



**Universidade Estadual de Maringá**  
*Programa de pós-graduação em física*

---

Diogo Zampieri Montanher

Caracterização e Desempenho de Transformadores  
de Estado Sólido Radiais Multiferroicos

---

Maringá – PR, Outubro de 2010.

Diogo Zampieri Montanher

Caracterização e Desempenho de Transformadores  
de Estado Sólido Radiais Multiferroicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação da Universidade Estadual de Maringá  
para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Ivair Aparecido dos Santos  
Co-Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá – PR, Outubro de 2010.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Ivair A. dos Santos, pela confiança e incentivo no decorrer da inestimável orientação, sem a qual não seria possível o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira, por sua co-orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Msc. Valdirlei Fernandes Freitas, por dividir comigo seus conhecimentos e suas experiências no dia-a-dia do laboratório.

Ao Grupo de Desenvolvimento de dispositivos Multifuncionais GDDM/UEM, por fornecer todos os recursos necessários para a realização deste trabalho.

Ao Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas (GCFerr/UFSCar) pelo fornecimento de materiais utilizados neste trabalho.

A CAPES, pelo suporte financeiro.

Aos funcionários do DFI/UEM: Márcio H. Batata, Jurandir A. Pereira e Akiko Nisida.

A minha família e namorada pelo apoio e pelos momentos de descontração.

Agradecimentos especiais a todos os colegas de laboratório.

A todos, minha eterna gratidão e sinceros agradecimentos.

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1:</b> Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico .....	6
<b>Figura 1.2:</b> Cella unitária do cristal de quartzo. (a) Cella neutra, (b) cela com tensão mecânica .....	7
<b>Figura 1.3:</b> Elemento piezoelétrico composto por um material piezoelétrico e dois eletrodos (Referência 8) .....	9
<b>Figura 1.4:</b> (a) Modo de vibração longitudinal de um elemento piezoelétrico. (b) Modo de vibração transversal de um elemento piezoelétrico (Referência 8) .....	10
<b>Figura 1.5:</b> (a) Circuito equivalente de um elemento piezoelétrico. (b) Circuito equivalente descrito pela admitância .....	11
<b>Figura 1.6:</b> Característica da condutância, $G$ , e da susceptância, $B$ , de um elemento piezoelétrico polarizado .....	11
<b>Figura 1.7:</b> Diagrama eletromecânico de um elemento piezoelétrico (Referência 8) .....	12
<b>Figura 1.8:</b> Transformador piezoelétrico de modo de vibração radial monocamada .....	15
<b>Figura 1.9:</b> (a) Diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico atuador. (b) Diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico transdutor .....	15
<b>Figura 1.10:</b> Diagrama elétrico de um transformador piezoelétrico (Referência 8) .....	16
<b>Figura 2.1:</b> Circuito elétrico análogo ao transformador piezoelétrico (Referência 8) .....	18
<b>Figura 2.2:</b> Circuito elétrico equivalente análogo ao transformador piezoelétrico (Referência 8) .....	18
<b>Figura 2.3:</b> Circuito equivalente ao transformador piezoelétrico .....	20
<b>Figura 2.4:</b> Representação esquemática da montagem experimental para a determinação dos parâmetros de admitância (Referência 15) .....	22
<b>Figura 2.5:</b> Representação esquemática do circuito elétrico utilizado para calcular os parâmetros de admitância $Y_{11}$ e $Y_{21}$ .....	23
<b>Figura 2.6:</b> Representação esquemática do circuito elétrico utilizado para calcular os parâmetros de admitância $Y_{22}$ e $Y_{12}$ .....	23
<b>Figura 3.1:</b> (a) Procedimento para medir a admitância de entrada. (b) Procedimento para medir a admitância de saída .....	26
<b>Figura 3.2:</b> (a) Circuito equivalente para um TP com o terminal de saída em curto circuito. (b) Circuito equivalente para um TP com o terminal de entrada em curto circuito (Referência 17) .....	27
<b>Figura 3.3:</b> Círculo de admitância (Referência 17) .....	29
<b>Figura 3.4:</b> Esquema da montagem experimental para determinação dos parâmetros de admitância $Y_{11}$ e $Y_{21}$ .....	32
<b>Figura 3.5:</b> Modificação do esquema da montagem experimental para determinação dos parâmetros de admitância $Y_{12}$ e $Y_{22}$ .....	33
<b>Figura 3.6:</b> Representação esquemática para medida de ganho de tensão e eficiência .....	35
<b>Figura 4.1:</b> Transformadores de estado sólido. (a) TP confeccionado com elementos piezoelétricos PZT-5A. (b) TP confeccionado com elementos piezoelétricos PZT-5A e BF-PT .....	37
<b>Figura 4.2:</b> Sistema de polarização dos elementos piezoelétricos .....	39
<b>Figura 4.3:</b> Condutância e susceptância do elemento piezoelétrico PZT-A em função da frequência a temperatura ambiente .....	40
<b>Figura 4.4:</b> Condutância e susceptância do elemento piezoelétrico PZT-B em função da frequência a temperatura ambiente .....	41

<b>Figura 4.5:</b> Condutância e susceptância do elemento piezelétrico PZT-C em função da frequência a temperatura ambiente .....	41
<b>Figura 4.6:</b> Condutância e susceptância do elemento piezelétrico BFPT em função da frequência a temperatura ambiente .....	41
<b>Figura 4.7:</b> (a) Elemento piezelétrico com contato elétrico. (b) Processo de fixação do contato elétrico .....	43
<b>Figura 4.8:</b> Acoplamento dos elementos piezoelétricos .....	43
<b>Figura 4.9:</b> Círculo de admitância referente ao elemento PZT-A com o elemento PZT-B em curto circuito a temperatura ambiente. $C_T$ , capacitância do elemento piezelétrico a baixa frequência; $f_a$ frequência de anti-ressonância; $f_r$ , frequência de ressonância; $f_s$ , frequência de ressonância em série; $G_{max}$ , máximo valor da condutância.....	46
<b>Figura 4.10:</b> Círculo de admitância referente ao elemento PZT-B com o elemento PZT-A em curto circuito a temperatura ambiente. $C_T$ , capacitância do elemento piezelétrico a baixa frequência; $f_a$ frequência de anti-ressonância; $f_r$ , frequência de ressonância; $f_s$ , frequência de ressonância em série; $G_{max}$ , máximo valor da condutância.....	47
<b>Figura 4.11:</b> Círculo de admitância referente ao elemento PZT-C com o elemento BFPT em curto circuito a temperatura ambiente. $C_T$ , capacitância do elemento piezelétrico a baixa frequência; $f_a$ frequência de anti-ressonância; $f_r$ , frequência de ressonância; $f_s$ , frequência de ressonância em série; $G_{max}$ , máximo valor da condutância.....	47
<b>Figura 4.12:</b> Círculo de admitância referente ao elemento BFPT com o elemento PZT-C em curto circuito a temperatura ambiente. $C_T$ , capacitância do elemento piezelétrico a baixa frequência; $f_s$ , frequência de ressonância em série; $f_{+45}$ , frequência a $+45^\circ$ ; $f_{-45}$ , frequência a $-45^\circ$ ; $B_{max}$ , valor máximo da susceptância; $B_s$ , valor da susceptância na frequência de ressonância em série .....	48
<b>Figura 4.13:</b> Curvas de ganho de tensão e eficiência em função da frequência dos transformadores piezoelétricos acoplados com lamínula de vidro e durepoxi alimentando uma carga ôhmica de 2 k $\Omega$ .....	49
<b>Figura 4.14:</b> Comparação entre os parâmetros de admitância determinados experimentalmente em temperatura ambiente (Medido), calculados com os parâmetros do circuito equivalente medidos pelo círculo de admitância (Calculo 2), e calculados com os parâmetros do circuito equivalente determinados pelas equações 2.7 a 2.12 (Calculo 1) para o transformador piezelétrico TRF .....	51
<b>Figura 4.15:</b> Comparação entre os parâmetros de admitância determinados experimentalmente em temperatura ambiente (Medido), calculados com os parâmetros do circuito equivalente medidos pelo círculo de admitância (Calculo 2), e calculados com os parâmetros do circuito equivalente determinados pelas equações 2.7 a 2.12 (Calculo 1) para o transformador piezelétrico TRM-T.....	52
<b>Figura 4.16:</b> Comparação entre os parâmetros de admitância determinados experimentalmente em temperatura ambiente (Medido), calculados com os parâmetros do circuito equivalente medidos pelo círculo de admitância (Calculo 2), e calculados com os parâmetros do circuito equivalente determinados pelas equações 2.7 a 2.12 (Calculo 1) para o transformador piezelétrico TRM-T.....	53
<b>Figura 4.17:</b> Ganho de tensão em função da frequência para o transformador TRF, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms .....	56
<b>Figura 4.18:</b> Eficiência em função da frequência para o transformador TRF, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms .....	57
<b>Figura 4.19:</b> Ganho de tensão em função da frequência para o transformador TRM-T, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms .....	58
<b>Figura 4.20:</b> Eficiência em função da frequência para o transformador TRM-T, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms .....	59

**Figura 4.21:** Ganho de tensão em função da frequência para o transformador TRM-A, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms .....60

**Figura 4.22:** Eficiência em função da frequência para o transformador TRM-A, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms .....61

**Figura 4.23:** Máximo ganho de tensão em função da resistência de prova para os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A.....63

**Figura 4.24:** Máxima eficiência em função da resistência de prova para os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A .64

**Figura 4.25:** Frequência de ressonância em função da resistência de prova para os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A.....65

## Lista de Tabelas

**Tabela 1:** Coeficientes dos elementos piezoelétricos. Cerâmica piezoelétrica do composto  $Pb(Zr-Ti)O_3$ ; BF-PT, cerâmica piezoelétrica do composto  $(0.6)BiFeO_3-(0.4)PbTiO_3$ ;  $Q_m$ , fator de qualidade mecânica;  $\rho$ , densidade da cerâmica;  $S_{11}^E$ , constante elástica a campo elétrico constante;  $\sigma$ , razão de Poisson;  $d_{31}$ , constante piezoelétrica;  $\epsilon^T$ , permissividade elétrica a tensão constante [19, 20] .....45

**Tabela 2:** Parâmetros dos circuitos equivalentes calculados. TRF, transformador radial ferroelétrico monocamada; TRM-T, transformador radial multiferroico transdutor monocamada; TRM-A, transformador radial multiferroico atuador monocamada; R, resistência equivalente; L, indutância equivalente; C,  $C_{d1}$  e  $C_{d2}$ , capacitância equivalente; N; razão entre números de espiras equivalente .....46

**Tabela 3:** Parâmetros dos circuitos equivalentes calculados. TRF, transformador radial ferroelétrico monocamada; TRM-T, transformador radial multiferroico transdutor monocamada; TRM-A, transformador radial multiferroico atuador monocamada; R, resistência equivalente; L, indutância equivalente; C,  $C_{d1}$  e  $C_{d2}$ , capacitância equivalente; N; razão entre número de espiras equivalente; D%, desvio percentual entre valores medidos e calculados .....48

<b>RESUMO .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVO .....</b>	<b>3</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>6</b>
1.1. EFEITO PIEZELÉTRICO .....	6
1.2. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS .....	8
1.3. ELEMENTO PIEZELÉTRICO.....	9
1.4. TRANSFORMADOR PIEZELÉTRICO .....	13
1.4.1. <i>Modo de Vibração Radial do tipo Monocamada</i> .....	14
<b>2. ANÁLISE DO CIRCUITO EQUIVALENTE .....</b>	<b>18</b>
2.1. CIRCUITO EQUIVALENTE.....	18
2.2. CIRCUITO EQUIVALENTE: DESCRIÇÃO DE ADMITÂNCIA .....	21
2.3. GANHO DE TENSÃO E EFICIÊNCIA .....	24
<b>3. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>26</b>
3.1. PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	26
3.1.1. <i>Círculo de Admitância</i> .....	28
3.2. PARÂMETROS DE ADMITÂNCIA.....	31
3.3. GANHO DE TENSÃO E EFICIÊNCIA .....	34
<b>4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>37</b>
4.1. MONTAGEM DOS TRANSFORMADORES PIEZOELÉTRICOS .....	37
4.1.1. <i>Fabricação dos Elementos Piezoelétricos</i> .....	38
4.1.2. <i>Polarização dos Elementos Piezoelétricos</i> .....	38
4.1.3. <i>Inserção das Conexões Elétricas</i> .....	42
4.1.4. <i>Acoplamento entre os Elementos Atuador e Transdutor</i> .....	43
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSFORMADORES.....	45
4.2.1. <i>Parâmetros do Circuito Equivalente</i> .....	45
4.2.1. <i>Parâmetros de Admitância</i> .....	50
4.2.3. <i>Ganho de Tensão e Eficiência</i> .....	55
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>67</b>

## RESUMO

Neste trabalho desenvolvemos um método para montagem de transformadores de estado sólido, do tipo monocamada e de modo de vibração radial, com elementos piezoelétricos atuadores e transdutores (primário e secundário) isolados eletricamente. Usando esse método montamos dois transformadores, os quais foram denominados por transformador ferroelétrico, TRF, e transformador multiferroico, TRM. O transformador TRF foi montado com duas cerâmicas ferroelétricas de PZT-5A, enquanto que o transformador TRM foi montado com de uma cerâmica ferroelétrica de PZT-5A e uma cerâmica multiferroica de  $(0.6)\text{BiFeO}_3\text{-(}0.4\text{)PbTiO}_3$ , ou simplesmente BF-PT. A caracterização desses transformadores foi realizada por medidas experimentais de ganho de tensão e eficiência, e os resultados foram comparados com um modelo teórico encontrado na literatura. Esses resultados, por sua vez, apresentaram uma concordância satisfatória com aqueles previstos no modelo teórico, divergindo em aproximadamente 10%. Dessa forma, foi possível verificar a viabilidade da utilização de cerâmicas multiferroicas de BF-PT na fabricação de transformadores de estado sólido pela comparação entre os desempenhos dos transformadores TRM e TRF. Com essa comparação, pudemos observar algumas semelhanças e diferenças entre o transformador de estado sólido formado por cerâmicas multiferroicas de BF-PT (TRM) e o transformador de estado sólido formado apenas por cerâmicas ferroelétricas de PZT-5A (TRF), que são as largamente utilizadas na fabricação desses dispositivos. De um modo geral, o comportamento elétrico dos transformadores TRM e TRF são iguais, porém, os ganhos máximos de tensão e as máximas eficiências possuem valores diferentes. Em comparação ao transformador TRF, o transformador TRM apresentou uma redução média de 1,7 vezes no ganho máximo de tensão e também uma redução média de 3,5 vezes na máxima eficiência. Por outro lado, o transformador TRM pode apresentar propriedades magnetoelétricas que modificam o ganho de tensão e a eficiência em decorrência de um campo magnético aplicado, o que abre novas perspectivas de aplicação prática desses dispositivos.



## ABSTRACT

In this work, it was developed a method for assembly radial vibration mode single-layer solid state transformers by using electrically isolated piezoelectric elements as actuators and transducers (primary and secondary). In this method we assembly two solid transformers, i. e., a ferroelectric one (ferroelectric solid state transformer - TRF) and a multiferroic one (multiferroic solid state transformer – TRM). The TRF transformer was composed by two PZT-5A ferroelectric ceramics, while the TRM transformer was composed by a PZT-5A ferroelectric ceramic and a (0.6)BiFeO<sub>3</sub>-(0.4)PbTiO<sub>3</sub> multiferroic ceramic, or simply BF-PT. The physical characterization of these solid state transformers was carried out by experimental determinations of the gain voltage and the efficiency. The results were compared with a theoretical model found in literature, and presented a satisfactory agreement with the theoretical model, diverging in approximately 10 %. In such a way, it was possible to verify the viability for using BF-PT multiferroic ceramics in the manufacture of solid state transformers by comparing the performance between both TRM and TRF devices. In this comparison we observe some similarities and differences between the solid state transformers formed by BF-PT multiferroic ceramics and those solid state transformers formed by PZT-5A ferroelectric ceramics, which are the ceramics widely used in the manufacture of these devices. In general, the electric behavior of the main properties of the TRM and TRF transformers are equal. However, the gain voltage and the efficiency possess different values. In comparison with the TRF transformer, the TRM one presented an average reduction of 1.7 times for the gain voltage, and an average reduction of 3.5 times for the efficiency. On the other hand, the transformer TRM can present magnetoelectrical properties that modify the gain of voltage and the efficiency according of an applied magnetic field, opening in a such a way new perspectives of application of these devices.

## **OBJETIVO**

Este trabalho tem o objetivo de verificar a viabilidade da utilização de cerâmicas multiferroicas do composto  $(0.6)\text{BiFeO}_3-(0.4)\text{PbTiO}_3$  na confecção de transformadores de estado sólido do tipo monocamada e de modo de vibração radial. Pretendemos também verificar o ganho de tensão e a eficiência desses transformadores e compará-los com os resultados de transformadores de estado sólido confeccionados com cerâmicas ferroelétricas de PZT-5A, que são as largamente utilizadas na fabricação desses dispositivos.

## INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e caracterização física de propriedades de cerâmicas ferroelétricas é uma área do conhecimento que desperta grande interesse acadêmico e tecnológico. As propriedades de um certo material ferroelétrico podem ser modificadas pelo controle de sua composição química e sua forma de preparo, o que desperta o interesse de indústrias que possuem o objetivo de desenvolver e comercializar dispositivos eletro-eletrônicos a base desses materiais. Técnicas avançadas de sinterização de cerâmicas ferroelétricas permitem a manipulação de sua microestrutura (poros, densidade, tamanho de grão, etc.), possibilitando a obtenção de cerâmicas com propriedades distintas, que podem ser bem definidas por técnicas de caracterização específicas, tais como a difratometria de raios X e espectroscopia de impedância. Em estudos mais avançados, essas técnicas de caracterização podem ser utilizadas em condições extremas de temperatura e pressão, assim como em amostras localizadas em regiões de altos campos elétricos e/ou magnéticos.

Uma das cerâmicas ferroelétricas mais estudadas é o Titanato Zirconato de Chumbo (PZT), que pode ser encontrada em inúmeras aplicações tecnológicas, tais como reatores de lâmpadas fluorescentes, carregadores de bateria de telefones móveis, adaptadores AC para “note-book”, etc. O seu baixo custo de produção, quando produzidas em grande escala, possibilitou a obtenção de equipamentos de alta qualidade e de tecnologia avançada, com preço de mercado competitivo, motivando assim o desenvolvimento de novos dispositivos com base nessas cerâmicas.

Entre os inúmeros dispositivos eletro-eletrônicos que vêm sendo desenvolvidos, os transformadores de estado sólido (transformadores piezoelétricos) têm demonstrado grande potencialidade devido a sua grande eficiência e pequenas dimensões, e vêm sendo alvo de estudos de diversos trabalhos acadêmicos [1-5] que visam o desenvolvimento, o aperfeiçoamento e a busca por novas propriedades e funcionalidades. Como exemplo, podemos citar a utilização de cerâmicas multiferroicas com acoplamento magnetoelétrico como substitutos das cerâmicas ferroelétricas. Esses dispositivos têm suas propriedades elétricas alteradas em decorrência da aplicação de um campo magnético externo, e foram utilizadas com sucesso no desenvolvimento de transformadores de estado sólido laminares de alto ganho de tensão [5].

As cerâmicas multiferroicas com acoplamento magnetoelétrico, além de servirem para o aperfeiçoamento de transformadores de estado sólido, abrem a

perspectiva de utilização desses transformadores como sensores de campo magnético e conversores eletromagnéticos. Tendo em vista essas novas funcionalidades, neste trabalho pretendemos verificar a viabilidade da utilização de cerâmicas multiferroicas do composto  $(0,6)\text{BiFeO}_3-(0,4)\text{PbTiO}_3$  na fabricação de transformadores de estado sólido. Para expor esse trabalho de forma organizada, dividimos o mesmo em 5 capítulos.

O capítulo 1 apresenta uma breve discussão sobre os transformadores piezoelétricos, partindo do efeito piezoelétrico e finalizando com um modelo teórico para análise das propriedades elétricas dos transformadores de estado sólido.

No capítulo 2 apresentamos um método para a análise das propriedades elétricas dos transformadores de estado sólido baseado nesse modelo.

O capítulo 3, por sua vez, descreve os procedimentos de medida para a verificação do modelo teórico e para a caracterização dos transformadores confeccionados nesse trabalho.

No capítulo 4 apresentamos o processo de confecção dos transformadores de estado sólido utilizados nesse trabalho e os resultados referentes à suas caracterizações.

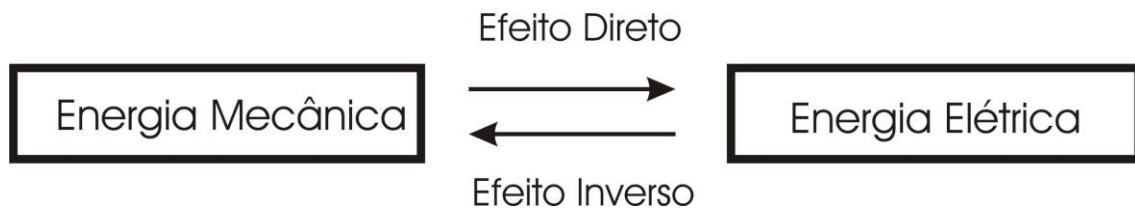
Por fim, no capítulo 5 apresentamos as conclusões obtidas nesse trabalho e as perspectivas de trabalhos futuros.

# 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

## 1.1. EFEITO PIEZOELÉTRICO

O efeito piezoelétrico foi descoberto em 1880 em cristais de quartzo pelos irmãos Pierre e Jacques Curie [6]. No ano seguinte à descoberta do efeito piezoelétrico direto, Lippmann previu a existência do efeito piezoelétrico inverso através de análises termodinâmicas [6]. Sua predição foi verificada pelos irmãos Curie ainda em 1881 [7]. Desde então, esse efeito tem motivado inúmeras investigações para o desenvolvimento de dispositivos eletromecânicos.

De uma forma geral, o efeito piezoelétrico pode ser definido como a conversão de energia mecânica em energia elétrica (efeito direto) ou a conversão de energia elétrica em energia mecânica (efeito inverso). Uma representação esquemática é apresentada na Figura 1.1.



