric Composite Material: Part 2 Physical Properties", Journal of Materials Science, **9**, 1710 (1974).
- [23] BOOMGAARD, J., RUN, A. M. J. G. and SUCHTELEN, J. "Magnetolectricity in Piezoelectric–Magnetostrictive Composites", Ferroelectrics, **10**, 295 (1976).

- 
- [24] BOOMGAARD, J., RUN, A. M. J. G. and SUCHTELEN, J. “*Piezoelectric-Piezomagnetic Composites with Magnetoelectric Effect*”, *Ferroelectrics*, **14**, 727 (1976).
- [25] BOOMGAARD, J. and BORN, R. A. J. “*A Sintered Magnetoelectric Composite Material BaTiO<sub>3</sub>-Ni(Co, Mn)Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>*”, *Journal of Material Science*, **13**, 1538 (1978).
- [26] PRIYA, S., ISLAM, R., DONG, S. X. and VIEHLAND, D. “*Recent Advancements in Magnetoelectric Particulate and Laminate Composites*”, *Journal of Electroceramics*, **19**, 147 (2007).
- [27] PACHECO, C. J. “*Aplicação de Materiais com Magnetostricção Gigante em Sensores de Deslocamento sem Contato*”. Dissertação (mestrado em Física) – Pontifícia universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 69f. (2007).
- [28] ASHCROFT, N. W., MERMIN, N. D. “*Solid State Physics*”, Saunders, 1976.
- [29] ALECRIM, D. T. J. “*Avaliação da magnetostricção de fases magnéticas no sistema Fe-Ti*”. Dissertação (mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo. Lorena. 85f. (2012).
- [30] CHEN, D. X., SANCHEZ, A. “*Demagnetizing factors for rectangular prism*”. *IEEE Transactions on magnetics*, **41**, 6 (2005).
- [31] HANDLEY, R. “*Modern magnetic materials*”. Principles and applications. New York, Jhon Wiley & Sons, Inc, 740p. (2000).
- [32] CRAIK, D. “*Magnetism, principles and a applications*”. New York, Jhon Wiley & Sons, Inc, 459p. (1995).
- [33] DAPINO, M. J. “*On magentostriptive materials and their use in smart materialas transducers*”. *Structural Engineering and Mechanics*, **17**, 303 (2004).
- [34] MURATA ELECTRONICS “*PZT Application Manual*” (1999).
- [35] RAMIREZ-FERNANDEZ, F. J., PERES, H. E. “*Sensores: Tecnologias e Aplicações*”, **1** – CD. In: EIRAS, J. A. “*Materiais Piezoelétricos*”. 1. ed. São Paulo: Alpha Mídia Assessoria Fonográfica, Cap. 2 (2004).

- 
- [36] VIEIRA, R. G. “A piezoeletricidade no cotidiano! ”, Ciência e Diversão. Disponível em: < <http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/08/a-piezoeletricidade-no-cotidiano.html>>. Acessado em: 03/03/2017.
- [37] SHAHINPOOR, M., SCHNEIDER, H. J. “Intelligent Materials”, Royal Society of Chemistry (RSC) Publishers, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road Cambridge CB4 0WF, Great Britain, 1st. edition (2008).
- [38] SREENIVASULU G., LALETIN U., PETROV V. M., PETROV V. V., and SRINIVASAN G. “A permendur-piezoelectric multiferroic composite for low-noise ultrasensitive magnetic field sensors”. *Appl. Phys. Lett.* **100**, 173506 (2012);
- [39] RYU, J., PRIYA, S., CARAZO, A. V., UCHINO, K. and KIM, H. E. “Effect of the Magnetostrictive Layer on Magnetolectric Properties in Lead Zirconate Titanate/Terfenol-D Laminate Composites”, *Journal of American Ceramic Society*, **84**, 2905 (2001).
- [40] RYU, J., CARAZO, A. V., UCHINO, K., and KIM, H. E. “Magnetolectric Properties in Piezoelectric and Magnetostrictive Laminate Composites”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **40**, 4948 (2001).
- [41] RYU, J., PRIYA, S., UCHINO, K., KIM, H. E. and VIEHLAND, D. “High Magnetolectric Properties of  $_{0,68}\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-0,32}\text{PbTiO}_3$  Single Crystal and Terfenol-D Laminate Composites”, *Journal of the Korean Ceramic Society*, **39**, 813 (2002).
- [42] DONG, S. X., LI, J. F. and VIEHLAND, D. “Ultrahigh Magnetic Field Sensitivity in Laminates of Terfenol-D and  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  Crystals”, *Applied Physics Letters*, **83**, 2265 (2003).
- [43] DONG, S. X., LI, J. F. and VIEHLAND, D. “Characterization of Magnetolectric Laminate Composites Operated in Longitudinal–Transverse and Transverse–Transverse Modes”, *Journal of Applied Physics*, **95**, 2625 (2004).
- [44] DONG, S. X., LI, J. F. and VIEHLAND, D. “A Longitudinal–Longitudinal mode Terfenol-D/ $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$  Laminate Composites”, *Applied Physics Letters*, **85**, 5305 (2004).