**Figura 1.1: Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico.**

O efeito piezoelétrico é descrito por equações tensoriais, mas podem também ser descrita de forma simplificada pelas seguintes equações:

$$S = s^E T + dE \quad (1.1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (1.2)$$

Sendo: D o vetor deslocamento elétrico;

E o campo elétrico;

T a tensão mecânica;

S a deformação mecânica;

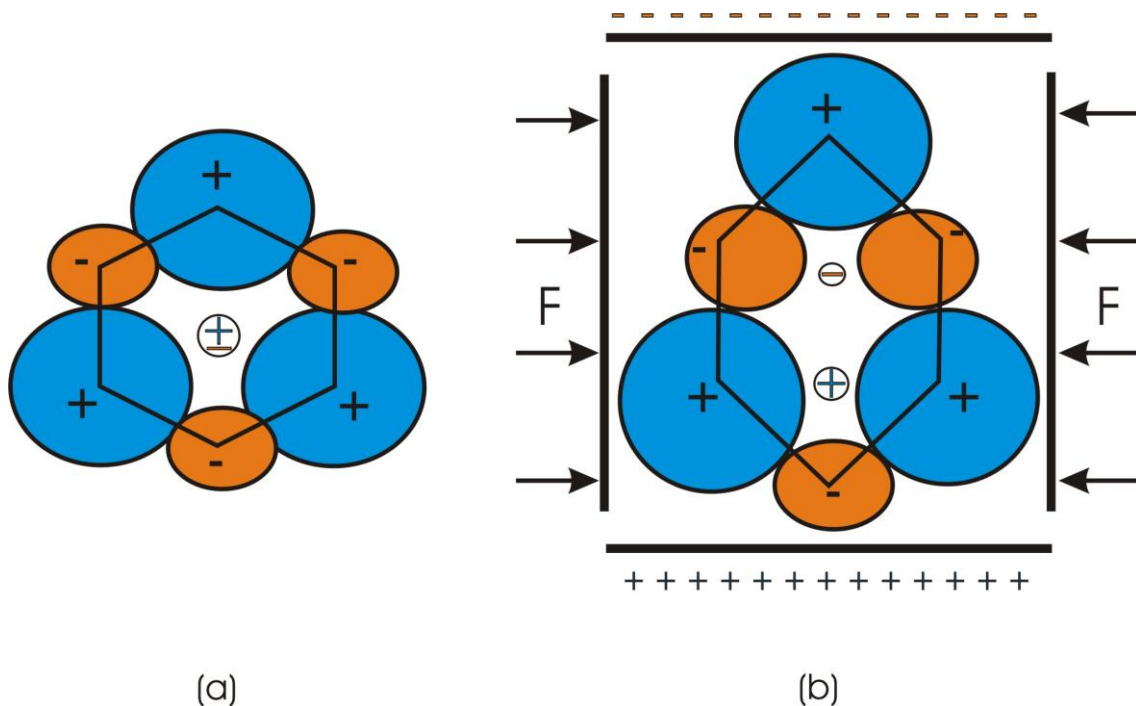
$\varepsilon^T$  a permissividade dielétrica à tensão mecânica constante;

$d$  constante piezoelétrica;

$s^E$  o coeficiente elástico à campo elétrico constante.

A equação (1.1) informa que uma deformação mecânica,  $S$ , de um material piezoelétrico pode ser obtida através de duas fontes distintas: uma tensão mecânica,  $T$ , ou um campo elétrico,  $E$ . A equação (1.2) informa que um deslocamento elétrico é induzido em um material piezoelétrico quando uma tensão mecânica,  $T$ , ou um campo elétrico,  $E$ , são aplicados no material piezoelétrico.

O fenômeno piezoelétrico ocorre devido a uma distorção na estrutura da cela unitária do composto piezoelétrico. (ver figura 1.2)



**Figura 1.2: Cela unitária do cristal de quartzo. (a) Cela neutra, (b) cela com tensão mecânica.**

Na figura 1.2 (a), apresentamos a cela unitária do cristal de quartzo sem a aplicação de tensões mecânicas ou campos elétricos. Nessas condições, a posição espacial do centro de cargas negativas é a mesma do centro de cargas positivas. Quando aplicamos uma tensão mecânica,  $T$ , figura 1.2 (b), a cela unitária sofre uma deformação e como consequência a posição do centro de cargas negativas deixa de ser a mesma do centro de cargas positivas, criando um deslocamento elétrico,  $D$ , na cela unitária.

O efeito piezoelétrico inverso ocorre devido aos mesmos princípios, porém, ao invés de ser uma tensão mecânica que separa o centro de cargas positivas do centro de cargas negativas, gerando uma polarização, é um campo elétrico que separa o centro de cargas positivas do centro de cargas negativas, gerando uma deformação mecânica.

Quando a intensidade da tensão mecânica aplicada sobre um material piezoelétrico oscila no tempo, o deslocamento elétrico gerado também oscila no tempo. Existe uma frequência específica para a qual a conversão de energia mecânica em energia elétrica é máxima [8], e a essa frequência damos o nome de frequência de ressonância, pois ela corresponde à frequência natural de vibração do material piezoelétrico. De forma análoga, um campo elétrico oscilante produz uma deformação mecânica oscilante no material, cuja conversão apresenta um valor máximo na frequência de ressonância.

## 1.2. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

O efeito piezoelétrico pode ser encontrado em alguns cristais, semicondutores, cerâmicas, compósitos, etc. [7]. A seguir apresentaremos os materiais piezoelétricos mais utilizados em aplicações tecnológicas.

No grupo dos cristais, os materiais mais significativos em aplicações tecnológicas são o niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3\text{-LN}$ ) e o tantalato de lítio ( $\text{LiTaO}_3\text{-LT}$ ). O niobato e o tantalato de lítio podem ser crescidos do material fundido em composições contendo entre 46 e 50% ou 44 e 54% (% atômica de Li para o LN ou LT, respectivamente) [7]. Eles são largamente utilizados em dispositivos para geração de ondas acústicas de superfície, como filtros eletromecânicos e detectores de vibrações [7].

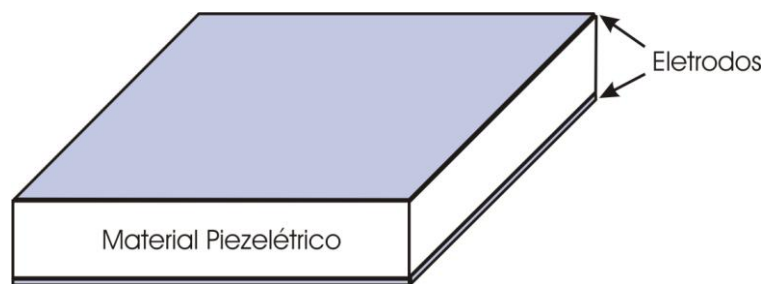
Os materiais semicondutores que apresentam efeito piezoelétrico possuem estrutura do tipo wurzita, sendo que os de maior destaque são o óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ), o sulfeto de cádmio ( $\text{CdS}$ ) e o nitreto de alumínio ( $\text{AlN}$ ). Esses semicondutores são geralmente preparados na forma de filmes finos através do processo de deposição por vapor químico ou por “sputtering” e são frequentemente utilizados como geradores ultrassônicos de alta frequência [7].

Os materiais cerâmicos são os mais utilizados em aplicações tecnológicas. Para sua utilização como elementos piezoelétricos precisam ser polarizados sob a aplicação

de altos campos elétricos estáticos. A cerâmica mais utilizada como elemento piezoelétrico é o titanato zirconato de chumbo (PZT), que como a maioria das cerâmicas piezoelétricas possui estrutura do tipo perovskita, e pode ser dopado com uma quantidade de elementos químicos diversificados, o que permite alterar de forma controlada muitas de suas propriedades físicas [7]. As cerâmicas piezoelétricas são comumente encontradas em filtros de ondas, transdutores ultra-sônicos e fontes de alta voltagem [6].

### 1.3. ELEMENTO PIEZOELÉTRICO

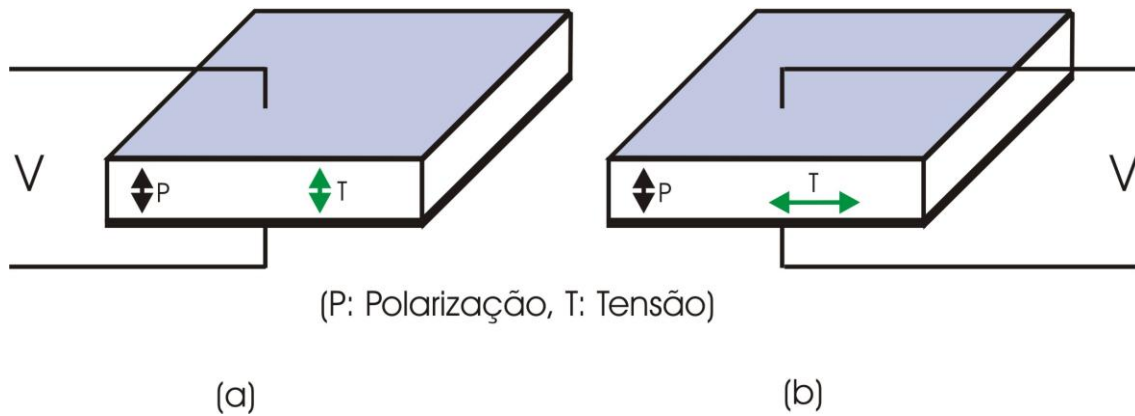
Um elemento piezoelétrico é composto de dois eletrodos e um material piezoelétrico (figura 1.3).



**Figura 1.3: Elemento piezoelétrico composto por um material piezoelétrico e dois eletrodos [8].**

Quando analisamos um elemento piezoelétrico tendo em vista suas propriedades eletromecânicas, vemos que ele pode trabalhar no modo longitudinal ou transversal, com uma frequência de ressonância correspondente. No modo longitudinal, a direção da deformação mecânica,  $S$ , é paralela a direção de polarização,  $P$  (figura 1.4 a). No modo transversal, a direção da deformação mecânica,  $S$ , é perpendicular a direção de polarização,  $P$  (figura 1.4 b) [8].



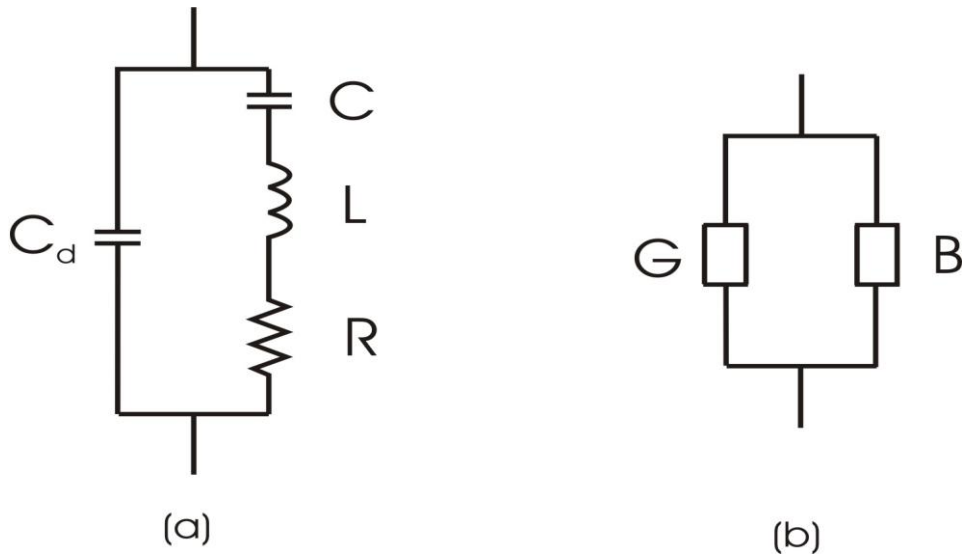


**Figura 1.4: (a) Modo de vibração longitudinal de um elemento piezoelétrico. (b) Modo de vibração transversal de um elemento piezoelétrico [8].**

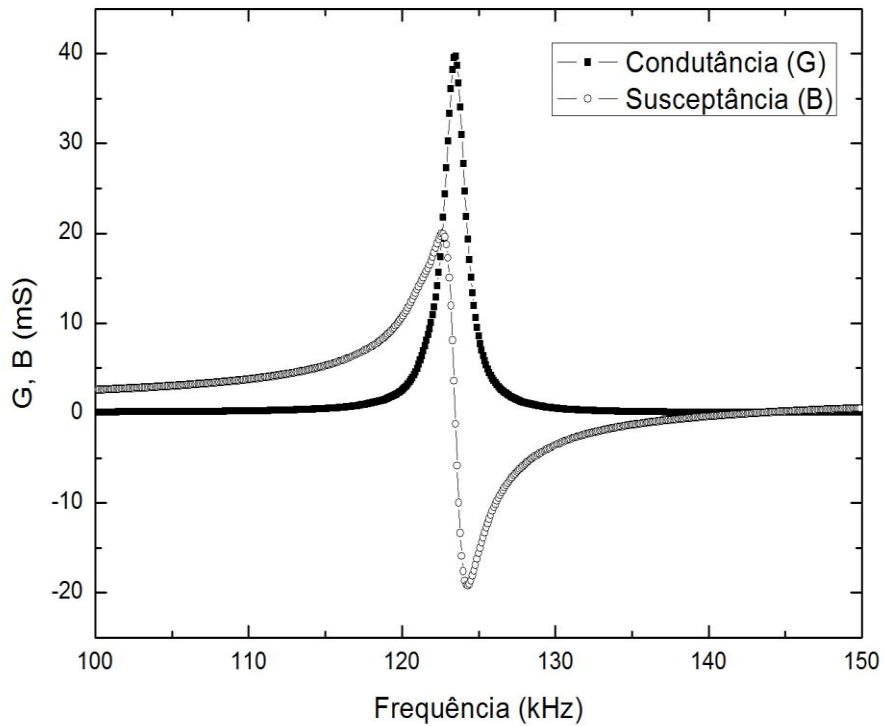
Os elementos piezoelétricos podem ser classificados como atuadores ou transdutores dependendo de sua aplicação. Denominaremos de elemento piezoelétrico atuador aquele cuja função é de converter energia elétrica em energia mecânica, e de elemento piezoelétrico transdutor aquele cuja função é de converter energia mecânica em energia elétrica.

Um elemento piezoelétrico atuador quando submetido a uma diferença de potencial (d.d.p.) que oscila no tempo sofre uma deformação mecânica que também oscila no tempo (efeito piezoelétrico inverso). De forma análoga, um elemento piezoelétrico transdutor, sob a ação de uma deformação mecânica oscilatória, gera uma d.d.p. oscilatória. A relação entre a conversão de energia (direta ou inversa) e a frequência de ressonância correspondente depende das propriedades dielétricas, elásticas e piezoelétricas do material piezoelétrico e no caso das cerâmicas, dependem também de suas dimensões [8].

Quando analisamos um elemento piezoelétrico tendo em vista apenas suas propriedades elétricas, vemos que ele se comporta como um circuito RLC em série com um capacitor em paralelo, como ilustra a figura (1.5 a) [6, 9]. Esse circuito pode ser descrito pelas partes real (condutância,  $G$ ) e imaginária (susceptância,  $B$ ) de sua admitância complexa (Figura 1.5 b) [9]. Desta forma, o elemento piezoelétrico pode ter suas propriedades elétricas caracterizadas pelas medidas de condutância e susceptância em função da frequência, conforme ilustra a figura 1.6.

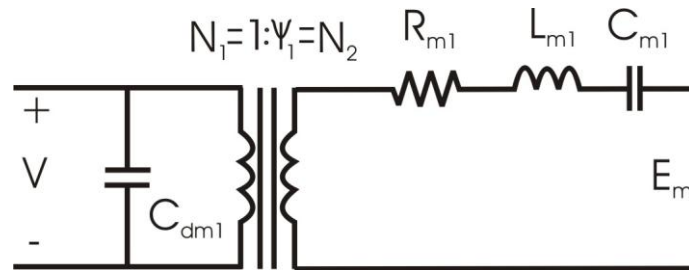


**Figura 1.5:** (a) Circuito equivalente de um elemento piezoelétrico. (b) Circuito equivalente descrito pela admitância.



**Figura 1.6:** Característica da condutância,  $G$ , e da susceptância,  $B$ , de um elemento piezoelétrico polarizado.

Por outro lado, quando analisamos um elemento piezoelétrico tendo em vista suas propriedades eletromecânicas, notamos que ele se comporta como o circuito elétrico representado na figura 1.7 [7, 8]. Maiores detalhes sobre este circuito serão apresentados ao longo desta seção.



**Figura 1.7: Diagrama eletromecânico de um elemento piezoelétrico [8].**

Os parâmetros  $V$  e  $E_m$  são, respectivamente, a diferença de potencial nos eletrodos do elemento piezoelétrico e a energia mecânica de vibração do elemento. Em um elemento piezoelétrico que age como atuador, a diferença de potencial (d.d.p.) é proveniente de uma fonte externa, enquanto que a energia mecânica é a resposta a essa d.d.p.. Deste modo, podemos dizer que  $V$  é a excitação e  $E_m$  é a resposta. Em um elemento piezoelétrico que age como transdutor, a energia mecânica é proveniente de uma fonte externa, enquanto que a d.d.p. é a resposta a essa vibração mecânica. Deste modo, podemos dizer que  $E_m$  é a excitação e  $V$  é a resposta. Todos os outros parâmetros são intrínsecos ao elemento piezoelétrico e são indistinguíveis em relação ao fato do elemento piezoelétrico ser utilizado como atuador ou transdutor.

O parâmetro  $C_{dm}$ , representado no diagrama por um capacitor, é o capacitor formado pelos dois eletrodos dispostos paralelamente entre si e preenchidos pela cerâmica piezoelétrica, enquanto que os parâmetros  $\psi$ ,  $R_m$ ,  $L_m$  e  $C_m$ , representados no diagrama eletromecânico, respectivamente por um transformador, um resistor, um indutor e um capacitor, são apenas uma analogia utilizada para descrever de forma qualitativa e quantitativa o funcionamento de um elemento piezoelétrico.

Para entendermos a analogia feita entre o elemento piezoelétrico com o diagrama eletromecânico é conveniente analisarmos a estrutura do material piezoelétrico. Conforme discutido na seção 1.1, o efeito piezoelétrico é decorrente de uma deformação da estrutura cristalina do material piezoelétrico. Quando a excitação do material possui forma senoidal, toda sua estrutura vibra de forma senoidal e esta

vibração pode ser vista como um sistema massa mola amortecido, onde: a massa representa a inércia dos átomos que constitui a estrutura cristalina, a mola representa as forças interatômicas e o amortecimento representa as perdas de energia durante o processo de vibração. Matematicamente, um sistema massa-mola amortecido é idêntico a uma associação RLC em série sob a ação de uma d.d.p. senoidal [10]. Por fim, a conversão da energia mecânica/elétrica em energia elétrica/mecânica é representada no diagrama eletromecânico por um transformador. Desta forma podemos dizer que:

$V$  é a voltagem aplicada ou induzida sobre os eletrodos;

$C_{dm}$  é a capacitância entre os eletrodos;

$L_m$  é a massa mecânica equivalente, análogo ao indutor elétrico;

$C_m$  é a constante elástica equivalente, análogo ao capacitor elétrico;

$R_m$  é a resistência mecânica equivalente, análogo ao resistor elétrico;

$E_m$  é a força mecânica equivalente, análogo ao campo elétrico;

$\Psi$  é o fator de força mecânica equivalente, análogo à razão entre espiras em um transformador convencional

Esses parâmetros equivalentes dependem das dimensões, dos coeficientes piezoelétrico, elástico e dielétrico do material e do modo de operação do elemento piezoelétrico, e podem ser obtidos a partir das expressões (1.1) e (1.2), apresentados na seção 1.1.

#### 1.4. TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO

O transformador piezoelétrico é uma combinação de elementos piezoelétricos atuadores e transdutores. Ele é um dispositivo de transmissão de energia elétrica que funciona via acoplamento eletromecânico entre os elementos piezoelétricos atuadores e transdutores [8].

De acordo com o modo de vibração dos elementos piezoelétricos, os transformadores piezoelétricos são classificados em três categorias: Rosen, Modo de vibração de espessura, e modo de vibração radial [8, 11].

O transformador piezoelétrico Rosen foi inventado pelo Dr. Rosen na década de 1950, ele é uma combinação de elemento piezoelétrico atuador de modo de vibração

transversal com elemento piezoelétrico transdutor de modo de vibração longitudinal e possui como principal característica o alto ganho de tensão [8, 11].

O transformador piezoelétrico de modo de vibração de espessura foi desenvolvido pela NEC do Japão na década de 1990, ele é uma combinação de elementos piezoelétricos atuadores e transdutores de modo de vibração longitudinal, e possui como principal característica um baixo ganho de tensão [8, 11].

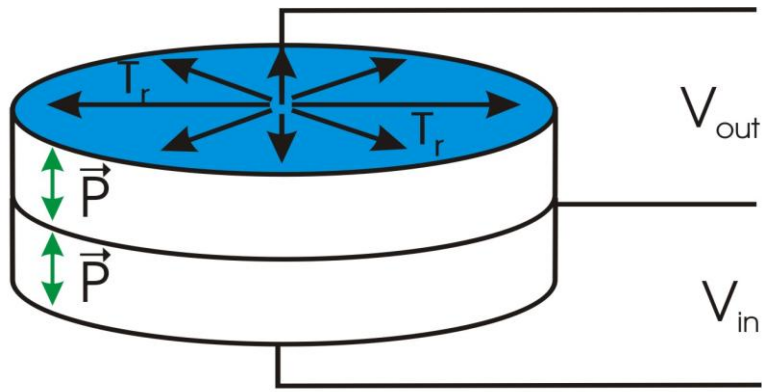
O transformador piezoelétrico de modo de vibração radial foi desenvolvido pela FACE Electronics, USA em 1998, ele é uma combinação de elementos piezoelétricos atuadores e transdutores que operam no modo de vibração transversal [8, 11]. Possuem um baixo ganho de tensão e frequência de operação menor que o transformador de modo de vibração de espessura.

Cada uma das três categorias (Rosen, modo de vibração de espessura e modo de vibração radial) é subdividida em dois tipos que dependem do número de elementos piezoelétricos. São eles: monocamadas e multicamadas. O transformador do tipo monocamada é composto por dois elementos piezoelétricos, um atuador e um transdutor, enquanto que o transformador multicamada é composto por três ou mais elementos piezoelétricos [8, 11]. Existe uma infinidade de maneiras para associar os elementos piezoelétricos atuadores e transdutores para obtermos transformadores multicamadas, e muitos deles podem ser encontrado em registros de patentes [12, 13]

Iremos neste trabalho concentrar nossa atenção nos transformadores piezoelétricos do tipo monocamada e de modo de vibração radial.