- 
- [45] DONG, S. X., ZHAI, J., BAI, F., LI, J. F. and VIEHLAND, D. “*Push-Pull Mode Magnetostrictive/Piezoelectric Laminate Composite with an Enhanced Magnetolectric Voltage Coefficient*”, Applied Physic Letters, **87**, 062502 (2005).
- [46] FREITAS, V. F., SANTOS, I. A., BOTERO, E., FRAYGOLA, B. M., GARCIA, D. e EIRAS, J. A. “*Piezoelectric Characterization of (0,6)BiFeO<sub>3</sub>-(0,4)PbTiO<sub>3</sub> Multiferroic Ceramics*”, Journal of the American Ceramic Society, **94**, 754 (2011).
- [47] BERLINCOURT, D. and KRUEGER, H. H. A. Technical Publication, TP-266.
- [ 48 ] ATCP Engenharia Física. Aplicação note RT – ATCP-01. Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades. Disponível em: <[www.atcp-ndt.com/imagens/produtos/ceramicas/artigos/RT-ATCP-01.pdf](http://www.atcp-ndt.com/imagens/produtos/ceramicas/artigos/RT-ATCP-01.pdf)>. Acessado em: 20/10/2016.
- [ 49 ] ETREMA, TdVib, LLC. “*Terfenol-D’s physical properties*”. Disponível em: <http://tdvib.com/terfenol-d/>. Acessado em: 05/04/2017.
- [50] GAIOTTO, F. J., MONTANHER, D. Z., NESPOLO, R. G., FREITAS, A. L. S., SILVA, D. M., PEREIRA, J. R. D. & SANTOS, I. A. *Exploiting the magnetolectric effect in piezoelectric/conductor composites for sensing static magnetic fields*, Integrated Ferroelectrics, **174**, 81 (2016).
- [51] GUIFFARD, B., ZHANG, J.-W., GUYOMAR, D., GARBUIO, L., COTTINET, P.-J., e BELOUADAH, R. “*Magnetic field sensing with a single piezoelectric ceramic disk: Experiments and modeling*”, Journal of Applied Physics, 108, 094901 (2010).
- [52] JEWETT JR., J.W.; SERWAY, R.A. Física para cientistas e engenheiros: *Eletromagnetismo*. V. 3, 8. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2012.
- [53] BECHMANN, R, and FAIR I.E. “*Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators*”. In IEEE ANSI. **176**; 1 (1970).
- [54] Polo Magnético. Disponível em: < <http://www.polomagnetico.com.br/>>. Acessado em: 10/03/2017.
- [55] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. “*Fundamentos de física: Eletromagnetismo*”. V. 3, 9. ed. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos (2012).
- [56] BOYLESSAD, R. “*Introdução à análise de circuitos*”. Rio de Janeiro: Pearson (2012).

---

# APÊNDICE

## A1. FUNDAMENTOS DE MAGNETISMO

Em 1819, o professor e físico Dinamarques Hans Christian Oersted observou que uma corrente elétrica era capaz de alterar a direção de uma agulha magnética de uma bússola, contrariando o que se acreditava até o início do século XIX: “não há relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos”. Com um experimento muito rudimentar, utilizando uma bússola, Oersted fez circular uma corrente elétrica por um condutor, gerada por uma pilha e descreveu algumas constatações, os quais nos remetem aos três principais fenômenos do eletromagnetismo e regem todas as aplicações tecnológicas do eletromagnetismo [52, 55]:

- I. Condutor percorrido por corrente elétrica produz campo magnético;
- II. Campo magnético provoca ação de uma força magnética sobre um condutor percorrido por corrente elétrica.
- III. Fluxo Magnético variante sobre um condutor gera (induz) corrente elétrica.