#### *1.4.1. Modo de Vibração Radial do tipo Monocamada*

O transformador piezoelétrico do tipo monocamada e de modo de vibração radial consiste de dois elementos piezoelétricos de modo de vibração transversal em forma de discos finos. Os eletrodos estão dispostos nas superfícies adjacentes, e o acoplamento entre o elemento atuador e transdutor esta ilustrado na figura 1.8. (ver detalhes do processo de acoplamento no capítulo 4)

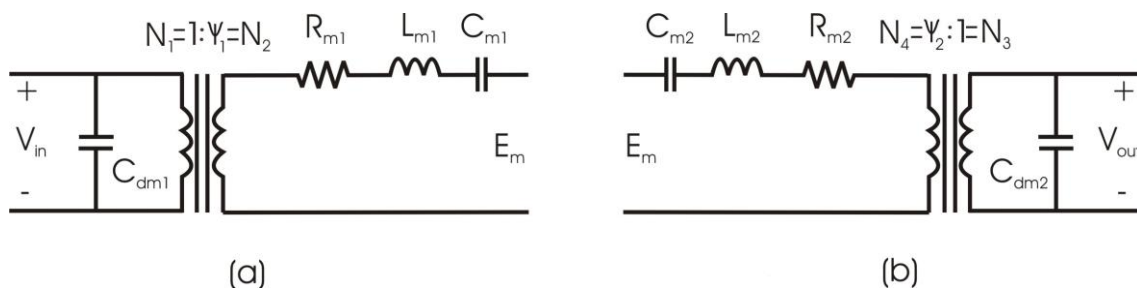


(P: Polarização, T: Deformação,  $V_{in}$ : Tensão de entrada,  $V_{out}$ : Tensão de saída)

**Figura 1.8: Transformador piezoelétrico do tipo monocamada e de modo de vibração radial.**

Quando aplicamos uma d.d.p. sobre o elemento piezoelétrico atuador, as cargas elétricas se espalham quase que instantaneamente nas superfícies dos eletrodos, criando um campo elétrico de direção perpendicular à superfície do eletrodo. Esse campo elétrico aumenta e diminui a polarização da cerâmica piezoelétrica ao custo de uma deformação mecânica em sua estrutura. Devido ao contato mecânico entre os elementos piezoelétricos atuador e transdutor, a energia mecânica gerada pela aplicação da diferença de potencial,  $V_{in}$ , é transmitida para a cerâmica piezoelétrica transdutora. Esta, por sua vez, irá realizar o processo inverso, transformando a energia mecânica em diferença de potencial,  $V_{out}$ , entre os eletrodos do elemento piezoelétrico transdutor.

O processo de transferência de energia da cerâmica piezoelétrica atuadora para a transdutora pode ser analisado através da combinação entre um diagrama eletromecânico de um elemento piezoelétrico atuador (figura 1.9 a) e um diagrama eletromecânico de um elemento piezoelétrico transdutor (figura 1.9 b).



**Figura 1.9: (a) Diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico atuador. (b) Diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico transdutor.**

O diagrama eletromecânico do elemento piezoelétrico atuador é responsável por converter energia potencial elétrica em energia mecânica, enquanto que o diagrama eletromecânico do elemento piezoelétrico transdutor é responsável por converter energia mecânica em energia elétrica. Quando acoplamos os dois elementos piezoelétricos, conforme ilustrado na figura 1.8, a energia mecânica produzida pelo elemento piezoelétrico atuador é transferida para o elemento piezoelétrico transdutor. No caso ideal, onde não há perdas de energia devido ao acoplamento dos elementos piezoelétricos, toda a energia mecânica produzida pelo elemento atuador é transferida para o elemento transdutor, ou seja, a energia mecânica obtida como resposta no elemento atuador passa a ser a excitação do elemento transdutor e, desta forma, o diagrama elétrico análogo a um transformador piezoelétrico pode ser representado conforme ilustra a figura 1.10 [8].

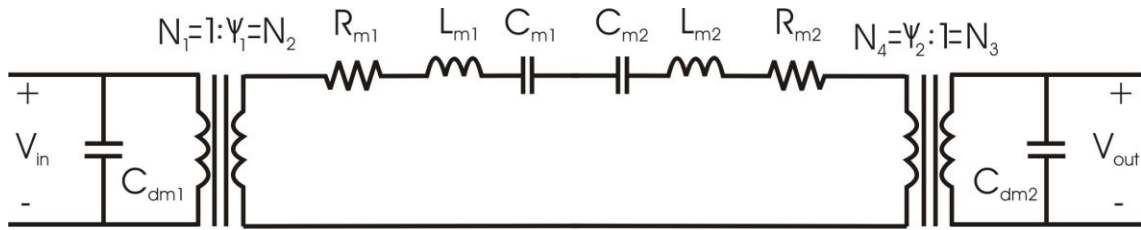


Figura 1.10: Diagrama elétrico de um transformador piezoelétrico [8].

Os parâmetros do diagrama elétrico de um transformador piezoelétrico dependem das dimensões e dos coeficientes do material que compõem os elementos piezoelétricos. Para um elemento piezoelétrico em forma de disco, os parâmetros do diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico correspondem às equações (1.3) à (1.7), que seguem abaixo [8]:

$$R_{m1} = R_{m2} = \frac{\pi^2 r t}{4Q_m} \sqrt{\frac{2\rho}{(S_{11}^E)(1-\sigma)}} \quad (1.3)$$

$$L_{m1} = L_{m2} = \frac{\pi r^2 t \rho}{2} \quad (1.4)$$

$$C_{m1} = C_{m2} = \frac{4(1-\sigma)(S_{11}^E)}{\pi^3 t} \quad (1.5)$$

$$\psi_1 = \psi_2 = \frac{2\sqrt{2}\pi r(d_{31})}{(1-\sigma)(S_{11}^E)} \quad (1.6)$$

$$C_{dm1} = C_{dm2} = \frac{\pi r^2}{t} (\epsilon_{33}^T) \left[ 1 - \frac{(d_{31}^2)}{(1-\sigma)(S_{11}^E)(\epsilon_{33}^T)} \right] \quad (1.7)$$

Sendo:  $r$  o raio do elemento piezoelétrico;

$t$  a espessura do elemento piezoelétrico;

$Q_m$  o fator de qualidade mecânica;

$\rho$  a densidade;

$S_{11}^E$  a complacência elástica à campo elétrico constante;

$\sigma = \frac{S_{12}^E}{S_{11}^E}$  a razão de Poisson;

$d_{31}$  o coeficiente piezoelétrico;

$\epsilon_{33}^T$  a constante dielétrica.

Analisando o diagrama elétrico de um transformador piezoelétrico podemos calcular o ganho de tensão ( $V_{out}/V_{in}$ ) e a eficiência ( $P_{out}/P_{in}$ ) do transformador. Essas características são fundamentais para projetar circuitos eletrônicos que utilizam transformadores piezoelétricos como componentes, e por esse motivo a análise do diagrama elétrico será o objeto de estudo do capítulo seguinte.



## 2. ANÁLISE DO CIRCUITO EQUIVALENTE

### 2.1. CIRCUITO EQUIVALENTE

O diagrama elétrico análogo a um transformador piezoelétrico (figura 2.1) pode ser descrito por um circuito elétrico equivalente, que apresenta as mesmas características do circuito original, mas que possui formato simplificado. O circuito equivalente é obtido através da utilização da teoria de circuitos elétricos, levando em conta o que segue: associação de componentes e transformações de impedância, e o seu processo de derivação pode ser acompanhado ao longo desta seção.

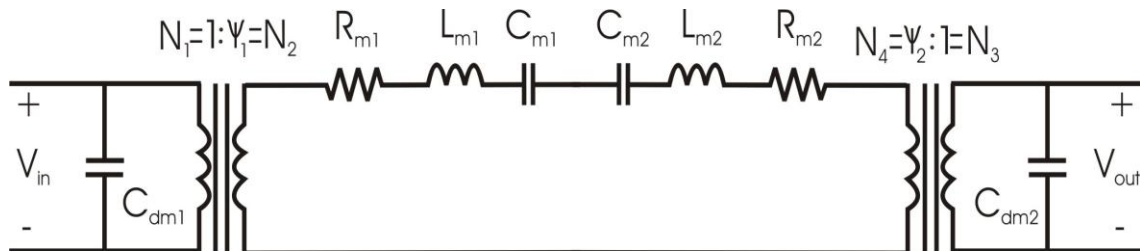


Figura 2.1: Circuito elétrico análogo ao transformador piezoelétrico [8].

O ramo do circuito equivalente localizado na parte central da figura 2.1 pode ser simplificado com a utilização da teoria de associação de resistores, capacitores e indutores todos em série, desta forma teremos um resistor equivalente ( $R_m$ ), um capacitor equivalente ( $C_m$ ) e um indutor equivalente ( $L_m$ ), conforme ilustra a figura 2.2.

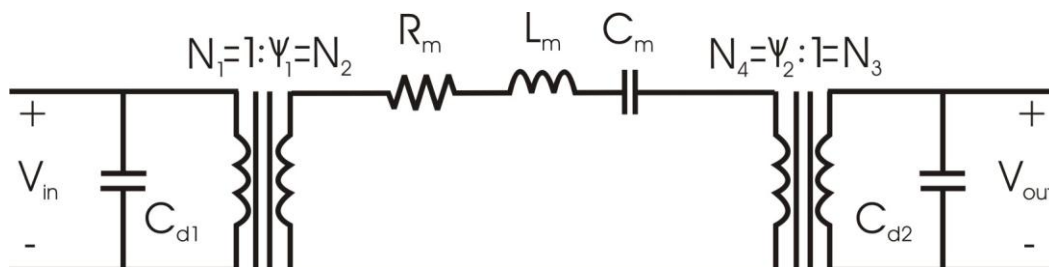


Figura 2.2: Circuito elétrico equivalente análogo ao transformador piezoelétrico [8].

Com:

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} = \frac{\pi^2 \sqrt{2}}{4} \left[ \frac{r_1 t_1}{Q_{m1}} \sqrt{\frac{\rho_1}{(S_{11}^E)_1 (1 - \sigma_1)}} + \frac{r_2 t_2}{Q_{m2}} \sqrt{\frac{\rho_2}{(S_{11}^E)_2 (1 - \sigma_2)}} \right] \quad (2.1)$$

$$L_m = L_{m1} + L_{m2} = \frac{\pi}{2} [r_1^2 t_1 \rho_1 + r_2^2 t_2 \rho_2] \quad (2.2)$$

$$C_m = \frac{C_{m1} C_{m2}}{C_{m1} + C_{m2}} = \frac{4(1 - \sigma_1)(S_{11}^E)_1 (1 - \sigma_2)(S_{11}^E)_2}{\pi^3 [t_2 (1 - \sigma_1)(S_{11}^E)_1 + t_1 (1 - \sigma_2)(S_{11}^E)_2]} \quad (2.3)$$

Uma diferença de potencial aplicada ao ramo esquerdo do circuito elétrico simplificado (figura 2.2), gera uma corrente elétrica que passa através do enrolamento primário ( $N_1 = 1$ ) e induz uma corrente elétrica no enrolamento secundário ( $N_2 = \psi_1$ ), que por sua vez, gera uma diferença de potencial no ramo central do circuito. Quando não há perdas de energia no transformador, a razão do número de espiras entre os enrolamentos primário e secundário é proporcional a razão entre a diferença de potencial dos enrolamentos primário e secundário e é inversamente proporcional a razão entre as correntes elétricas nos ramos esquerdo e central do circuito apresentado na figura 2.2. Ou seja, para um transformador ideal, vale a relação (2.4).

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\psi_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{com} \quad \psi_1 = N_2 / N_1 \quad (2.4)$$

Do mesmo modo que a voltagem e a corrente podem ser modificadas ao passar por um transformador convencional, uma impedância “vista” de um dos lados (primário ou secundário) de um circuito que contenha um transformador convencional também pode ser modificada [14], e a esta modificação chamamos de transformação de impedância. Realizando esta modificação, o circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico é simplificado conforme ilustra a figura 2.3.

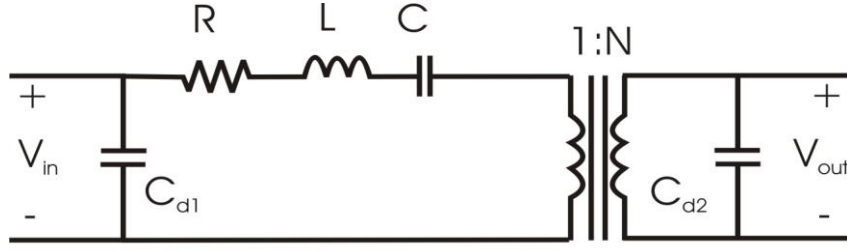


Figura 2.3: Circuito equivalente ao transformador piezoelétrico.

Com  $N = \psi_1/\psi_2$ .

Podemos expressar a impedância transformada para o lado primário (Figura 2.3) por meio da seguinte transformação de impedância [14]:

$$Z_1 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 \Rightarrow Z_1 = \frac{Z_2}{\psi_1^2} \quad (2.5)$$

$$R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = \frac{R_m}{\psi_1^2} + \frac{j\omega L_m}{\psi_1^2} + \frac{1}{j\omega C_m \psi_1^2} \quad (2.6)$$

Deste modo, temos:

$$R = \frac{R_m}{\psi_1^2} = \frac{\sqrt{2}(1-\sigma_1)^2 (S_{11}^E)^2}{32r_1^2 (d_{31}^E)^2} \left[ \frac{r_1 t_1}{Q_{m1}} \sqrt{\frac{\rho_1}{(S_{11}^E)_1 (1-\sigma_1)}} + \frac{r_2 t_2}{Q_{m2}} \sqrt{\frac{\rho_2}{(S_{11}^E)_2 (1-\sigma_2)}} \right] \quad (2.7)$$

$$L = \frac{L_m}{\psi_1^2} = \frac{(1-\sigma_1)^2 (S_{11}^E)^2}{16\pi r_1^2 (d_{31}^E)^2} [r_1^2 t_1 \rho_1 + r_2^2 t_2 \rho_2] \quad (2.8)$$

$$C = \psi_1 C_m = \frac{(1-\sigma_1)^3 (S_{11}^E)^3}{2\pi^5 r_1^2 (d_{31}^E)^2} \frac{(1-\sigma_2) (S_{11}^E)_2}{[t_2 (1-\sigma_1) (S_{11}^E)_1 + t_1 (1-\sigma_2) (S_{11}^E)_2]} \quad (2.9)$$

$$N = \frac{r_1 (d_{31}^E)_1 (1-\sigma_2) (S_{11}^E)_2}{r_2 (d_{31}^E)_2 (1-\sigma_1) (S_{11}^E)_1} \quad (2.10)$$

Conforme discutido anteriormente:

$$C_{dm1} = \frac{\pi r_1^2}{t_1} (\epsilon_{33}^T)_1 \left[ 1 - \frac{(d_{31}^E)_1^2}{(1-\sigma_1) (S_{11}^E)_1 (\epsilon_{33}^T)_1} \right] \quad (2.11)$$

$$C_{dm2} = \frac{\pi r_2^2}{t_2} (\varepsilon_{33}^T)_2 \left[ 1 - \frac{(d_{31}^2)_2}{(1 - \sigma_2) (S_{11}^E)_2 (\varepsilon_{33}^T)_2} \right] \quad (2.12)$$

As equações (2.7) à (2.12) determinam os valores dos parâmetros do circuito equivalente análogo a um transformador piezoelétrico do tipo monocamada e de modo de vibração radial, considerando os coeficientes piezoelétricos, elásticos e dielétricos do material piezoelétrico e as dimensões do transformador.

Na figura (2.3), o circuito equivalente análogo a um transformador piezoelétrico é uma rede com dois acessos, e por esse motivo podemos analisá-lo através de uma descrição de admitância.

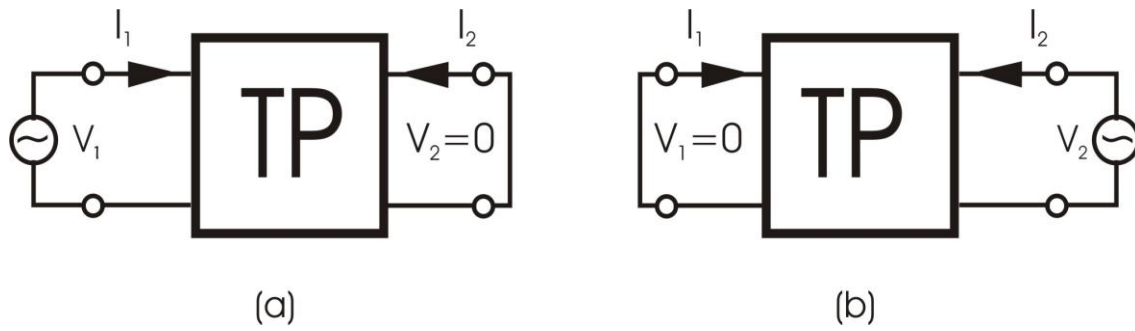
## 2.2. CIRCUITO EQUIVALENTE: DESCRIÇÃO DE ADMITÂNCIA

A descrição de admitância tem a forma matricial  $I=YV$ , ou seja,

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Os elementos  $Y_{ij}$  da matriz de admitância são designados por parâmetros de admitância complexos. Os parâmetros de admitância complexos têm um significado físico para além do seu significado matemático na equação (2.13) [15]. A forma mais cabal de apresentar o significado de um parâmetro é indicar como ele pode ser medido. Considera-se a montagem experimental representada esquematicamente na figura 2.4 (a), em que uma tensão de valor  $V_1$  é aplicada ao acesso 1 e o acesso 2 é colocado em curto-circuito [15, 16]. De (2.13) resulta:

$$I_1 = Y_{11}V_1 \quad e \quad I_2 = Y_{21}V_1$$



**Figura 2.4: Representação esquemática da montagem experimental para a determinação dos parâmetros de admitância [15].**

O que significa que:

$$Y_{11} = \left. \frac{I_1}{V_1} \right|_{V_2=0} \quad (2.14)$$

$$Y_{21} = \left. \frac{I_2}{V_1} \right|_{V_2=0} \quad (2.15)$$

Se fizermos a montagem experimental representado na figura 2.4 (b), em que uma tensão de valor  $V_2$  é aplicada ao acesso 2 e o acesso 1 é colocado em curto-circuito, temos

$$I_1 = Y_{12}V_2 \quad e \quad I_2 = Y_{22}V_2$$

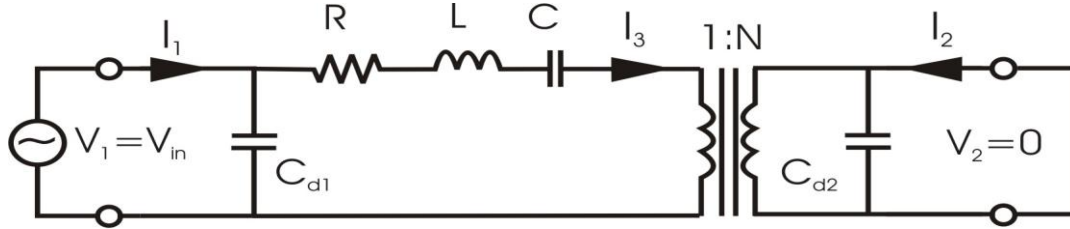
O que significa que:

$$Y_{12} = \left. \frac{I_1}{V_2} \right|_{V_1=0} \quad (2.16)$$

$$Y_{22} = \left. \frac{I_2}{V_2} \right|_{V_1=0} \quad (2.17)$$

As equações (2.14) a (2.17), além de exprimirem o modo como se medem os parâmetros de admitância complexos, indicam também como eles podem ser calculados.

Uma representação esquemática do circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico com uma tensão elétrica,  $V_1$ , aplicada ao acesso 1 e com o acesso 2 em curto circuito, pode ser observada na figura (2.5).



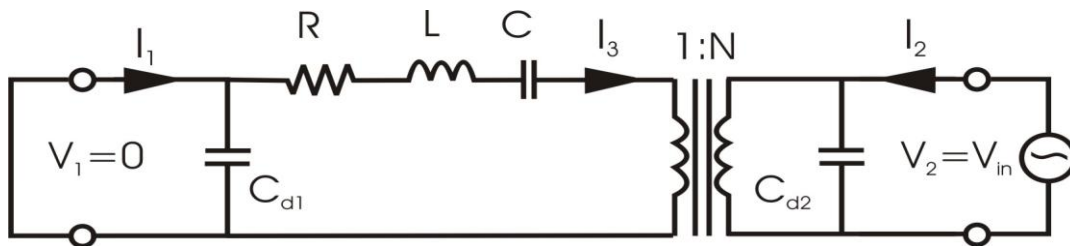
**Figura 2.5: Representação esquemática do circuito elétrico utilizado para calcular os parâmetros de admitância  $Y_{11}$  e  $Y_{21}$ .**

Aplicando as equações (2.14) e (2.15) no circuito elétrico representado pela figura (2.5) obtemos:

$$Y_{11} = \left( j\omega C_{d1} + \frac{1}{(R + j\omega L + 1/j\omega C)} \right) \quad (2.18)$$

$$Y_{21} = \frac{1}{N(R + j\omega L + 1/j\omega C)} \quad (2.19)$$

Uma representação esquemática do circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico com uma tensão elétrica,  $V_2$ , aplicada ao acesso 2 e com o acesso 1 em curto circuito pode ser observada na figura (2.6).



**Figura 2.6: Representação esquemática do circuito elétrico utilizado para calcular os parâmetros de admitância  $Y_{22}$  e  $Y_{12}$ .**

Aplicando as equações (2.16) e (2.17) no circuito elétrico representada pela figura (2.6) obtemos:

$$Y_{22} = \left( j\omega C_{d2} + \frac{1}{N^2(R + j\omega L + 1/j\omega C)} \right) \quad (2.20)$$

$$Y_{12} = \frac{1}{N(R + j\omega L + 1/j\omega C)} \quad (2.21)$$

As equações (2.18) a (2.21) definem os parâmetros de admitância complexos do circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico, e podem ser calculados usando a frequência angular da d.d.p. aplicada no transformador,  $\omega$ , e os parâmetros do circuito equivalente que foram descritos na seção 2.1 pelas equações (2.7) a (2.12).

### 2.3. GANHO DE TENSÃO E EFICIÊNCIA

O ganho de tensão, definido como a razão entre a tensão de saída e a tensão de entrada ( $V_{Ganho} = V_{out}/V_{in}$ ), e a eficiência, definida como a razão entre a potência de saída e a potência de entrada ( $\eta = P_{out}/P_{in}$ ), podem ser calculados utilizando-se os parâmetros de admitância do circuito equivalente (equações 2.18 a 2.21) e da admitância da carga conectada aos terminais de saída do transformador, de acordo com as equações (2.22) e (2.23) [17].

$$V_{Ganho} = \frac{|Y_{21}|}{|Y_L| + |Y_{22}|} \quad (2.22)$$

$$\eta = |V_{Ganho}|^2 \frac{|Y_L|}{|Y_{in}|} \quad (2.23)$$

Sendo  $Y_L$  a admitância complexa da carga conectada aos terminais de saída do transformador piezoelétrico e  $Y_{in}$  a admitância complexa de entrada do transformador conectado a carga  $Y_L$ .  $Y_{in}$  pode ser calculado com a seguinte relação:

$$Y_{in} = Y_{11} + Y_{12}V_{Ganho} \quad (2.24)$$

Tendo em vista que o ganho de tensão e a eficiência de um transformador piezoelétrico podem ser calculados a partir dos parâmetros de admitância do circuito

equivalente, e que esses, por sua vez, dependem dos parâmetros  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $C_{d1}$ ,  $C_{d2}$  e  $N$  do circuito equivalente (equações 2.7 a 2.12), temos que a eficiência e o ganho de tensão de um transformador piezoelétrico são funções dos coeficientes elásticos, dielétricos e piezoelétricos do material que compõe o elemento piezoelétrico e de suas dimensões, assim como da frequência da d.d.p. aplicada ao transformador. Desta forma, é possível simular o ganho de tensão e a eficiência de um transformador piezoelétrico do tipo monocamada e de modo de vibração radial confeccionado a partir de elementos piezoelétricos quaisquer desde que tenhamos as suas dimensões e seus coeficientes elásticos, dielétricos e piezoelétricos.



### 3. VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL

#### 3.1. PARAMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE

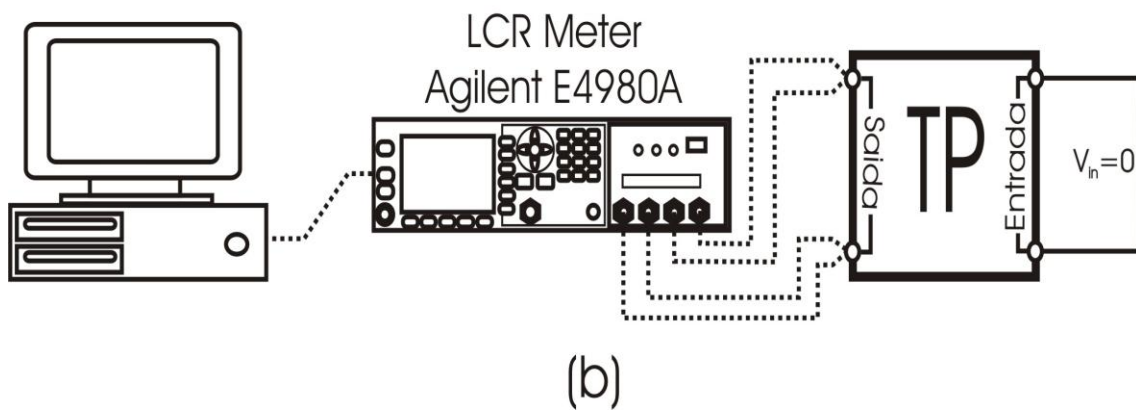
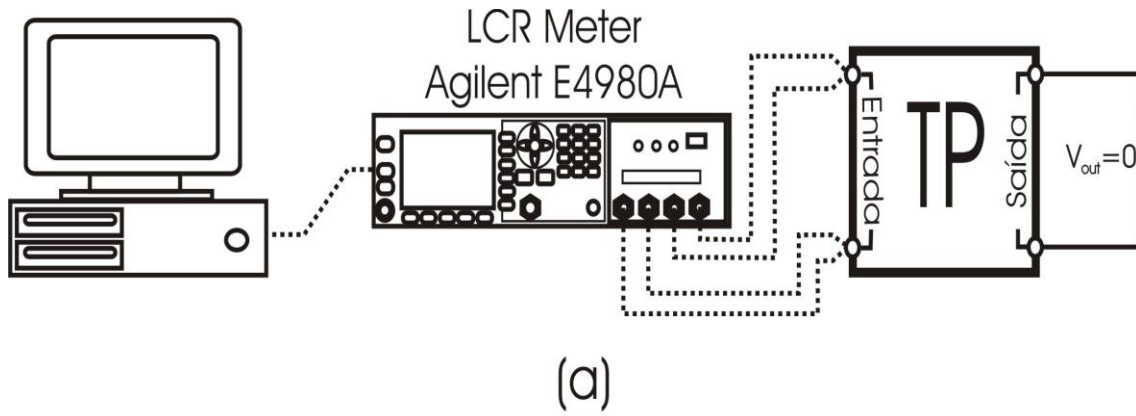
Os parâmetros do circuito equivalente podem ser medidos experimentalmente utilizando técnicas desenvolvidas em trabalhos anteriores [8, 9, 17, 18]. O método consiste basicamente em medir as partes reais e imaginárias da admitância de entrada e de saída do transformador piezoelétrico em função da frequência quando o outro terminal estiver em curto circuito. Deste modo, podemos dizer que esta técnica é constituída por dois passos:

Passo 1: Colocando o terminal de saída em curto circuito, e medindo as partes real e imaginária da admitância complexa de entrada somos capazes de obter os parâmetros  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $C_{d1}$  (referente às equações 2.7, 2.8, 2.9 e 2.11) do circuito equivalente (Figura 3.1 a).

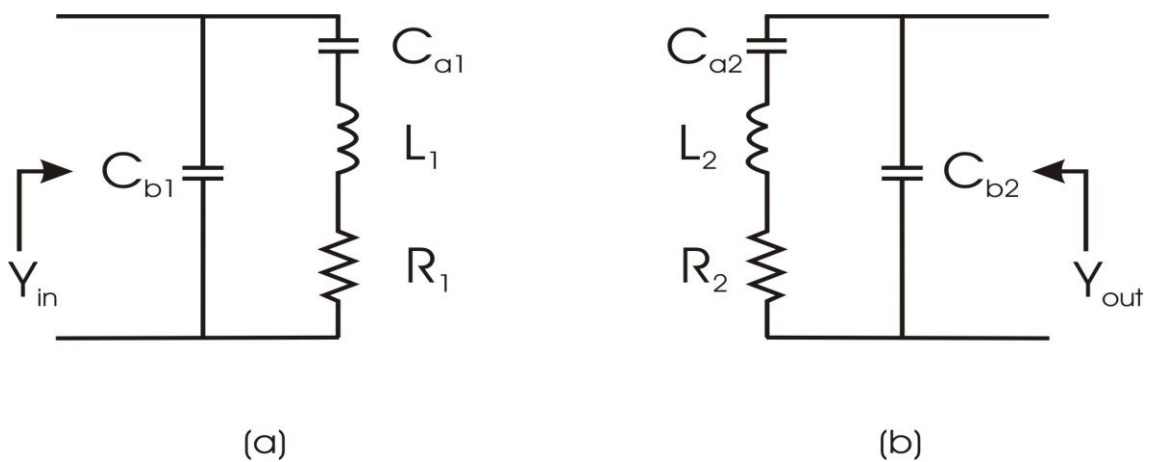
Passo 2: Colocando o terminal de entrada em curto circuito, e medindo as partes real e imaginária da admitância complexa de saída somos capazes de obter os parâmetros  $N$  e  $C_{d2}$  (referente às equações 2.10 e 2.12) do circuito equivalente (Figura 3.1 b).

As medidas referentes aos passos 1 e 2 foram realizadas com uma ponte de impedância agilent E4980A, a qual estava conectada por meio da porta de comunicação GPIB a um computador cuja função é a de controlar a varredura da frequência da d.d.p. aplicada no transformador e de adquirir os dados medidos.

A curva característica admitância dos terminais de entrada,  $Y_{in}$ , em função da frequência, em um transformador piezoelétrico com os terminais de saída em curto-circuito, é similar à curva de admitância do circuito ilustrado na figura 3.2 (a). A curva característica da admitância dos terminais de saída,  $Y_{out}$ , em função da frequência, em um transformador piezoelétrico com os terminais de entrada em curto-circuito, é similar à curva de admitância do circuito ilustrado na figura 3.2 (b) [16].



**Figura 3.1:** (a) Procedimento para medir a admitância de entrada. (b) Procedimento para medir a admitância de saída [17].



**Figura 3.2:** (a) Circuito equivalente para um TP com o terminal de saída em curto circuito. (b) Circuito equivalente para um TP com o terminal de entrada em curto circuito [17].

Os parâmetros  $R_1$ ,  $L_1$ ,  $C_{a1}$  e  $C_{b1}$  do circuito equivalente com o terminal de saída em curto-circuito (Figura 3.2 a) são equivalentes aos parâmetros  $R$ ,  $L$ ,  $C$  e  $C_{dm1}$  do circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico (Figura 2.3) [17], e podem ser obtidos experimentalmente utilizando a medida, em função da frequência, da parte real da admitância complexa, condutância ( $G$ ), e da parte imaginária da admitância complexa, susceptância ( $B$ ), em um gráfico de  $G \times B$ , que é chamado de círculo de admitância [9, 16]. O parâmetro  $C_{dm2}$  do circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico (Figura 2.3) é equivalente ao parâmetro  $C_{b2}$  do circuito equivalente com o terminal de entrada em curto circuito (Figura 3.2 b) [17], e o parâmetro  $N$  é definido como a raiz quadrada da razão entre  $L_2$  e  $L_1$ [17], ou seja:

$$C_{d1} = C_{b1} \quad (3.1)$$

$$C_{d2} = C_{b2} \quad (3.2)$$

$$R = R_1 \quad (3.3)$$

$$L = L_1 \quad (3.4)$$

$$C = C_{a1} \quad (3.5)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (3.6)$$

Deste modo, para obtermos os valores experimentais do circuito equivalente análogo ao transformador piezoelétrico (Figura 2.3), basta obter os valores experimentais do circuito equivalente com o terminal de saída em curto circuito (Figura 3.2 a), e os valores experimentais do circuito equivalente com o terminal de entrada em curto circuito (Figura 3.2 b). Uma descrição mais detalhada deste procedimento será apresentada na subseção a seguir.

### 3.1.1. Círculo de Admitância

Para obter os parâmetros do circuito equivalente com um dos terminais em curto circuito, as medidas de condutância e susceptância em função da frequência são dispostos em um gráfico  $G \times B$ , o que resulta em um círculo de admitância. A figura 3.3

ilustra o círculo de admitância do circuito equivalente análogo a um transformador piezoelétrico quando uma de suas portas está em curto circuito. Nele algumas frequências críticas são definidas.

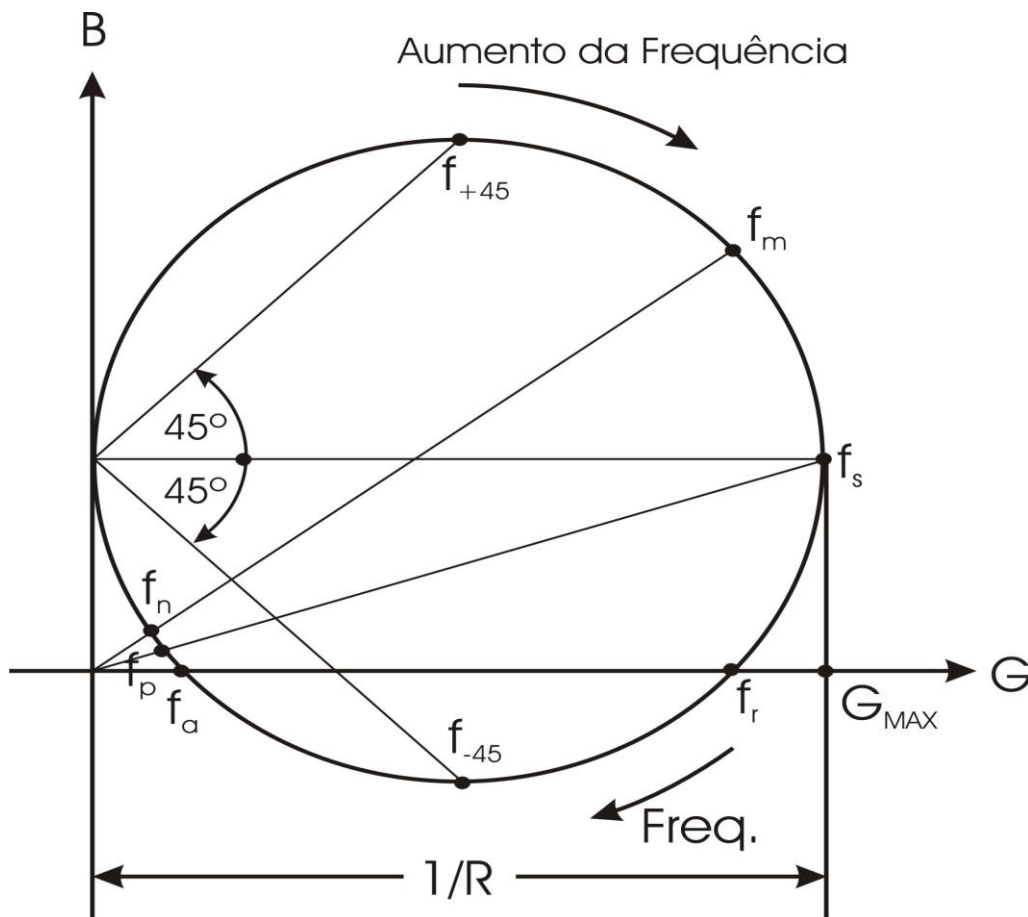


Figura 3.3: Círculo de admitância [17].

Os parâmetros apontados no círculo de admitância são:

- $f_m$  : Frequência de máxima admitância;
- $f_s$  : Frequência de ressonância em série;
- $f_r$  : Frequência de ressonância, susceptância = 0;
- $f_a$  : Frequência de anti-ressonância; susceptância = 0
- $f_p$  : Frequência de ressonância em paralelo;
- $f_n$  : Frequência de mínima admitância;

$f_{+45}$ : Frequência à +45°;

$f_{-45}$ : Frequência à -45°.

Se as perdas mecânicas,  $R$ , forem muito pequenas, as frequências críticas,  $f_m$ ,  $f_s$  e  $f_r$  serão aproximadamente iguais, e conseqüentemente,  $f_n$ ,  $f_p$  e  $f_a$  também serão aproximadamente iguais [17]. Para extrairmos os parâmetros do circuito equivalente é preciso, além das frequências críticas do círculo de admitância, encontrar a capacitância total dos elementos piezoelétrico atuador e transdutor [17].

A baixa frequência, como por exemplo:  $f \leq 1$  kHz, a reatância indutiva é aproximadamente zero [17]. Se a admitância do capacitor,  $C_{a1}$ , for muito maior que  $1/R_1$ , somente um capacitor intrínseco é observado quando medimos o terminal de entrada do transformador com o terminal de saída em curto circuito [17]. Deste modo, a capacitância total medida na porta de entrada do transformador piezoelétrico é:

$$C_T = C_{b1} + C_{a1} \quad (3.7)$$

Com a capacitância total em mãos, podemos calcular os parâmetros do circuito equivalente com o terminal de saída em curto circuito utilizando às relações (3.8) a (3.11).

$$C_{b1} = \frac{\omega_s^2}{\omega_p^2} C_T \cong \frac{\omega_r^2}{\omega_a^2} C_T \quad (3.8)$$

$$C_{a1} = C_T - C_{b1} \quad (3.9)$$

$$L_1 = \frac{1}{\omega_s^2 C_{a1}} \quad (3.10)$$

$$R_1 = \frac{1}{G_{\max}} \quad (3.11)$$

Os parâmetros  $R_2$ ,  $L_2$ ,  $C_{a2}$  e  $C_{b2}$ , referentes ao circuito equivalente, com os terminais de entrada em curto-circuito, são calculados de forma análoga. Desta forma, os parâmetros do circuito equivalente ficam definidos pelas relações (3.12) a (3.17). Ou seja:

$$C_{d1} = C_{b1} = \frac{f_{r1}^2}{f_{a1}^2} C_{T1} \quad (3.12)$$

$$C_{d2} = C_{b2} = \frac{f_{r2}^2}{f_{a2}^2} C_{T2} \quad (3.13)$$

$$C = C_{a1} = C_T - C_{b1} \quad (3.14)$$

$$L = L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{s1}^2 C_{a1}} \quad (3.15)$$

$$R = R_1 = \frac{1}{G_{\max 1}} \quad (3.16)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \sqrt{\frac{4\pi^2 f_{s1}^2 C_{a1}}{4\pi^2 f_{s2}^2 C_{a2}}} \quad (3.17)$$

Quando o círculo de admitância não intercepta o eixo G, ao invés de utilizarmos às equações (3.8) a (3.11) para determinarmos os parâmetros do circuito equivalente com um dos terminais em curto circuito, utilizamos as equações (3.18) a (3.21) [17, 18].

$$R_1 = 1/B_{\max} \quad (3.18)$$

$$C_{b1} = \frac{B_S}{2\pi f_S} \quad (3.19)$$

$$C_{a1} = \frac{1}{2\pi R} \frac{f_{-45} - f_{+45}}{f_{-45} f_{+45}} \quad (3.20)$$

$$L_1 = \frac{R}{2\pi} \frac{1}{f_{-45} - f_{+45}} \quad (3.21)$$

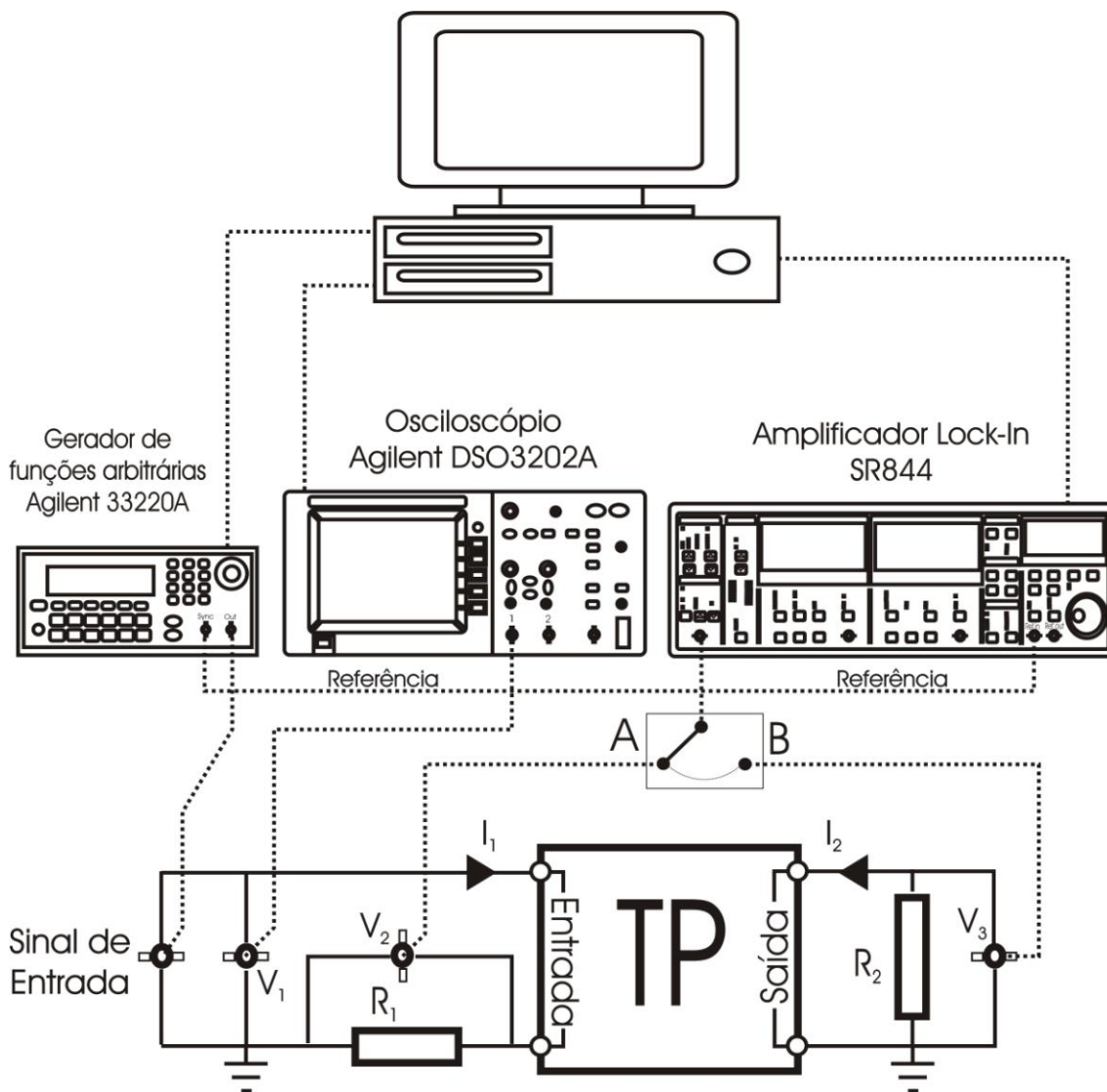
Sendo:  $B_{\max}$  o maior valor da susceptância;

$B_S$  o valor da susceptância na frequência de ressonância em série;

$f_S$  a frequência de ressonância em série.

### 3.2. PARÂMETROS DE ADMITÂNCIA

Os parâmetros de admitância,  $Y_{11}$  e  $Y_{21}$ , do transformador piezoelétrico em função da frequência da d.d.p. aplicada podem ser medidos experimentalmente preparando-se a montagem experimental ilustrada na figura 3.4.



**Figura 3.4:** Esquema da montagem experimental para determinação dos parâmetros de admitância  $Y_{11}$  e  $Y_{21}$ .

A diferença de potencial ( $V_1$ ) aplicado pelo gerador de função no circuito elétrico representado na figura 3.4 é um sinal senoidal, e tem o seu valor medido pelo osciloscópio. O resistor  $R_1 = 1 \Omega$ , ligado em série com o acesso de entrada do TP gera uma pequena diferença de potencial em seus terminais ( $V_2$ ) a qual é medida com o

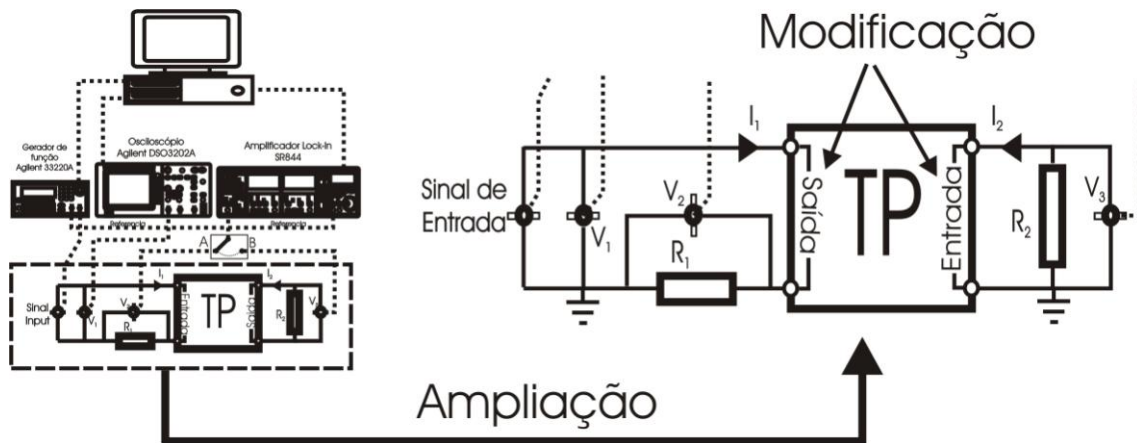
amplificador lock-in quando a chave seletora encontra-se na posição A, sendo assim, a corrente elétrica  $I_1$  fica definida como  $I_1=V_2/R_1$ . Desta forma, o parâmetro de admitância  $Y_{11}$ , definido no capítulo 2, seção 2.2 pela equação (2.14) é dado por:

$$Y_{11} = \frac{V_2}{R_1 V_1} \quad (3.22)$$

Colocando a chave seletora na posição B, o resistor  $R_2$  ligado em paralelo com o acesso de saída do TP tem a sua d.d.p. medida pelo amplificador lock-in, e desta forma a corrente elétrica  $I_2$  fica definida por:  $I_2=V_3/R_2$ , e de acordo com a equação (2.15) o parâmetro de admitância  $Y_{21}$  é dado por:

$$Y_{21} = \frac{V_3}{R_2 V_1} \quad (3.23)$$

Para medirmos os parâmetros de admitância  $Y_{12}$  e  $Y_{22}$  devemos proceder de forma análoga, porem, os terminais de entrada e saída do TP devem ser invertidos em relação ao que foi descrito na figura 3.4. Para um melhor entendimento desta modificação temos a figura 3.5, que ilustra a inversão dos terminais do TP.