### A1.1. Campo Magnético gerado por uma Corrente Elétrica

Um campo magnético pode ser criado por meio do movimento de cargas elétricas, tal como o fluxo de corrente num condutor. Ao campo magnético originado por uma corrente elétrica chamamos de Campo Eletromagnético. Este campo magnético é originado pelo momento de giro do dipolo magnético (referente ao spin do elétron) e pelo momento da órbita do dipolo magnético de um elétron dentro de um átomo. No mesmo ano que Oersted comprovou a existência de um campo magnético produzido pela corrente elétrica, o cientista francês André Marie Ampère, preocupou-se em descobrir as características desse campo. Nos anos seguintes, outros pesquisadores como Michael Faraday, Karl Friedrich Gauss e James Clerk Maxwell continuaram investigando e desenvolveram muitos dos conceitos básicos do eletromagnetismo. Considere um circuito fechado no qual circula uma corrente elétrica

em uma secção retilínea conforme ilustrado na figura A1. Imagine que o circuito é composto de pequenos segmentos infinitesimais  $d\vec{s}$ .

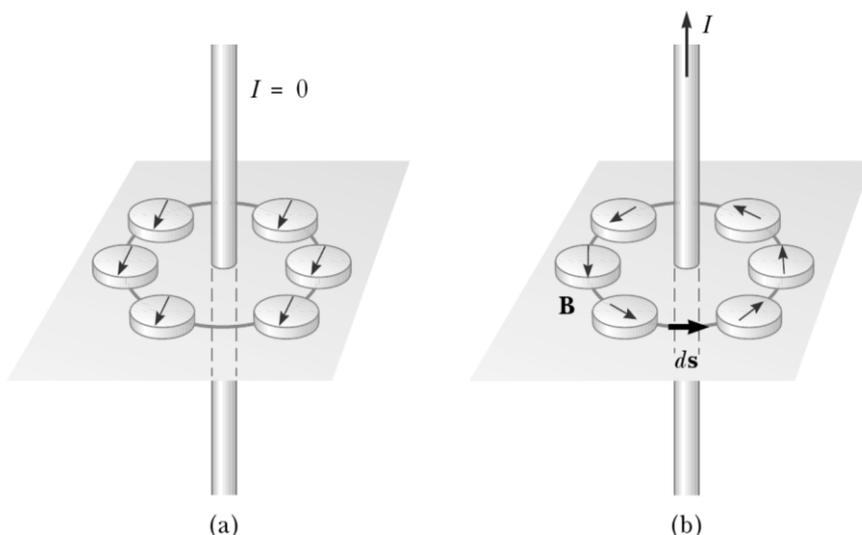


Figura A1: Representação esquemática de um condutor retilíneo (a) sem corrente elétrica; (b) com corrente elétrica. Quando o fio conduz corrente elétrica  $i$ , as agulhas das bússolas são defletidas na direção tangente aos círculos, que é a direção do campo magnético criado pela corrente [52].

Calculamos então o produto escalar  $\vec{B} \cdot d\vec{s}$  para cada segmento. Segundo os experimentos realizados por Ampère, a soma de todos os valores deste produto escalar para o circuito fechado é igual a corrente no interior do circuito vezes uma constante. Essa relação é conhecida como Lei de Ampère e pode ser escrita como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot i \quad (A1)$$

onde  $i$  é a corrente elétrica e  $\mu$  é a permeabilidade magnética, que para o vácuo é dada por:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot \frac{m}{A}$ .

De modo geral, destacaremos três casos específicos de como determinar o campo magnético, para um condutor retilíneo, para espira circular e solenoide.

- *Condutor Retilíneo*

Para um fio retilíneo, podemos considerar circuitos fechados ao redor do fio na forma de círculos. Aplicando a lei de Ampère, obtemos:

---


$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int ds = B(2\pi r) = \mu_0 \cdot i$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2\pi \cdot r} \quad (\text{A2})$$

onde  $\oint ds = 2\pi \cdot r$ , e o módulo de campo magnético é constante ao longo do circuito.

- *Espira Circular*

Para uma espira circular, temos a possibilidade de se determinar o campo magnético  $B_x$  referente a intensidade desse campo medido sobre o eixo x que passa pelo centro de uma espira circular:

$$B_x = \int \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \cdot \frac{a \cdot dl}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot a}{4\pi (x^2 + a^2)^{3/2}} \int dl \quad (\text{A3})$$

A integral de  $dl$  é dada pelo comprimento da circunferência,  $\int dl = 2\pi a$ , e finalmente obtemos:

$$B_x = \frac{\mu_0 \cdot i \cdot a^2}{2 \cdot (x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{A4})$$

onde “x” é a distância ao longo do eixo de uma espira circular e “a” é o raio da espira. Caso haja uma bobina com “N” espiras, todas com o mesmo raio temos:

$$B_x = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i \cdot a^2}{2 \cdot (x^2 + a^2)^{3/2}} \quad (\text{A5})$$

pois, cada espira fornece uma contribuição para o campo magnético e o campo total é  $N$  vezes o campo de uma espira. O valor máximo do campo magnético  $B$  ocorre quando  $x = 0$ , i.e., no centro da espira ou bobina e é dado por:

$$B_x = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{2 \cdot a} \quad (\text{A6})$$

---

- *Solenoide*

O solenoide é constituído por um enrolamento helicoidal de fio sobre um núcleo, em geral com seção reta circular. Aplicando a lei de Ampère, para um percurso  $ab$  dentro do solenoide temos:

$$\int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot L \quad (\text{A7})$$

e a corrente elétrica interna ( $i_{int}$ ) =  $n \cdot L \cdot i$ , logo:

$$B \cdot L = \mu_0 \cdot n \cdot L \cdot i$$

então,

$$B = \mu_0 \cdot n \cdot i \quad (\text{A8})$$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i \quad (\text{A9})$$

Caso as espiras do solenoide sejam retangulares o campo magnético no centro da espira é o resultado da sobreposição dos campos magnéticos produzidos pelos quatro segmentos de fio que compõem a espira, sendo que todos os segmentos contribuem com campos que possuem mesma direção e sentido. Admitindo-se que o sentido da corrente seja horário, o campo magnético no centro da espira apontará para dentro da página, perpendicular ao plano do papel. Nesse caso, teremos:

$$B = \frac{2\mu_0 \cdot i \cdot (L^2 + d^2)^{1/2}}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (\text{A10})$$

De forma um pouco mais rigorosa, devemos considerar  $B$  como a densidade de fluxo magnético, e assim, escrever o correspondente ao campo magnético,  $H$ , definido como:

---

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (\text{A11})$$

onde  $\mu_0 = 4. \pi. 10^{-7} T/A.m$ , é a permeabilidade magnética para o vácuo;  $\mu_r = 1$  é a permeabilidade magnética para ar [52].

## A1.2. Força Magnética em um condutor retilíneo

Uma carga que se desloca com velocidade  $\vec{v}$  na presença de um campo elétrico  $\vec{E}$  e de um campo magnético  $\vec{B}$  experimenta tanto uma força elétrica  $q \cdot \vec{E}$  quanto uma força magnética  $q\vec{v} \times \vec{B}$ . Consequentemente, a força total chamada de Força de Lorentz, quando age sobre a carga é:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (\text{A12})$$

Como uma força magnética é exercida sobre uma única partícula carregada quando ela se desloca por meio de um campo magnético externo, não deve ser surpreendente descobrir que um fio conduzindo corrente também sofre uma força magnética quando colocado em campo magnético externo. Esse efeito é mostrado na figura A2, onde o fio condutor sob a ação de um campo magnético é desviado para a esquerda ou para a direita quando uma corrente  $I$  o atravessa.