**Figura 3.5: Modificação do esquema da montagem experimental para determinação dos parâmetros de admitância  $Y_{12}$  e  $Y_{22}$ .**

Com esta inversão dos terminais do TP temos que:



$$Y_{12} = \frac{V_3}{R_2 V_1} \quad (3.24)$$

$$Y_{22} = \frac{V_2}{R_1 V_1} \quad (3.25)$$

Os resistores  $R_1$  e  $R_2$  conectados ao TP para realizar a medida da corrente elétrica afeta as medidas dos parâmetros de admitância, porem, devido aos seus baixos valores de resistência os erros gerados são inferiores a 1%.

A varredura da frequência do sinal aplicado ao TP, assim como as medidas das d.d.p.'s são controladas por um computador conectado aos equipamentos de medidas por meio da porta de comunicação GPIB, e os dados medidos são registrados automaticamente.

### 3.3. GANHO DE TENSÃO E EFICIÊNCIA

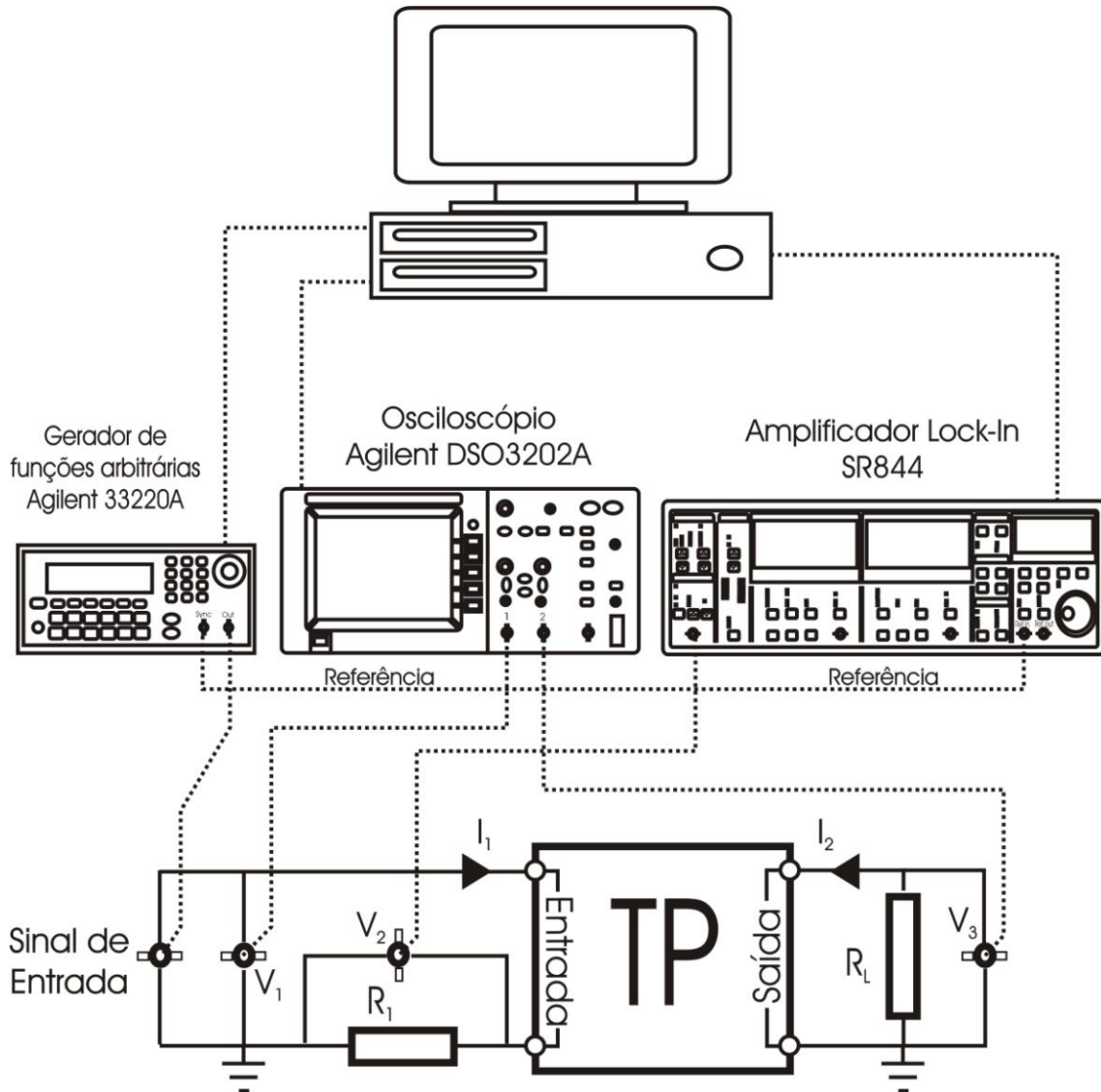
O ganho de tensão e a eficiência de um transformador piezoelétrico em função da frequência da d.d.p. aplicada em seu acesso de entrada depende da carga de prova,  $R_L$ , que o TP alimenta [8, 17], e podem ser medidos experimentalmente preparando-se a montagem experimental ilustrada na figura 3.6.

O ganho de tensão, definido pela equação (3.26), pode ser facilmente medido com o osciloscópio de dois canais, sendo que um canal mede a diferença de potencial na entrada,  $V_1$ , e o outro a diferença de potencial na saída,  $V_3$ .

$$V_{Ganho} = \frac{V_3}{V_1} \quad (3.26)$$

A eficiência do transformador piezoelétrico, definido pela equação (3.27), pode ser medida com um osciloscópio de dois canais e um amplificador lock-in. Com um dos canais do osciloscópio medimos a diferença de potencial na entrada do transformador,  $V_1$ , e com o outro canal medimos a diferença de potencial na saída,  $V_3$ , ou seja, nos terminais do resistor de carga. Com o amplificador lock-in medimos a diferença de potencial no resistor,  $R_1$ , e a fase,  $\theta$ , entre a d.d.p. aplicada pelo gerador de função,  $V_1$ , e a d.d.p. nos terminais do resistor  $R_1, V_2$ .

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1 \cos \theta} \quad (3.27)$$



**Figura 3.6: Representação esquemática para medida de ganho de tensão e eficiência.**

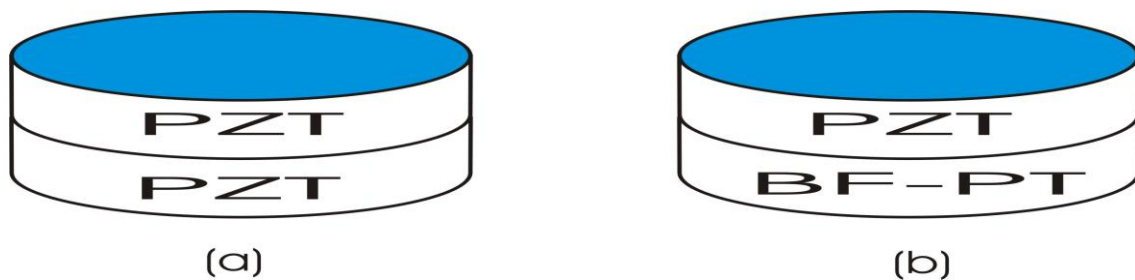
A diferença de potencial no resistor  $R_1$  é proporcional a corrente elétrica  $I_1$ . Esta proporcionalidade obedece a lei de Ohm, ou seja,  $I_1 = V_2/R_1$ . A diferença de potencial no resistor de carga,  $R_L$ , é proporcional a corrente elétrica  $I_2$ , e pode ser calculada pela relação,  $I_2 = V_3/R_L$ . Deste modo, a eficiência do transformador piezoelétrico é dada por:

$$\eta = \frac{V_3^2 R}{V_1 V_2 R_L \cos \theta} \quad (3.28)$$

A inserção do resistor  $R_1$  no circuito ilustrado pela figura 3.6 afeta as medidas de ganho de tensão e eficiência do transformador piezoelétrico, mas é imprescindível para a obtenção da corrente elétrica  $I_1$ , tendo em vista que a alta frequência de trabalho do transformador piezoelétrico impossibilita a utilização de amperímetros. Para reduzir os erros causados por esse resistor é necessário que ele tenha baixa resistência, neste caso utilizamos um resistor de  $1 \Omega$ .

## 4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Com o objetivo de verificar o comportamento de transformadores de estado sólido que contenham um elemento piezoelétrico formado por uma cerâmica multiferroica do composto  $(0.6)\text{BiFeO}_3-(0.4)\text{PbTiO}_3$ , a qual será denominada por BF-PT, montamos e caracterizamos dois transformadores do tipo monocamada e de modo de vibração radial. Um deles foi montado com dois elementos piezoelétricos compostos de cerâmicas PZT-5A (figura 4.1 a). O outro foi montado com um elemento piezoelétrico formado por PZT-5A e um elemento piezoelétrico formado por BF-PT (figura 4.2 b). A caracterização dos transformadores foi realizada determinando-se os parâmetros do circuito equivalente, parâmetros de admitância, ganho e eficiência, e a análise dos resultados foi realizada por comparação entre os resultados obtidos para os dois tipos de transformadores de estado sólido.



**Figura 4.1: Transformadores de estado sólido. (a) TP confeccionado com elementos piezoelétricos PZT-5A. (b) TP confeccionado com elementos piezoelétricos PZT-5A e BF-PT.**

Tendo em vista que as propriedades dos transformadores de estado sólido que atuam no modo radial de vibração dependem da espessura e do raio dos elementos piezoelétricos, os transformadores foram montados a partir de elementos piezoelétricos com dimensões iguais. Deste modo, garantimos que a comparação realizada entre os dois transformadores confeccionados nesse trabalho, reflita a diferença entre as propriedades das cerâmicas PZT-5A e BF-PT.

### 4.1. MONTAGEM DOS TRANSFORMADORES PIEZOELÉTRICOS

O processo de montagem dos transformadores de estado sólido desenvolvido neste trabalho contém 4 etapas, as quais estão enunciadas cronologicamente a seguir:

fabricação dos elementos piezoelétricos, polarização dos elementos piezoelétricos, inserção das conexões elétricas, e acoplamento entre o elemento piezoelétrico atuador e transdutor. Detalhes de cada uma destas etapas serão apresentados ao longo deste capítulo, nas subseções que seguem.

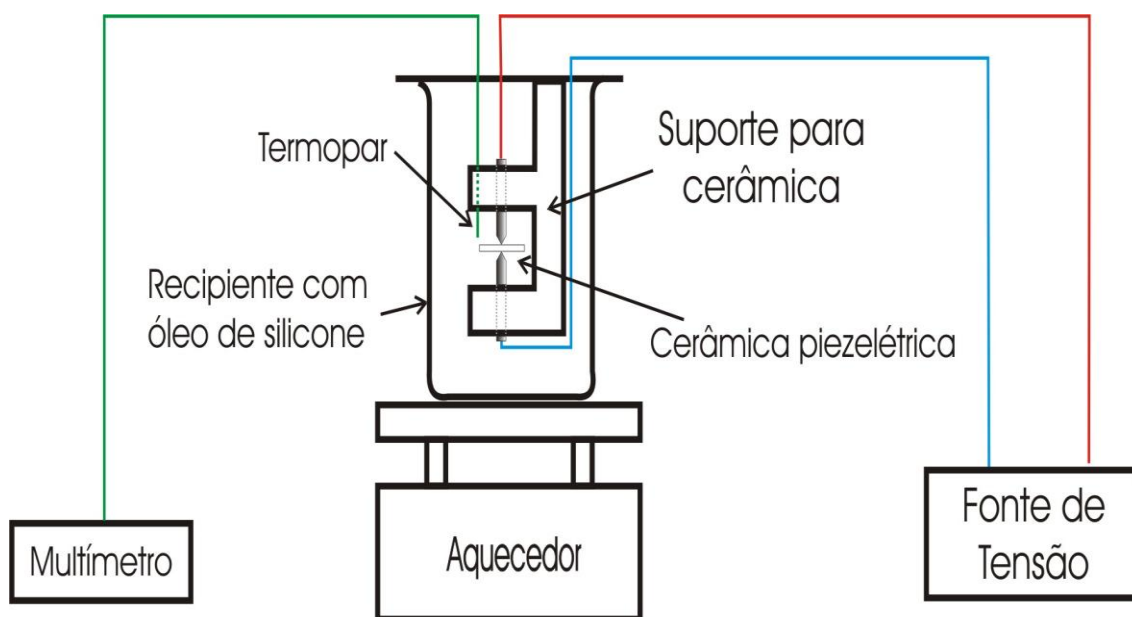
#### *4.1.1. Fabricação dos Elementos Piezoelétricos*

Utilizando cerâmicas piezoelétricas de PZT-5A, fabricadas no GCFerr/UFSCar, e cerâmicas piezoelétricas de BF-PT fabricadas no GDDM/UEM, preparamos, por processos de corte e polimento, 3 cerâmicas piezoelétricas de PZT-5A e uma cerâmica piezoelétrica de BF-PT em formato de discos com 1 mm de espessura e 8 mm de raio. A aplicação dos eletrodos sobre as superfícies das cerâmicas piezoelétricas foi realizada com tinta condutiva de prata, e desta forma obtivemos os 4 elementos piezoelétricos que foram utilizados na montagem dos transformadores de estado sólido.

#### *4.1.2. Polarização dos Elementos Piezoelétricos*

A polarização dos elementos piezoelétricos foi realizada no sistema ilustrado na figura 4.2. Esse sistema consiste de um aquecedor, um recipiente contendo óleo de silicone, no qual o elemento piezoelétrico é imerso com o auxílio de um suporte móvel, de uma fonte de alta tensão (corrente contínua), e um termopar ligado a um multímetro que indica a temperatura na região onde o elemento piezoelétrico se encontra.

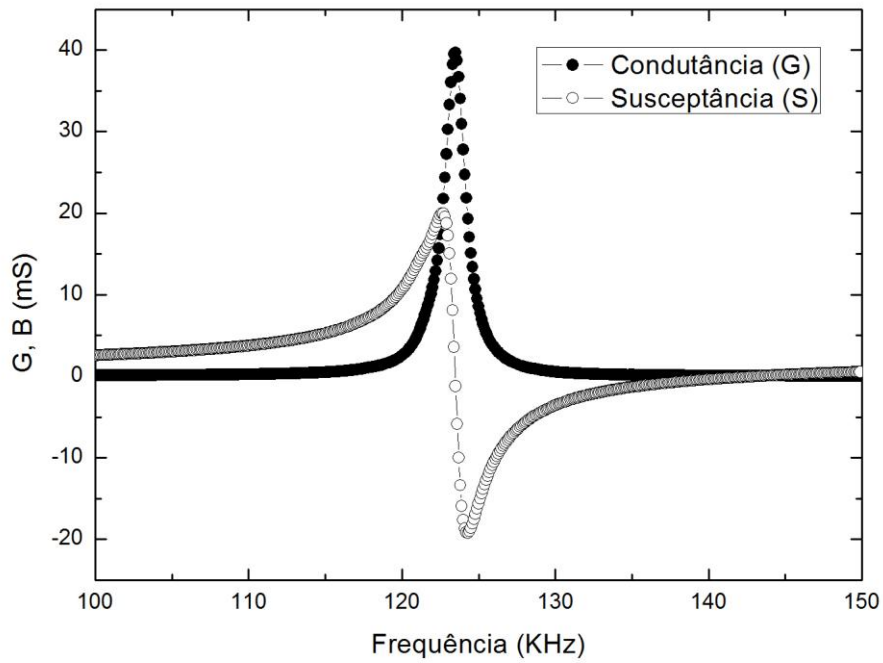
O óleo de silicone serve como meio condutor da energia térmica gerada pelo aquecedor para o elemento piezoelétrico, e além disso, serve para evitar descargas elétricas decorrentes da alta diferença de potencial aplicada sobre o elemento piezoelétrico.



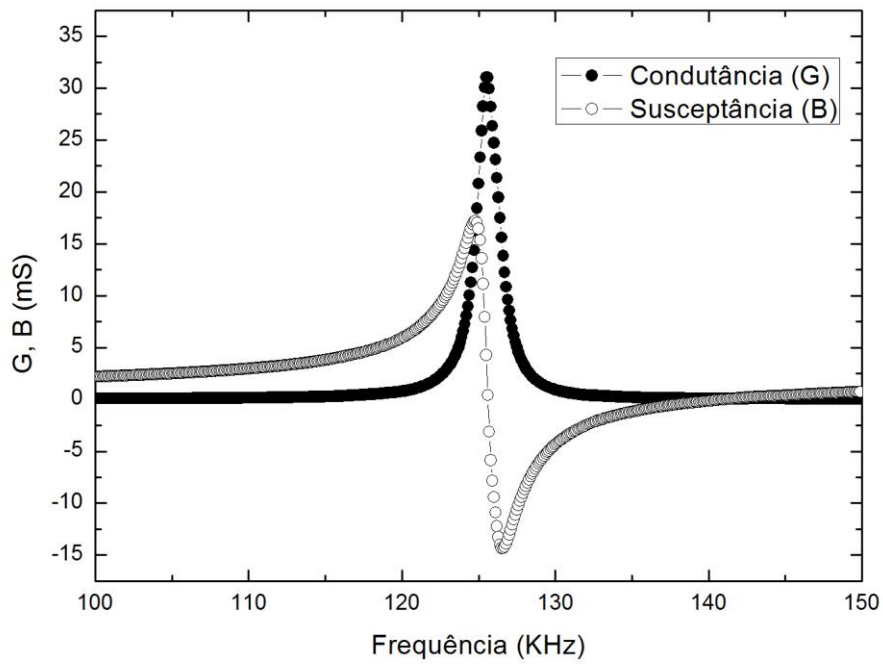
**Figura 4.2: Sistema de polarização dos elementos piezoelétricos.**

Quando a temperatura medida pelo multímetro indica o valor desejado, que é de 100 °C, desligamos o aquecedor e aplicamos uma diferença de potencial de 2000 V entre os eletrodos do elemento piezoelétrico. Essa d.d.p. é mantida durante o processo de resfriamento do sistema, até o mesmo entrar em equilíbrio térmico com o ambiente. O aquecimento das cerâmicas piezoelétricas torna a sua rede cristalina mais maleável, e conseqüentemente o elemento piezoelétrico se torna mais susceptível a polarização. O resfriamento dos elementos piezoelétricos deve ser feito com o campo elétrico aplicado, caso contrario a agitação térmica da rede cristalina desorienta os dipolos elétricos criados, de forma que o elemento piezoelétrico não fique com uma polarização remanescente.

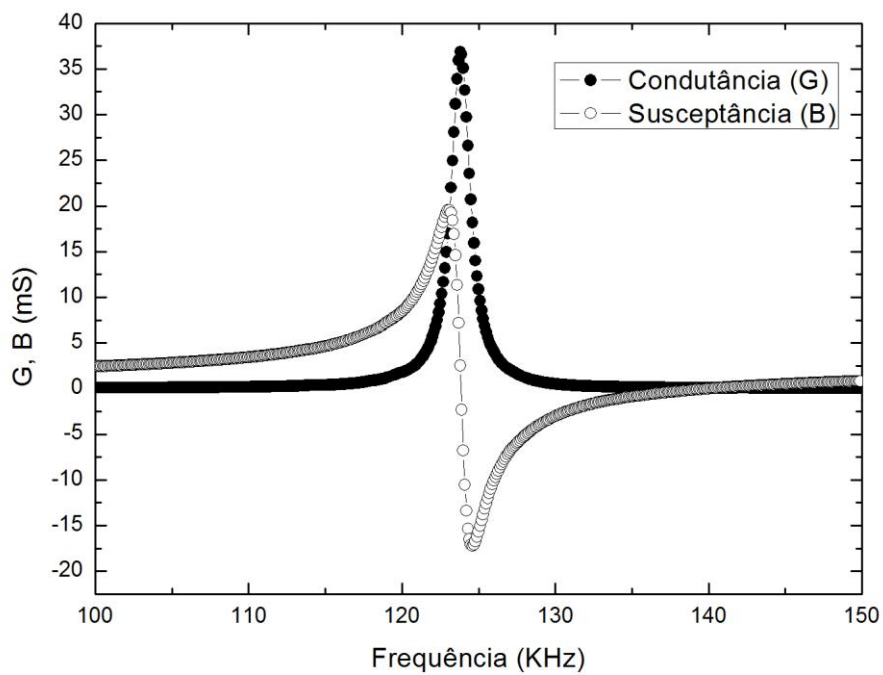
Para verificarmos se os elementos piezoelétricos ficaram com uma polarização remanescente, ou seja, polarizados, realizamos medidas de condutância (G) e susceptância (B) em função da frequência, utilizando uma ponte de impedâncias Agilent E4980A. Os gráficos dessas medidas estão apresentados nas figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, os quais correspondem, respectivamente, aos elementos piezoelétricos intitulados por PZT-A, PZT-B, PZT-C e BFPT.