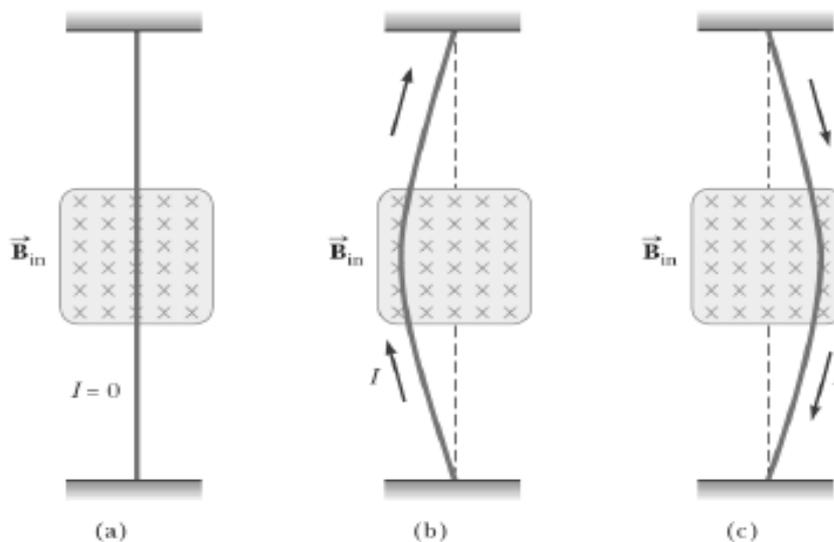


Figura A2: Um fio suspenso verticalmente entre os polos de um ímã é visto do polo sul do ímã, tal que o campo magnético (x em azul) está apontado para dentro da página. (a) Quando não há corrente no fio, ele permanece imóvel. (b) quando uma corrente é conduzida pelo fio para cima, o fio é desviado para a esquerda. (c) Quando a corrente é para baixo, o fio é desviado para a direita. (Fonte: Seway-Jewett 6ed. [52]).

Nesse caso, podemos seguir as referências básicas [52] e reescrever a expressão da força magnética de Lorentz total sobre o fio de comprimento  $l$  é:

$$\vec{F}_B = i \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (\text{A13})$$

onde  $l$  é um vetor na direção da corrente  $I$ , e o módulo de  $l$  é igual ao comprimento do seguimento.

## A2. CONDUTIVIDADE

A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é a capacidade de um material transportar o fluxo de uma corrente elétrica (de um fluxo de elétrons) e também usada para especificar o caráter elétrico de um material. A unidade da condutividade elétrica é o inverso da unidade da resistividade, ou seja,  $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$  ou Siemens [S], no Sistema Internacional de Unidades e é definida matematicamente por [52, 55]:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (\text{A14})$$

Materiais sólidos exibem uma espantosa faixa de condutividades. De fato, uma maneira de classificar materiais sólidos é de acordo com a facilidade com que conduzem uma corrente elétrica; dentro desse esquema de classificação existem 3 grupamentos: condutores, semicondutores e isolantes. Metais são bons condutores, tipicamente tendo condutividades da ordem de  $10^7 [\Omega.m]^{-1}$ . No outro extremo estão os materiais com muito baixas condutividades, situando-se entre  $10^{-10}$  e  $10^{-20} [\Omega.m]^{-1}$ ; esses são os isolantes elétricos. Materiais com condutividades intermediárias, geralmente entre  $10^{-6}$  e  $10^4 [\Omega.m]^{-1}$ , são denominados semicondutores. A condutividade ( $\sigma$ ) em  $[\Omega.m]^{-1}$  de uma série de materiais à temperatura ambiente é apresentada da figura A3.

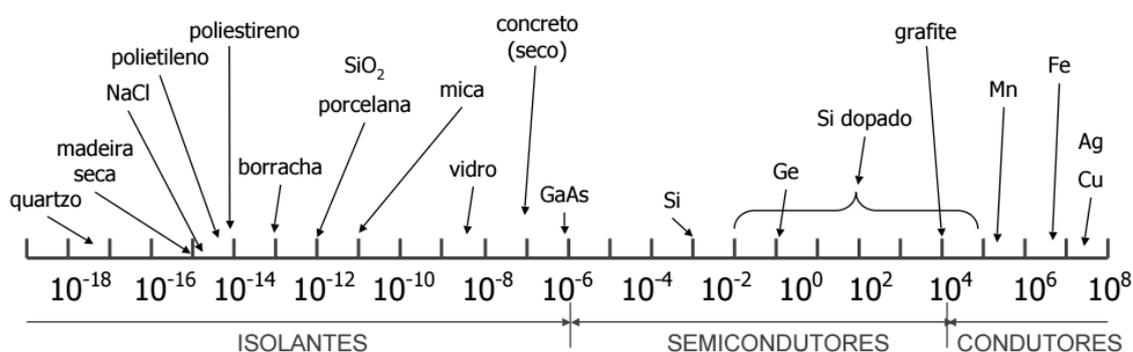


Figura A3: Classificação de materiais sólidos de acordo com a magnitude de sua condutividade elétrica ( $\sigma$ ) em  $[\Omega.m]^{-1}$ .