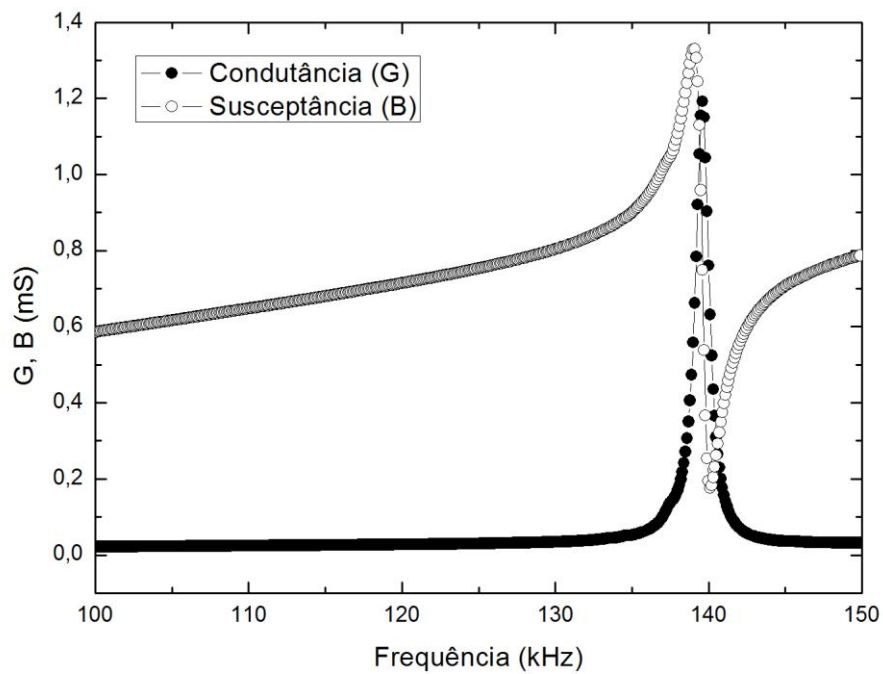
**Figura 4.3: Condutância e susceptância do elemento piezoelétrico PZT-A em função da frequência a temperatura ambiente.**



**Figura 4.4: Condutância e susceptância do elemento piezoelétrico PZT-B em função da frequência a temperatura ambiente.**



**Figura 4.5:** Condutância e susceptância do elemento piezoelétrico PZT-C em função da frequência a temperatura ambiente.



**Figura 4.6:** Condutância e susceptância do elemento piezoelétrico BFPT em função da frequência a temperatura ambiente.



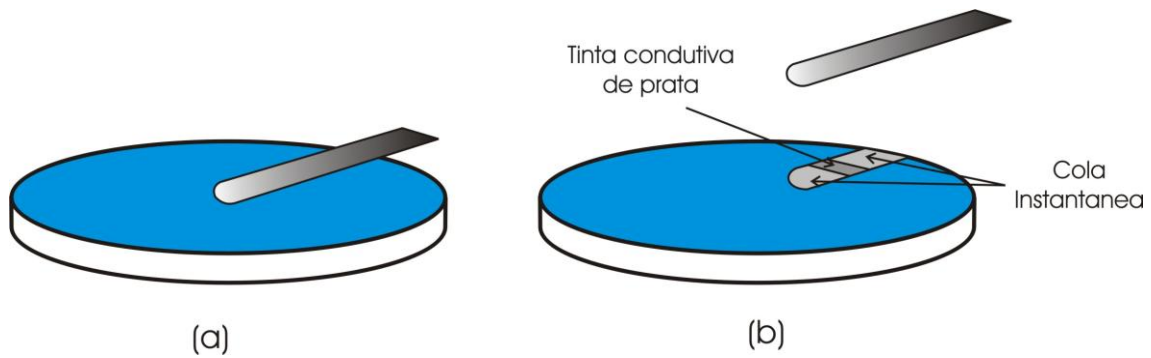
As curvas de condutância e susceptância em função da frequência (figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6) apresentam as características típicas de um circuito RLC em série com um capacitor em paralelo, o qual é o equivalente elétrico a um elemento piezoelétrico polarizado (Capítulo 1, seção 1.3) [9]. As frequências de ressonância, que ocorrem em torno de 123 kHz para os elementos piezoelétricos PZT-A, PZT-B e PZT-C e de 139 kHz para o elemento piezoelétrico BFPT, apresentam, respectivamente, um desvio percentual de 1.7% e 4.5% em relação aos valores calculados a partir das constantes de frequência encontrados na literatura [19, 20] e do diâmetro dos elementos piezoelétricos.

A diferença entre a frequência de ressonância do elemento piezoelétrico de PZT-5A e o elemento piezoelétrico de BFPT pode ter como consequência a redução do ganho de tensão e da eficiência do transformador de estado sólido montado a partir da combinação desses dois elementos piezoelétricos.

Conforme podemos observar na figura 4.5, a susceptância do elemento piezoelétrico BF-PT, diferente do PZT-5A, é sempre positiva, nesta condição é usual dizermos que a reatância associada ao elemento piezoelétrico é indutiva, isto é, a corrente esta sempre adiantada em relação à tensão. A baixa intensidade dos picos de condutância e susceptância do elemento piezoelétrico BF-PT, quando comparadas com os elementos PZT-5A, indicam uma maior perda de energia dessas cerâmicas.

#### *4.1.3. Inserção das Conexões Elétricas*

Antes de acoplarmos o elemento piezoelétrico atuador ao transdutor devemos inserir os contatos elétricos referentes aos terminais neutros. Esses contatos consistem de uma chapa metálica de alumínio com 0.060 mm de espessura, 3 mm de largura e 30 mm de comprimento, que são fixados aos eletrodos dos elementos piezoelétricos conforme ilustra a figura 4.7 (a).



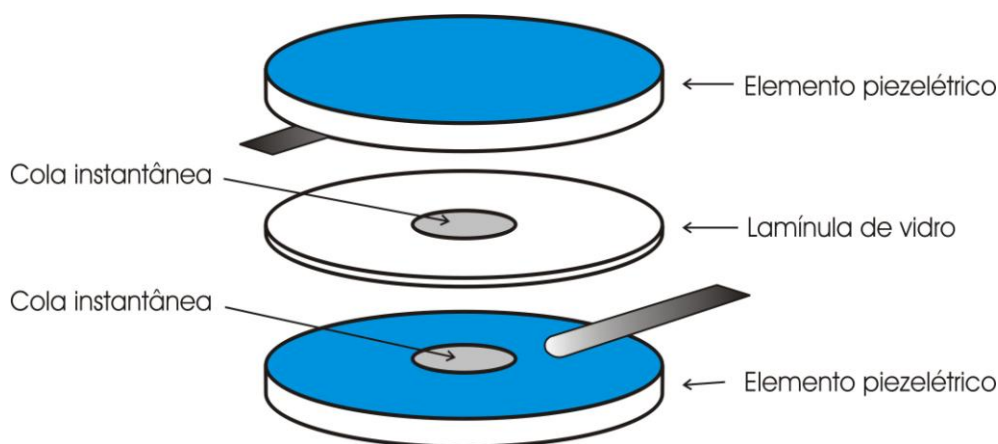
**Figura 4.7: (a) Elemento piezoelétrico com contato elétrico. (b) Processo de fixação do contato elétrico.**

A chapa metálica foi fixada ao elemento piezoelétrico com cola instantânea Loctide u56. Essa cola não é condutora elétrica e por esse motivo foi aplicada uma pequena quantidade de tinta condutiva de prata para que desta forma as cargas elétricas possam fluir livremente do eletrodo para o contato elétrico e vice-versa.

O processo de fixação do contato elétrico na cerâmica piezoelétrica está ilustrado na figura 4.7 (b). A cola instantânea é espalhada em quase toda a região do elemento piezoelétrico no qual será fixado o contato. Na região restante é depositada tinta condutiva de prata. Em seguida, colocamos a chapa metálica sobre o elemento piezoelétrico e aplicamos uma pequena pressão até que a cola seque.

#### *4.1.4. Acoplamento entre os Elementos Atuador e Transdutor*

A etapa final da fabricação do transformador de estado sólido consiste no acoplamento do elemento piezoelétrico atuador ao transdutor. Esse processo deve garantir que os dois elementos fiquem isolados eletricamente. Para isso utilizamos uma lamínula de vidro com espessura de 0.15 mm para separar os elementos piezoelétricos. O acoplamento foi realizado com cola instantânea Loctite u56, conforme ilustrado na figura 4.8. O procedimento de junção dos elementos piezoelétricos é descrito a seguir:



**Figura 4.8: Acoplamento dos elementos piezoelétricos.**

Após posicionarmos o elemento piezoelétrico atuador em uma superfície plana, com o eletrodo referente ao terminal neutro do transformador voltado para cima, aplicamos a cola instantânea em seu centro, em seguida colocamos a lamínula de vidro sobre o elemento piezoelétrico e imprimimos uma pequena pressão de forma que a cola se espalhe por toda a superfície do elemento piezoelétrico. A pressão é mantida até que ocorra a secagem da cola. Concluída essa etapa, aplicamos a cola instantânea sobre o centro da lamínula de vidro, posicionamos o elemento transdutor sobre ela e aplicamos uma pressão controlada até a cola começar a escorrer pelas bordas.

Seguindo os processos de montagem descritos nesse capítulo, confeccionamos 2 transformadores de estado sólido. O primeiro foi montado com os elementos piezoelétricos PZT-A e PZT-B. A esse transformador demos o nome de transformador do tipo monocamada e radial ferroelétrico, ou simplesmente TRF. O segundo foi montado com os elementos piezoelétricos PZT-C e BFPT. A esse transformador demos o nome de transformador do tipo monocamada e radial multiferroico, ou simplesmente TRM. O transformador de estado sólido TRM pode ser utilizado em duas situações distintas. A primeira delas utiliza o elemento piezoelétrico BFPT como transdutor eletromecânico, e a segunda utiliza o elemento piezoelétrico BFPT como atuador eletromecânico. Para diferenciar essas duas situações utilizaremos a seguinte notação:

- Quando a cerâmica BFPT estiver agindo como transdutor eletromecânico, denominaremos o transformador tipo monocamada radial multiferroico por TRM-T.
- Quando a cerâmica BFPT estiver agindo como atuador eletromecânico, denominaremos o transformador tipo monocamada radial multiferroico por TRM-A.

## 4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSFORMADORES

Com base na análise do circuito equivalente (Capítulo 2) e na verificação experimental (Capítulo 3), iremos calcular e determinar experimentalmente os parâmetros do circuito equivalente, os parâmetros de admitância, o ganho de tensão e a eficiência dos transformadores de estado sólido confeccionados nesse trabalho.

### 4.2.1. Parâmetros do Circuito Equivalente

Os valores dos parâmetros dos circuitos equivalentes referentes aos transformadores, TRF, TRM-T e TRM-A podem ser calculados com a utilização das equações (2.7) a (2.12), das dimensões dos elementos piezoelétricos, e dos coeficientes piezoelétricos, elásticos e dielétricos das cerâmicas que os constituem. Esses coeficientes são encontrados na literatura [19, 20], e estão reproduzidos na Tabela 1.

**Tabela 1: Coeficientes dos elementos piezoelétricos. Cerâmica piezoelétrica do composto Pb(Zr-Ti)O<sub>3</sub>; BF-PT, cerâmica piezoelétrica do composto (0.6)BiFeO<sub>3</sub>-(0.4)PbTiO<sub>3</sub>; Q<sub>m</sub>, fator de qualidade mecânica; ρ, densidade da cerâmica; S<sub>11</sub><sup>E</sup>, constante elástica a campo elétrico constante; σ, razão de Poisson; d<sub>31</sub>, constante piezoelétrica; ε<sub>33</sub><sup>T</sup>, permissividade elétrica a tensão constante [19, 20].**

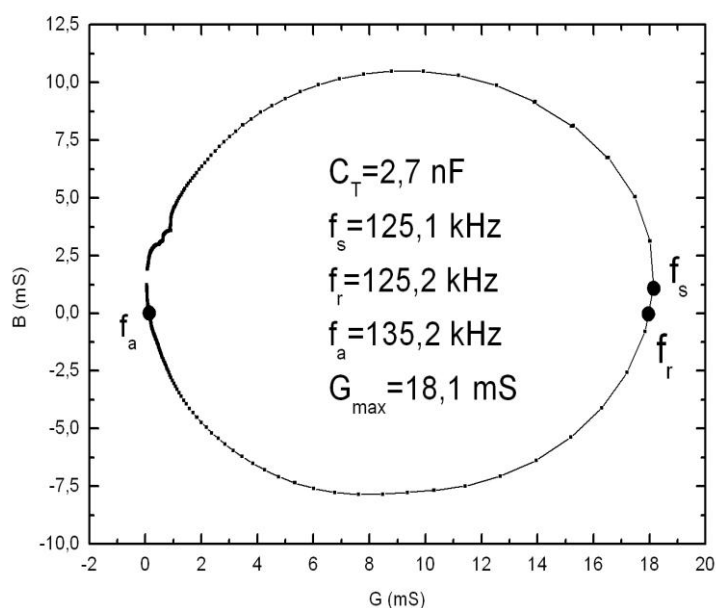
	PZT-5A	BF-PT
$Q_m$	75	142,9
$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	7750	7476
$S_{11}^E$ (m <sup>2</sup> /V)	16,4 x 10 <sup>-12</sup>	12,9 x 10 <sup>-12</sup>
$\sigma$	-0,35	-0,33
$d_{31}$ (m/V)	-171 x 10 <sup>-12</sup>	-41,6 x 10 <sup>-12</sup>
$\epsilon_{33}^T$ (C <sup>2</sup> /Nm <sup>2</sup> )	15.052,21 x 10 <sup>-12</sup>	4.320,9 x 10 <sup>-12</sup>

De posse dos coeficientes apresentados na Tabela 1, e sabendo que todos os elementos piezoelétricos possuem 1 mm de espessura e 8 mm de raio, os parâmetros dos circuitos equivalentes referentes aos transformadores TRF, TRM-T e TRM-A foram calculados. Os valores obtidos para esses parâmetros estão listados na Tabela 2.

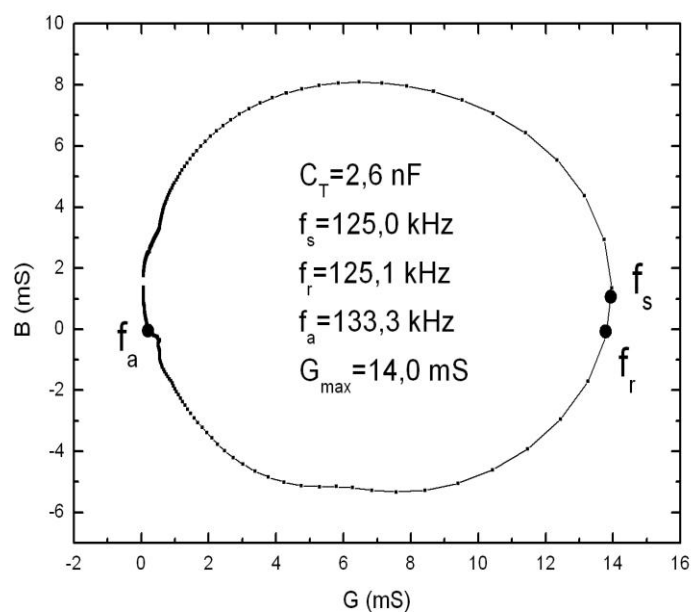
**Tabela 2: Parâmetros dos circuitos equivalentes calculados. TRF, transformador radial ferroelétrico do tipo monocamada; TRM-T, transformador radial multiferroico transdutor do tipo monocamada; TRM-A, transformador radial multiferroico atuador do tipo monocamada; R, resistência equivalente; L, indutância equivalente; C,  $C_{d1}$  e  $C_{d2}$ , capacitância equivalente; N; razão entre número de espiras equivalente.**

	Parâmetros dos Circuitos Equivalentes		
	Valores Calculados		
	TRF	TRM-T	TRM-A
R ( $\Omega$ )	46,20	36,63	371,67
L (mH)	5,17	5,08	51,52
C (nF)	0,43	0,38	0,03
$C_{d1}$ (nF)	2,76	2,76	0,85
$C_{d2}$ (nF)	2,76	0,85	2,76
N	1,00	3,18	0,31

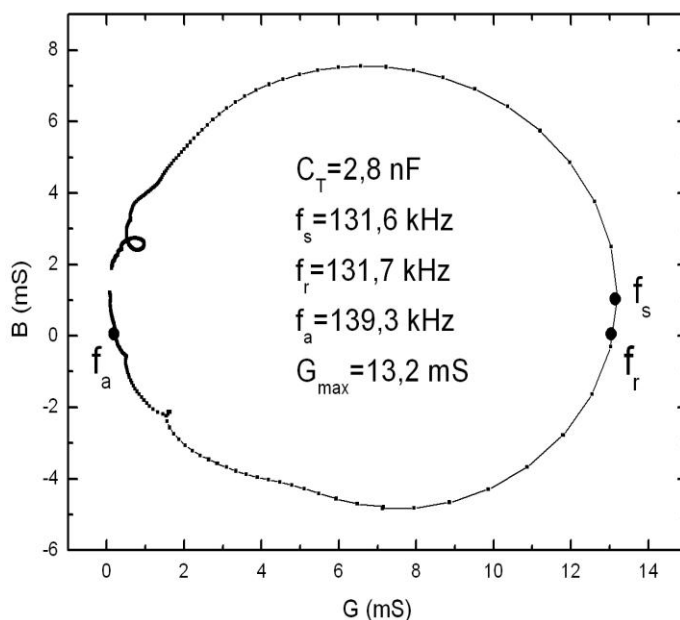
Por outro lado, esses parâmetros podem ser medidos utilizando-se o círculo de admitância (figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12), conforme discutido no capítulo 3, subseção 3.1.1.



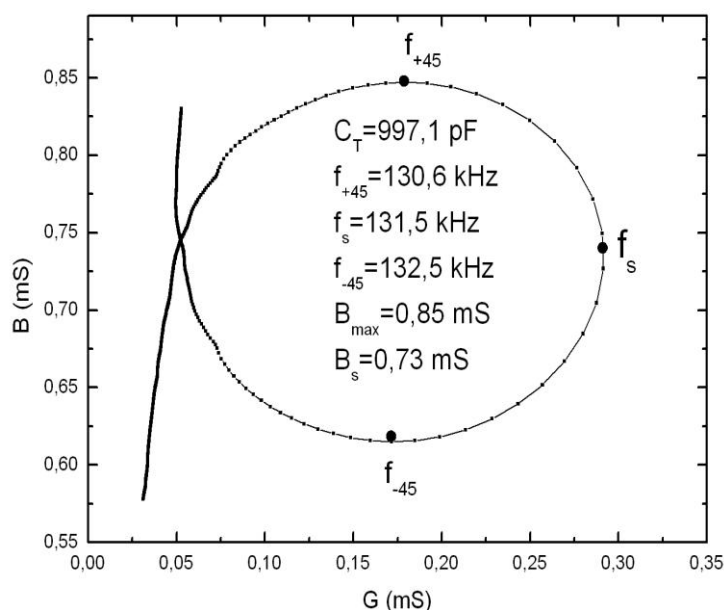
**Figura 4.9: Círculo de admitância referente ao elemento PZT-A com o elemento PZT-B em curto circuito a temperatura ambiente.  $C_T$ , capacitância do elemento piezoelétrico a baixa frequência;  $f_a$  frequência de anti-ressonância;  $f_r$ , frequência de ressonância;  $f_s$ , frequência de ressonância em série;  $G_{max}$ , máximo valor da condutância.**



**Figura 4.10:** Círculo de admitância referente ao elemento PZT-B com o elemento PZT-A em curto circuito a temperatura ambiente.  $C_T$ , capacitância do elemento piezoelétrico a baixa frequência;  $f_a$  frequência de anti-ressonância;  $f_r$ , frequência de ressonância;  $f_s$ , frequência de ressonância em série;  $G_{\max}$ , máximo valor da condutância.



**Figura 4.11:** Círculo de admitância referente ao elemento PZT-C com o elemento BFPT em curto circuito a temperatura ambiente.  $C_T$ , capacitância do elemento piezoelétrico a baixa frequência;  $f_a$  frequência de anti-ressonância;  $f_r$ , frequência de ressonância;  $f_s$ , frequência de ressonância em série;  $G_{\max}$ , máximo valor da condutância.



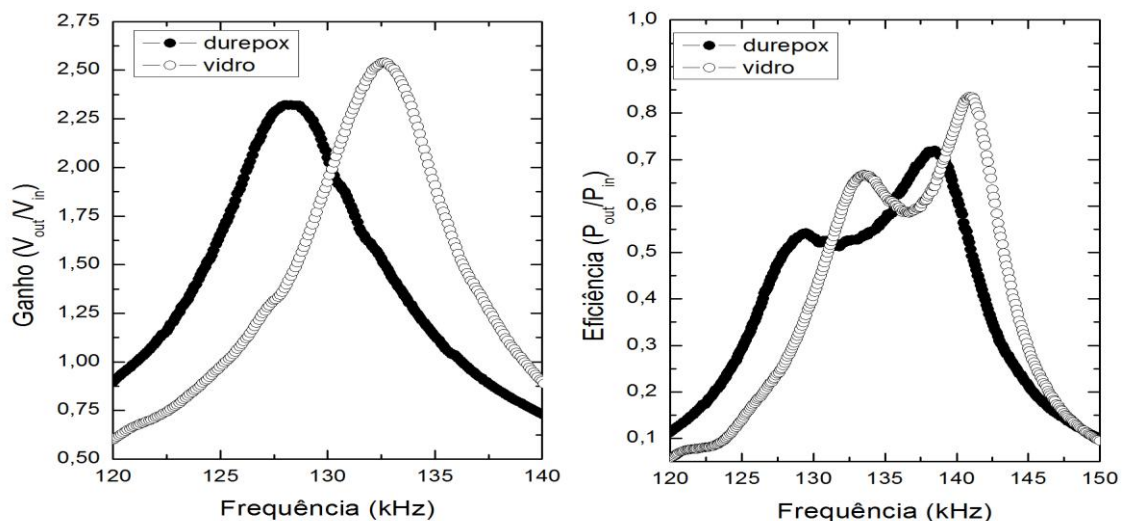
**Figura 4.12:** Círculo de admitância referente ao elemento BFPT com o elemento PZT-C em curto circuito a temperatura ambiente.  $C_T$ , capacitância do elemento piezoelétrico a baixa frequência;  $f_s$ , frequência de ressonância em série;  $f_{+45}$ , frequência a  $+45^\circ$ ;  $f_{-45}$ , frequência a  $-45^\circ$ ;  $B_{\max}$ , valor máximo da susceptância;  $B_s$ , valor da susceptância na frequência de ressonância em série.

Os valores medidos utilizando-se do círculo de admitância, e os desvios percentuais em relação aos valores calculados estão apresentados na Tabela 3.

**Tabela 2:** Parâmetros dos circuitos equivalentes calculados. TRF, transformador radial ferroelétrico do tipo monocamada; TRM-T, transformador radial multiferroico transdutor do tipo monocamada; TRM-A, transformador radial multiferroico atuador do tipo monocamada; R, resistência equivalente; L, indutância equivalente; C,  $C_{d1}$  e  $C_{d2}$ , capacitância equivalente; N; razão entre número de espiras equivalente.