À temperatura ambiente, o material que apresenta melhor condutividade elétrica é a prata. Comparado ao Cobre, a prata tem condutividade elétrica de 108%; o cobre 100%; o ouro 70%; o alumínio 60% e o titânio apenas 1%. O ouro, em qualquer comparação, seja no mesmo volume, ou na mesma massa, sempre perde em condutividade elétrica ou térmica para o cobre. Entretanto, para conexões elétricas, em que a corrente elétrica deve passar de uma superfície para outra, o ouro leva muita vantagem sobre os demais materiais, pois sua oxidação ao ar livre é extremamente baixa, resultando numa elevada durabilidade na manutenção do bom contato elétrico.

Entre os citados, o alumínio seria o pior material para as conexões elétricas, devido à facilidade de oxidação e à baixa condutividade elétrica da superfície oxidada. Prata (Ag) é o metal nobre de maior uso industrial, notadamente nas peças de contato. A cor prateada brilhante é característica, escurecendo-se devido ao óxido de prata ou sulfeto de prata que se forma em contato com o ar. Sua obtenção resulta frequentemente de minérios combinados de prata, cobre e chumbo. A prata, devido às suas características elétricas, químicas e mecânicas, cujos valores numéricos estão indicados na tabela 1, é usada em forma pura ou de liga, cada vez mais em partes condutoras onde uma oxidação ou sulfatação viria criar problemas mais sérios. É o caso de peças de contato, notadamente nas partes em que se dá o contato mecânico entre duas peças e, onde, além de um bom material condutor, é conveniente ter-se um metal que não influa negativamente devido a transformações metálicas. No caso da prata, no seu estado puro, encontra o seu uso nas pastilhas de contato, para correntes relativamente baixas. Quando essa solução não é adequada, usam-se pastilhas de liga de prata, onde o Ag é misturado com níquel e cobalto, paládio, bromo e tungstênio. A prateação, numa espessura de alguns micrometros, é usada para proteger peças de metal mais corrosível, ou ainda, como eletrodos em compósitos cerâmicos.

Tabela A1: Relação de materiais metálicos e sua respectiva condutividade térmica a temperatura ambiente. Adaptado de Boylestad [56].

<i>Material</i>	<i>Condutividade (<math>\Omega.m</math>)<sup>-1</sup></i>
Prata	6,17 x 10 <sup>-9</sup>
Cobre	5,91 x 10 <sup>-9</sup>
Ouro	4,25 x 10 <sup>-9</sup>
Alumínio	3,63 x 10 <sup>-9</sup>
Tungstênio	1,90 x 10 <sup>-9</sup>
Ferro	1,03 x 10 <sup>-9</sup>
Platina	0,94 x 10 <sup>-9</sup>

Sabe-se quando um campo magnético de aproxima de um material condutor, Correntes de Foucault ( $i_F$ ) são induzidas no interior desse condutor numa certa profundidade da camada metálica. Essas correntes circulam em torno do eixo de

simetria do campo magnético em circunferências concêntricas com raio  $r$  [52]. Caso esse campo magnético for gerado por uma corrente elétrica circulando em um solenoide ou uma bobina, a  $i_F$  circulará em um sentido oposto, segundo a lei de indução de Faraday, gerando uma força de repulsão  $F$  entre o solenoide e o material condutor. Além disso, constata-se que as correntes de Foucault diminuem exponencialmente de intensidade da medida que os campos penetram no condutor, conforme ilustrado na figura A4 [55].

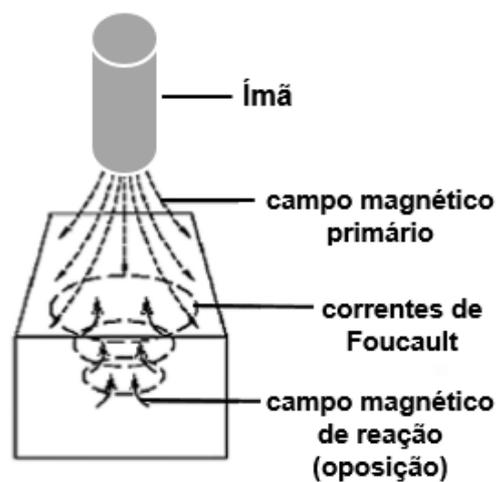


Figura A4: Ilustração referente a formação das correntes concêntricas de Foucault à medida que aproximamos o solenoide do condutor plano. São também mostradas as linhas de campo magnético geradas pelas correntes de Foucault em oposição ao campo externo aplicado, de acordo com a lei de Lenz. Adaptada de [52, 55].