	Parâmetros dos Circuitos Equivalentes					
	Valores Medidos e Desvios Percentuais					
	TRF	D %	TRM-T	D %	TRM-A	D %
R ( $\Omega$ )	55,13	16,20	75,81	51,68	1180,00	68,50
L (mH)	4,15	14,58	4,88	4,09	98,8	47,85
C (nF)	0,39	10,25	0,30	26,66	0,02	50,00
$C_{d1}$ (nF)	2,32	18,96	2,50	10,40	0,88	3,41
$C_{d2}$ (nF)	2,29	20,52	0,88	3,40	2,50	10,40
N	1,11	9,90	4,50	29,33	0,22	40,91

Os elevados desvios percentuais entre os valores dos parâmetros do circuito equivalente calculados e determinados experimentalmente possuem, a grosso modo, 3 causas principais. A menos relevante é referente aos desvios percentuais entre os coeficientes piezoelétricos, elásticos e dielétricos encontrados na literatura (apresentados na Tabela 1), e os coeficientes reais das cerâmicas. Em segundo lugar, o processo de acoplamento dos elementos piezoelétricos atuador e transdutor não é um acoplamento ideal, isto faz com que ocorram maiores percas de energia do que o modelo prevê e podem gerar um pequeno deslocamento na frequência de ressonância, conforme podemos observar na figura 4.13, que ilustram as curvas de ganho de tensão e eficiência em função da frequência, para dois TP que alimentam uma carga de 2 k $\Omega$  e que foram confeccionados com as mesmas cerâmicas, porem com isolamentos diferentes, um deles com lamínula de vidro e o outro com durepoxi.



**Figura 4.13:** Curvas de ganho de tensão e eficiência em função da frequência dos transformadores piezoelétricos acoplados com lamínula de vidro e durepoxi alimentando uma carga ôhmica de 2 k $\Omega$ .

Tendo em vista que os dois transformadores foram montados com as mesmas cerâmicas, isto é, seus coeficientes e suas dimensões são iguais, e alimenta a mesma carga ôhmica, o modelo teórico diz que as curvas de ganho de tensão e eficiência devem ser idênticas, porem, quando substituímos o isolamento de vidro pelo isolamento de durepoxi e refazemos a medida experimental, observa-se uma redução da frequência de ressonância (redução de 3 %) assim como do máximo ganho de tensão (redução de 9 %) e da eficiência na frequência de ressonância (redução de 19 %).



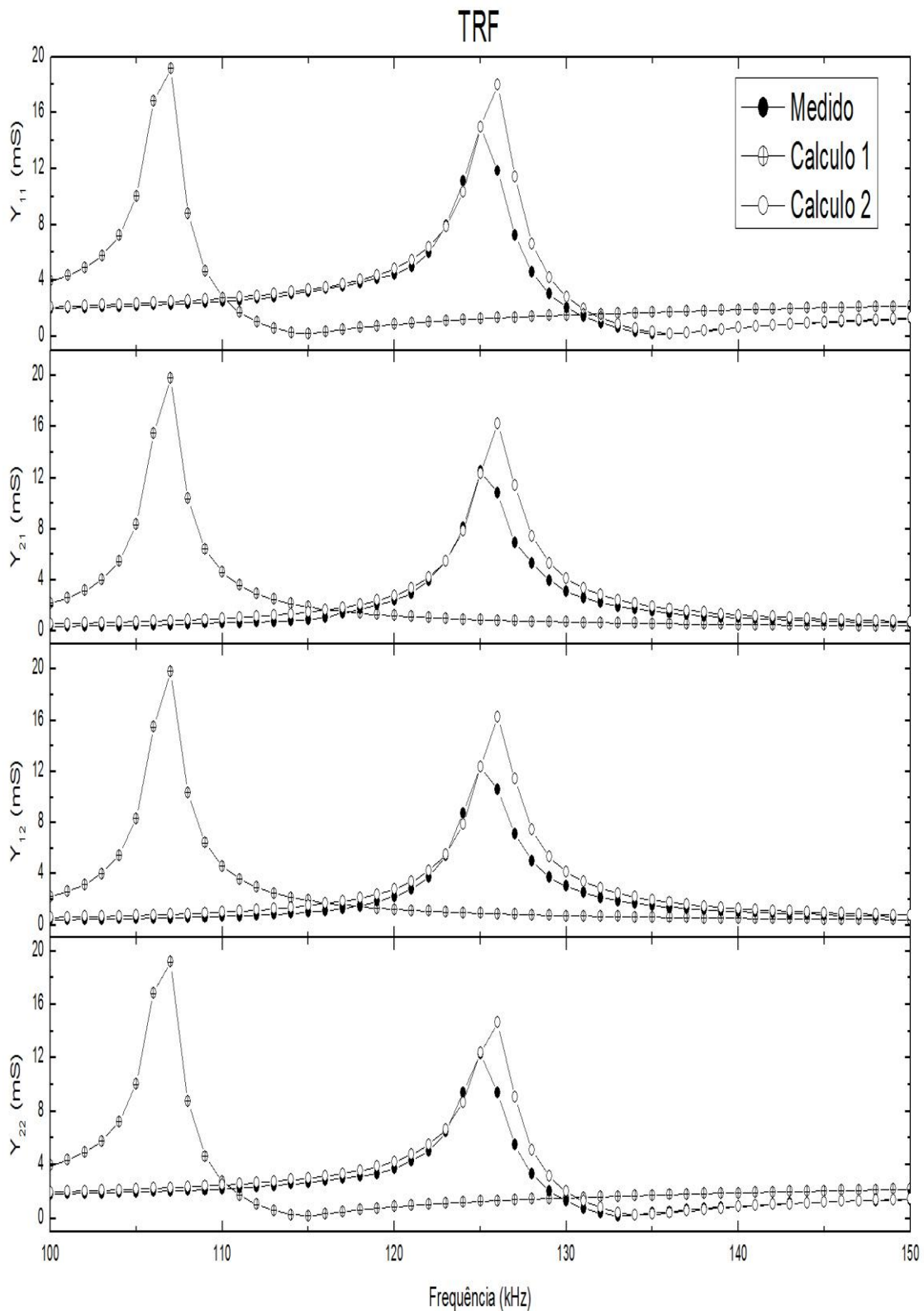
Em terceiro lugar, e talvez o mais relevante, são os erros intrínsecos ao modelo, que conforme reportado na literatura [17] acarreta em um desvio percentual de 10 % na frequência de ressonância dos transformadores.

#### *4.2.2. Parâmetros de Admitância*

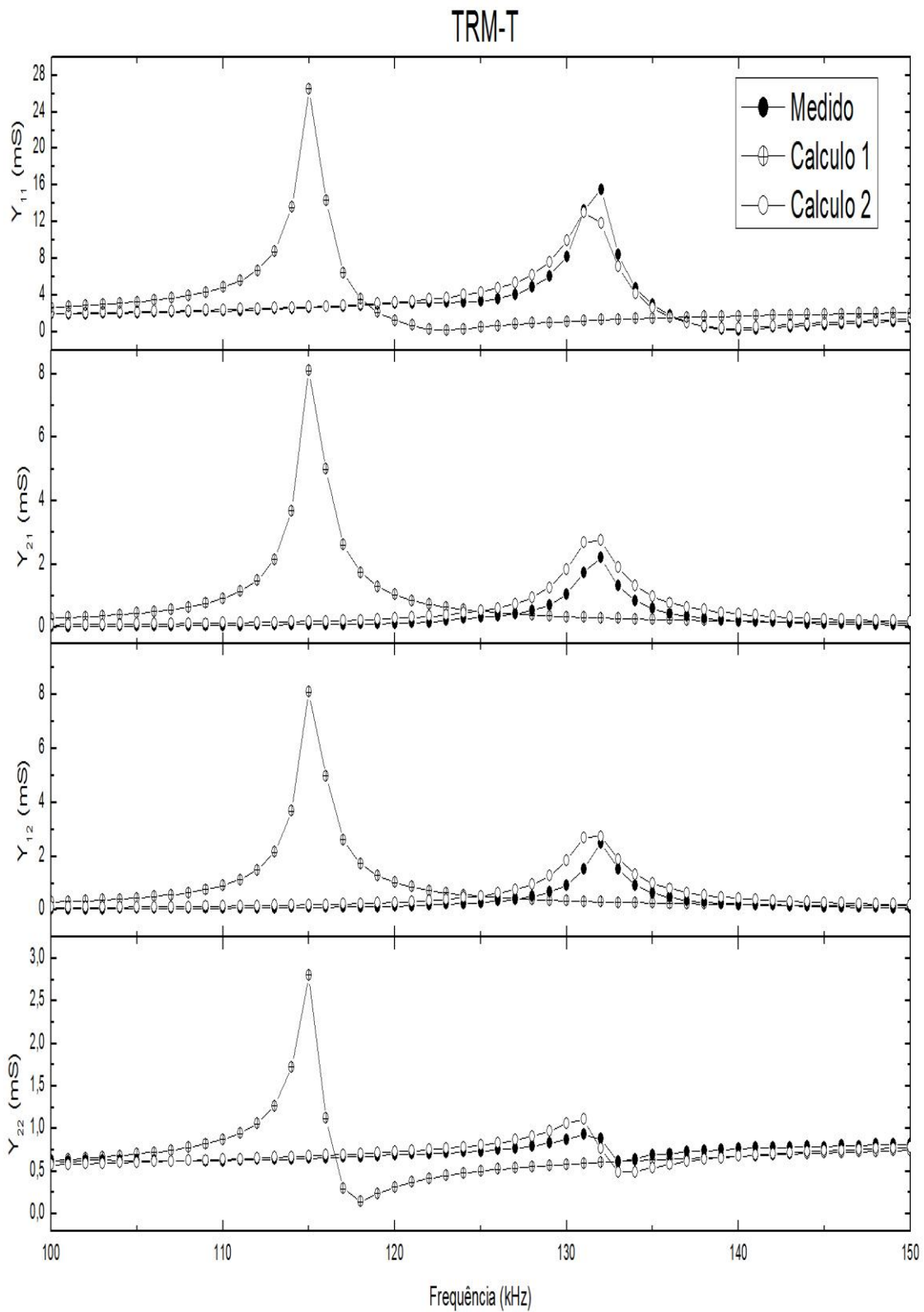
Os parâmetros de admitância referentes aos transformadores, TRF, TRM-T e TRM-A podem ser calculados com a utilização das equações (2.18) a (2.21). Essas equações dependem dos parâmetros do circuito equivalente, e foram calculadas de duas formas:

- 1) Na primeira delas utilizamos os parâmetros do circuito equivalente calculados pelas equações (2.7) a (2.12) os quais estão apresentadas na tabela 2. A este calculo demos o nome de calculo 1.
- 2) Na segunda utilizamos os parâmetros do circuito equivalente determinados experimentalmente pelo método do circulo de admitância, os quais estão apresentados na tabela 3. A este calculo demos o nome de calculo 2.

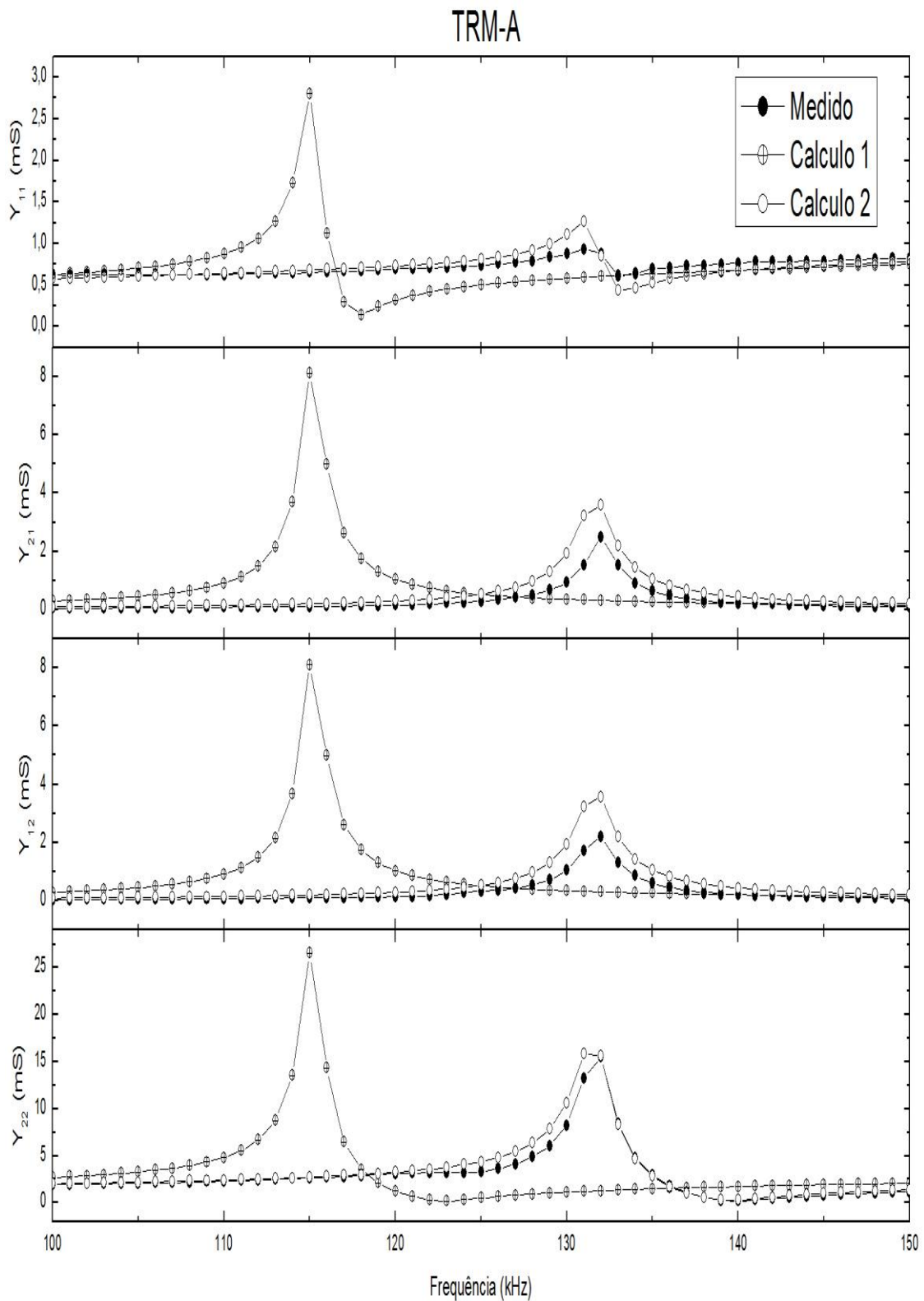
Por outro lado, os parâmetros de admitância podem ser determinados experimentalmente preparando a montagem experimental descrita na seção 3.2. Os resultados obtidos estão ilustrados nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16 que seguem abaixo.



**Figura 4.14:** Comparação entre os parâmetros de admitância determinados experimentalmente em temperatura ambiente (Medido), calculados com os parâmetros do circuito equivalente medidos pelo circulo de admitância (Calculo 2), e calculados com os parâmetros do circuito equivalente determinados pelas equações 2.7 a 2.12 (Calculo 1) para o transformador piezoelétrico TRF.



**Figura 4.15:** Comparação entre os parâmetros de admitância determinados experimentalmente em temperatura ambiente (Medido), calculados com os parâmetros do circuito equivalente medidos pelo circulo de admitância (Calculo 2), e calculados com os parâmetros do circuito equivalente determinados pelas equações 2.7 a 2.12 (Calculo 1) para o transformador piezoelétrico TRM-T.



**Figura 4.16:** Comparação entre os parâmetros de admitância determinados experimentalmente em temperatura ambiente (Medido), calculados com os parâmetros do circuito equivalente medidos pelo círculo de admitância (Calculo 2), e calculados com os parâmetros do circuito equivalente determinados pelas equações 2.7 a 2.12 (Calculo 1) para o transformador piezoelétrico TRM-T.

De posse dos parâmetros de admitância em função da frequência podemos fazer dois tipos de análise, um deles consiste na comparação entre os parâmetros de admitância medidos e calculados, o outro consiste na comparação dos parâmetros de admitância dos transformadores TRF, TRM-T e TRM-A.

As curvas dos parâmetros de admitância determinados pelo calculo 2 se ajustam melhor as curvas medidas, deste modo, para uma caracterização mais precisa é conveniente utilizar o calculo 2. Entretanto, apesar do calculo 1 apresentar um grande desvio na frequência de máxima admitância e no valor da máxima admitância, ele apresenta algumas vantagens. Com este calculo podemos fazer uma estimativa dos parâmetros de admitância antes de montar o transformador, podemos também, por meio de simulações computacionais, determinar as dimensões de um transformador de estado sólido de modo que ele apresente as características necessárias para uma determinada aplicação.

O grande desvio na frequência de máxima admitância que ocorre entre o calculo 1 e a medida é um erro intrínseco ao modelo teórico utilizado, esse erro é reportado na literatura como sendo em torno de 10 % [17], o mesmo observado nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16. O desvio no valor da máxima admitância que ocorre entre o calculo 1 e a medida é causado pelo acoplamento entre os elementos piezoelétricos, tendo em vista que o modelo teórico considera um acoplamento ideal e na confecção dos transformadores utilizados nesse trabalho, a lamínula de vidro utilizada como isolante elétrico amortece a vibração da rede cristalina das cerâmicas piezoelétricas, causando percas de energia, e conseqüentemente a redução do valor da admitância. Além disso, a própria cerâmicas pode apresentar percas de energia devido a imperfeições em sua rede cristalina, causando como conseqüência a redução da máxima admitância.

Quando comparamos as curvas de admitância dos transformadores TRF, TRM-T e TRM-A observamos que os valores da admitância para o TRF é, de um modo geral, maior, isto é, a impedância na frequência de ressonância é maior para o TRM-T e o TRM-A, isso implica dizer que esses transformadores apresentam maiores percas de energia. Este resultado tem como causa as diferentes propriedades das cerâmicas piezoelétricas PZT e BF-PT utilizados na confecção dos transformadores TRM-T e TRM-A, além do mais, essa redução da máxima admitância pode ter sido agravada pelo fato de que os dois elementos piezoelétricos utilizado na confecção desse transformador não possuem a mesma frequência de ressonância. Deste modo, uma possível alternativa para aumentarmos a máxima admitância, i.e. diminuir as percas de energia, é

confeccionarmos um transformador cujo elemento piezoelétrico BF-PT tenha o diâmetro 1.13 vezes maior que o elemento PZT, pois desta forma as frequências de ressonância dos dois elementos será a mesma.

#### *4.2.3. Ganho de Tensão e Eficiência*

Para finalizar o trabalho proposto nesta dissertação, iremos caracterizar o ganho de tensão e a eficiência dos transformadores de estado sólido TRM-T, TRM-A e TRF alimentando diferentes cargas ôhmicas.

O ganho de tensão e a eficiência em função da frequência foram determinados experimentalmente conforme a montagem experimental discutida no capítulo 3, seção 3.3. A diferença de potencial fornecida pelo gerador de sinais foi mantida com o valor constante de  $2 V_{\text{rms}}$ . As cargas de prova utilizadas são puramente resistivas, e possuem o valor de 50, 250, 500, 750, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 e 7000  $\Omega$ . Para cada uma das resistências de carga conectadas aos terminais de saída dos transformadores de estado sólido foi realizada uma varredura da frequência da diferença de potencial aplicada aos terminais de entrada dos transformadores. Desta forma obtivemos as curvas de ganho de tensão e eficiência em função da frequência, que estão ilustradas nas figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22.

Por outro lado, o ganho de tensão e a eficiência dos transformadores de estado sólido foram calculados conforme descrito no capítulo 2, seção 2.3. Esses valores foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, e estão ilustrados nas figuras 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22.

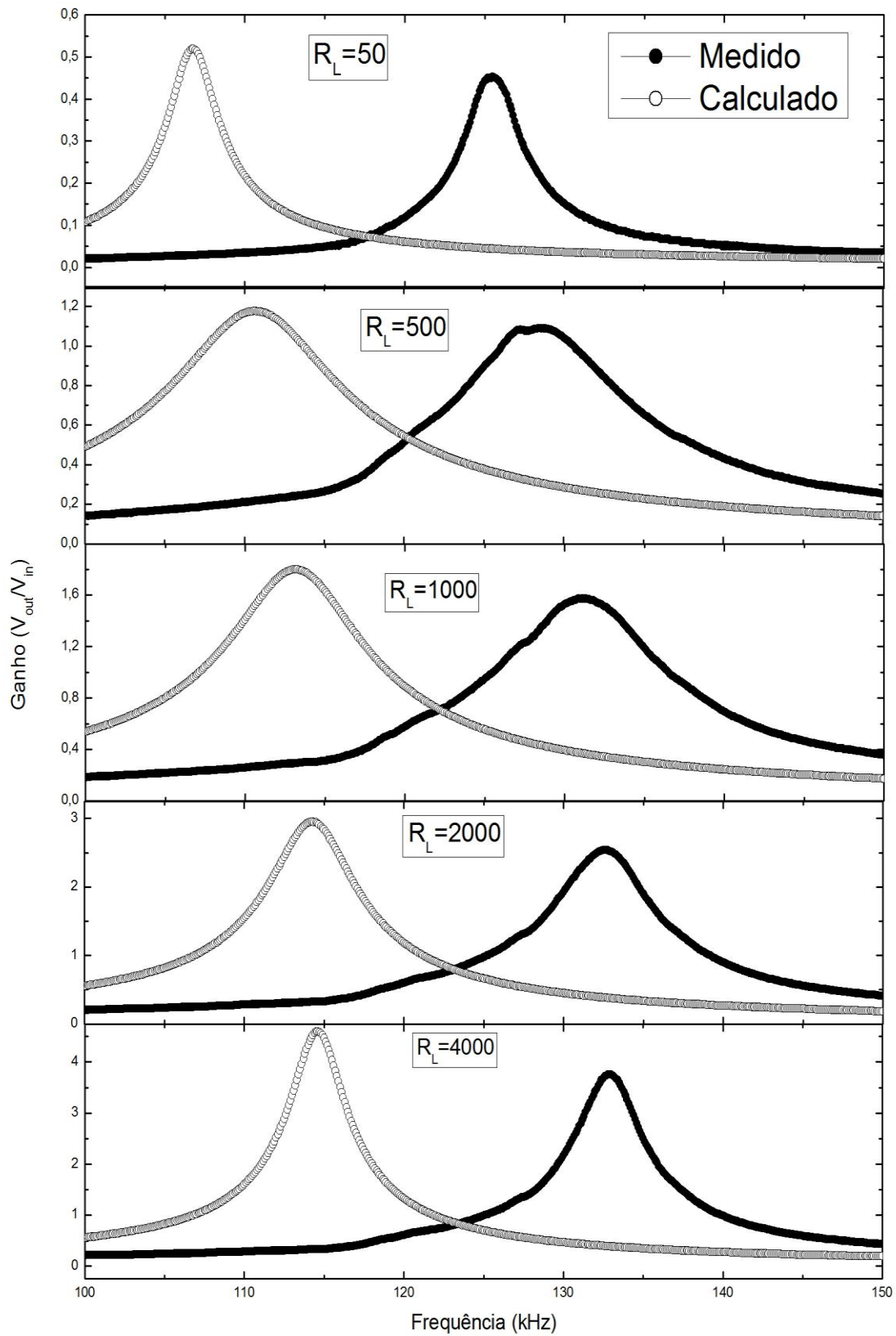
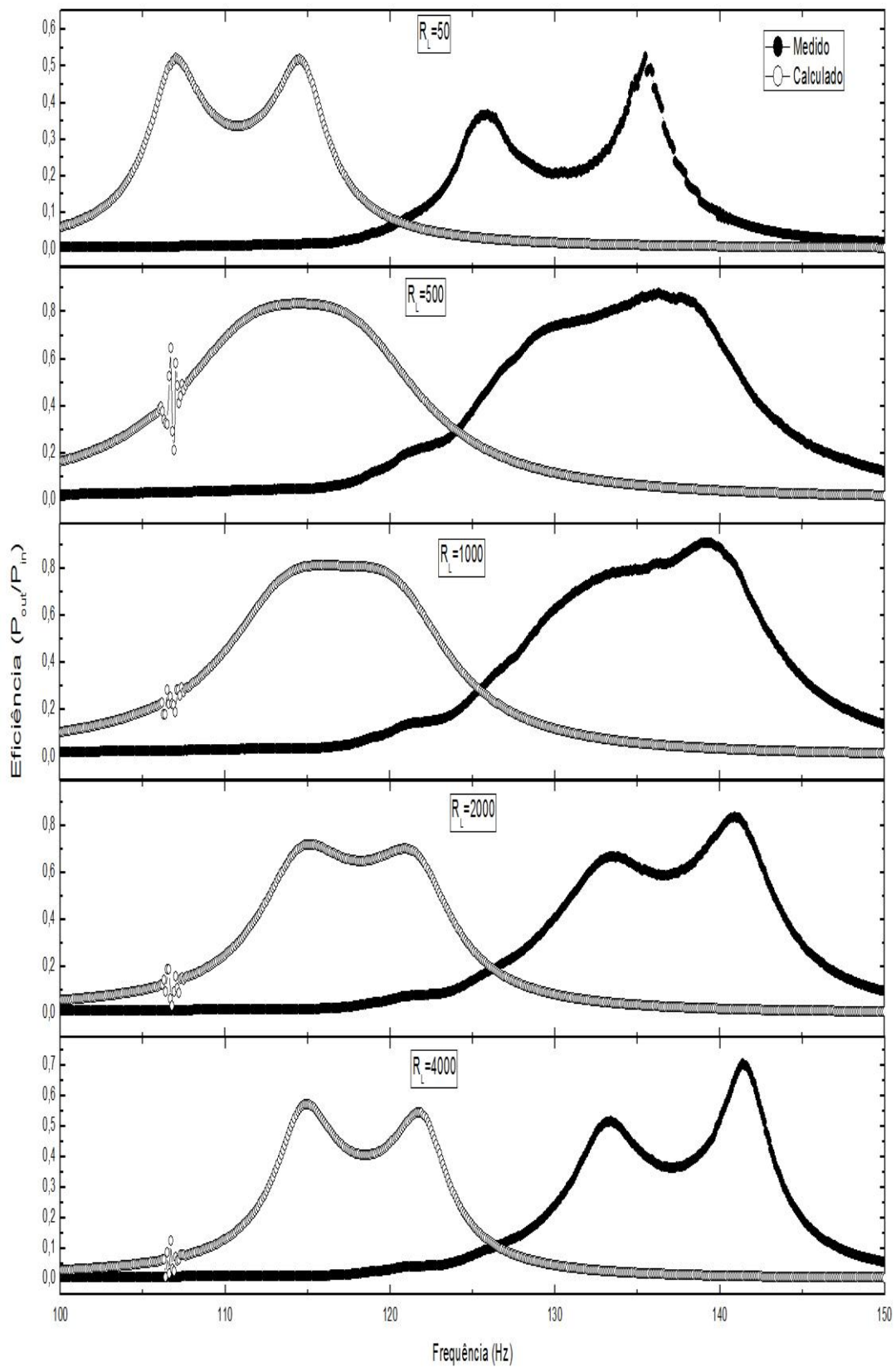
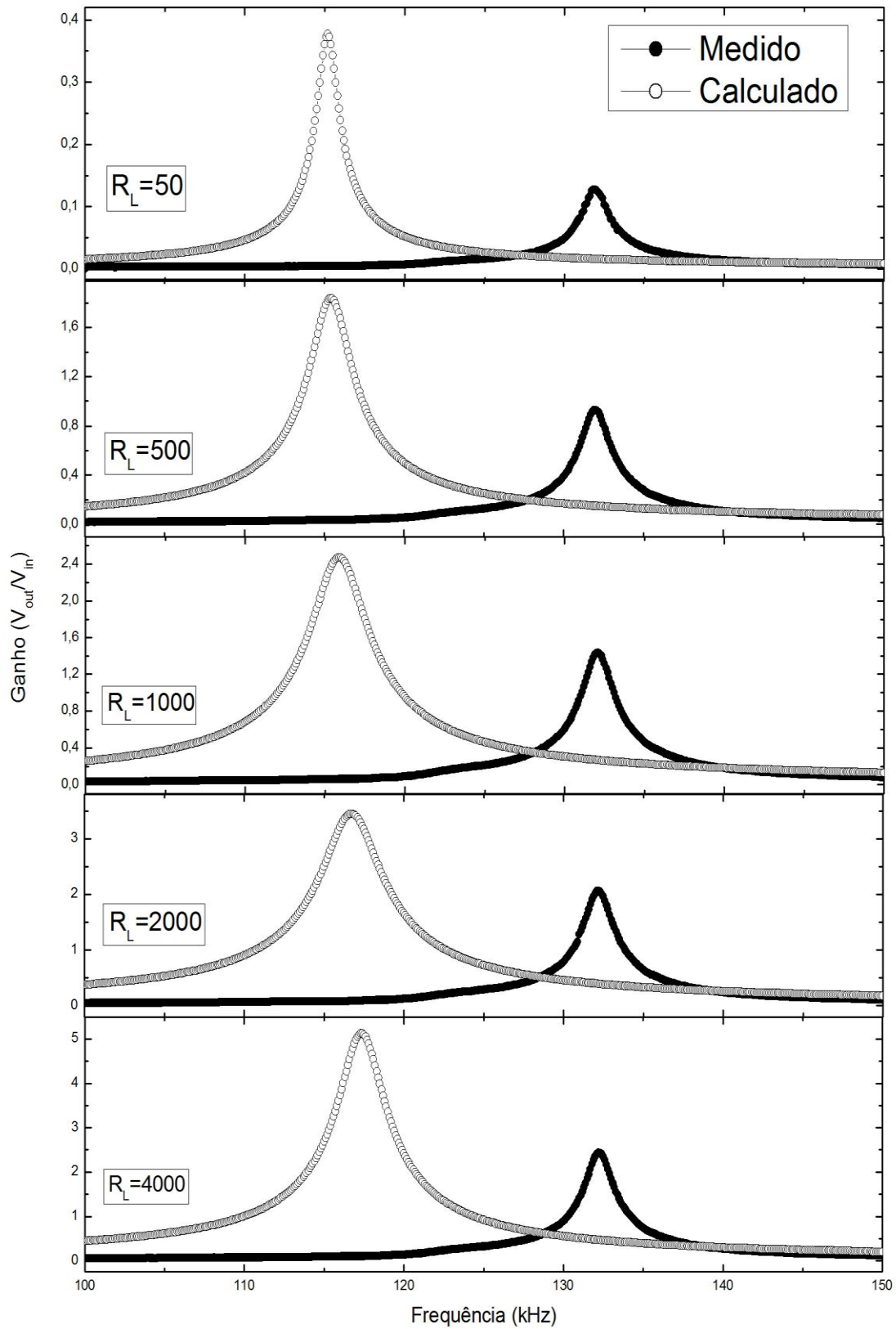


Figura 4.17: Ganho de tensão em função da frequência para o transformador TRF, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms.

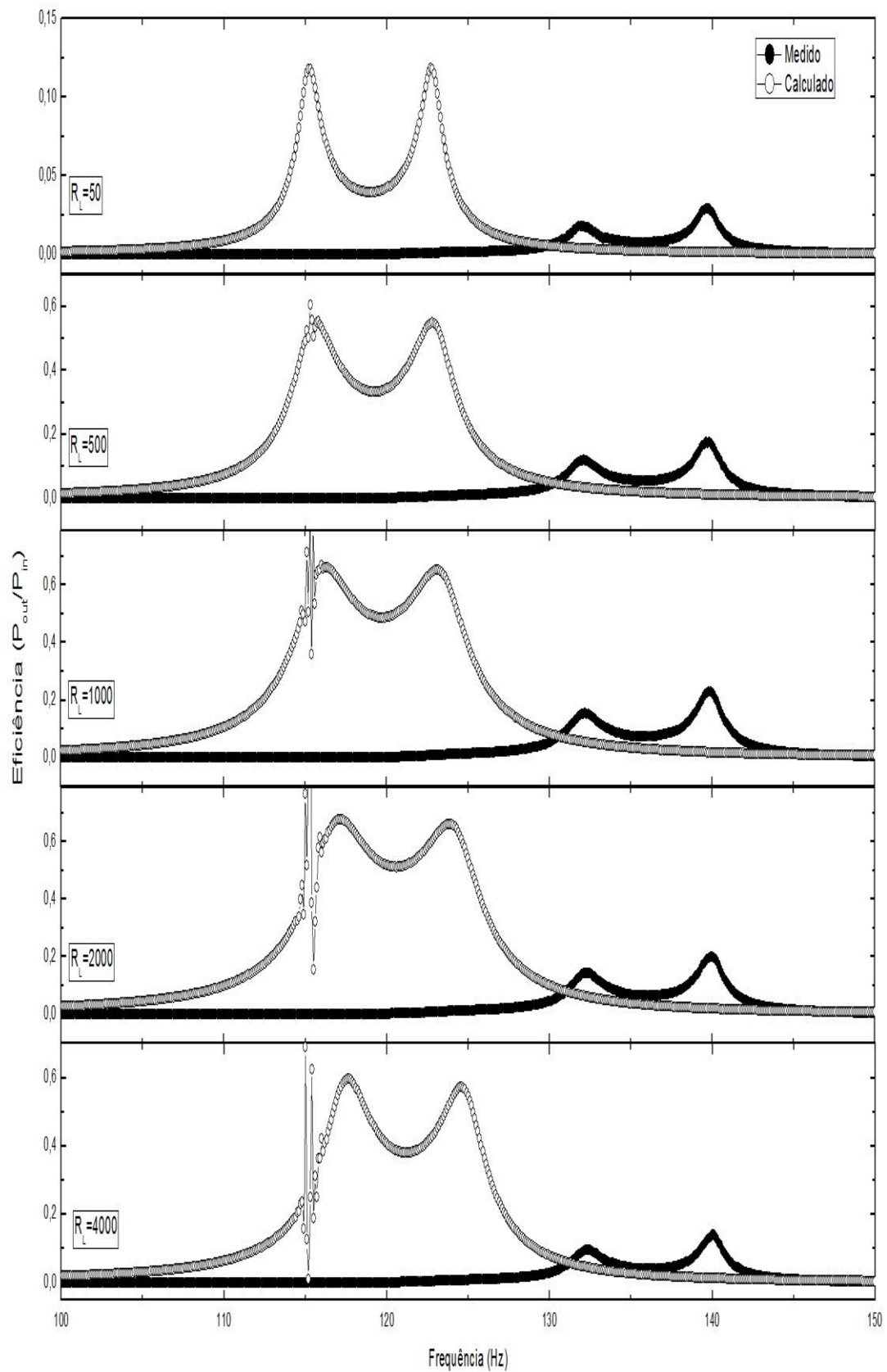


**Figura 4.18:** Eficiência em função da frequência para o transformador TRF, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms.

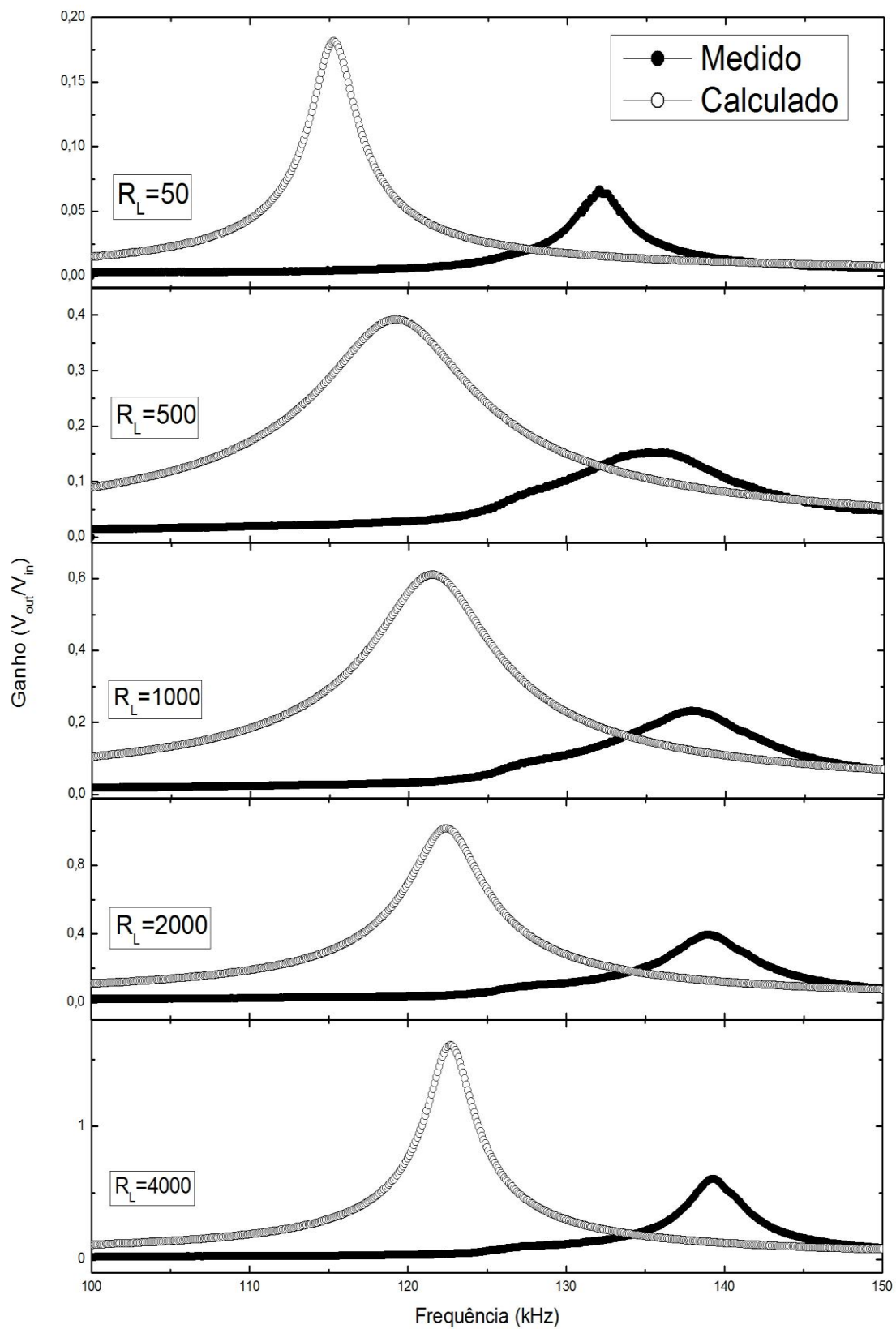




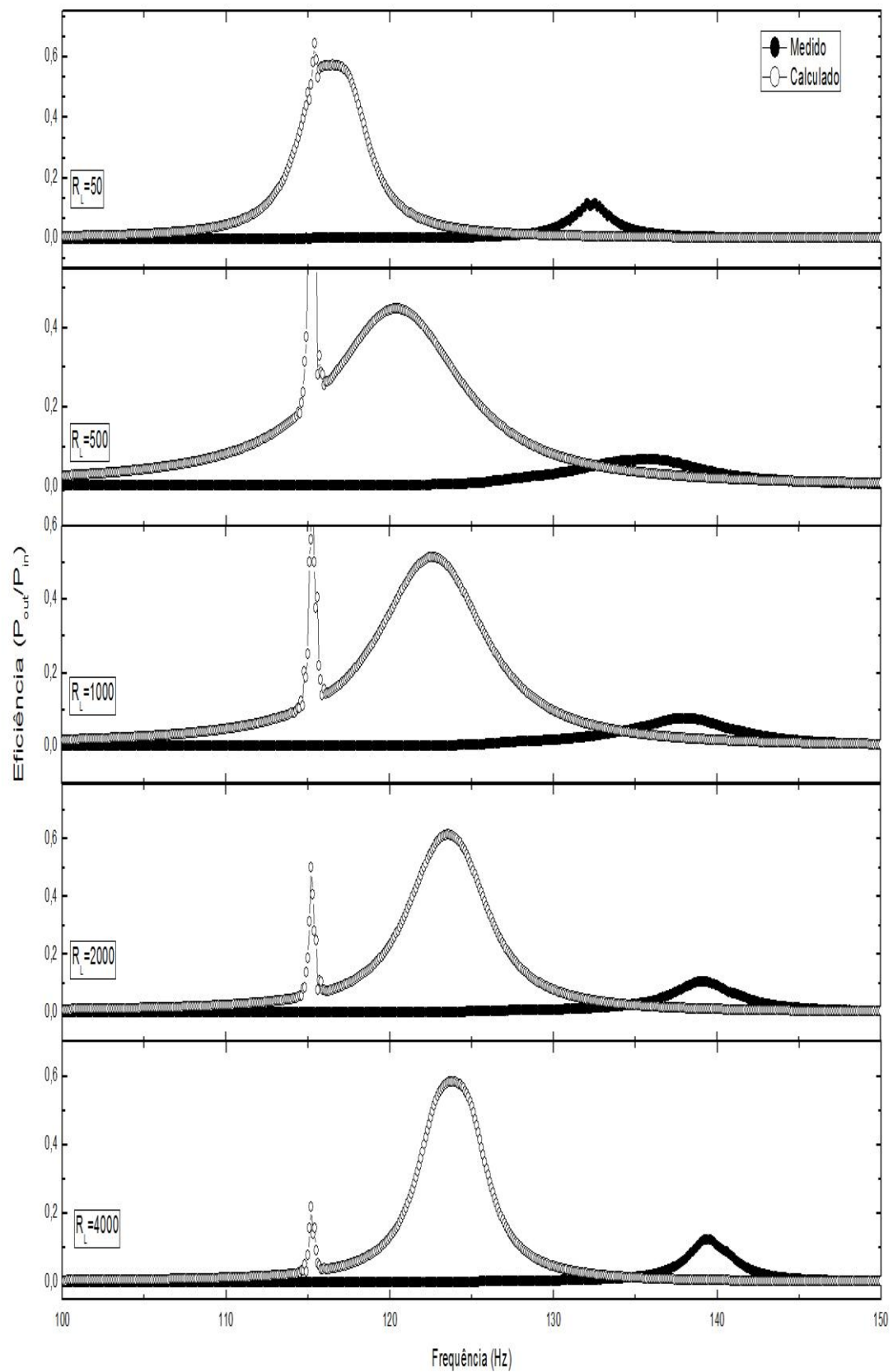
**Figura 4.19:** Ganho de tensão em função da frequência para o transformador TRM-T, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms.



**Figura 4.20: Eficiência em função da frequência para o transformador TRM-T, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms.**



**Figura 4.21:** Ganho de tensão em função da frequência para o transformador TRM-A, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms.

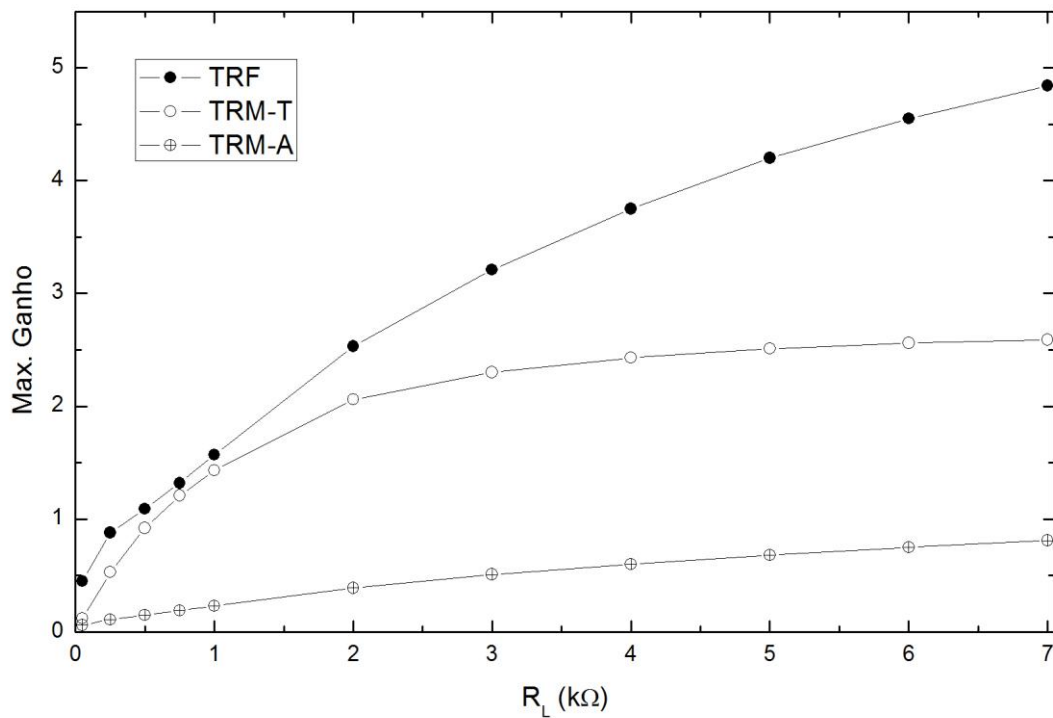


**Figura 4.22: Eficiência em função da frequência para o transformador TRM-A, a temperatura ambiente, conectado as cargas de prova de 50, 500, 1000, 2000 e 4000 Ohms.**

Nos gráficos de ganho de tensão e eficiência por frequência apresentados nas figuras 4.17 a 4.22, podemos observar que há uma grande discrepância dos valores de máximo ganho e máxima eficiência entre as curvas medidas e calculadas para os transformadores TRM-T e TRM-A. Acreditamos que esse erro é gerado pelo fato de que os elementos piezoelétricos utilizados na confecção desses transformadores não apresentam a mesma frequência de ressonância, isto é, o elemento piezoelétrico atuador possui uma frequência de ressonância diferente do elemento piezoelétrico transdutor. A frequência de ressonância dos elementos piezoelétricos atuador e transdutor podem ser “casadas” fazendo com que o elemento piezoelétrico BF-PT tenha o diâmetro 1.13 vezes maior que o elemento piezoelétrico PZT, porém, este estudo será deixado para trabalhos futuros. Por outro lado, a discrepância na frequência de máximo ganho e de máxima eficiência é intrínseco ao modelo teórico utilizado, e por esse motivo, não cabem aqui maiores discussões.

As curvas de eficiência em função da frequência para os transformadores TRF e TRM-T, ilustradas nas figuras 4.18 e 4.20, apresentaram dois picos distintos de máxima intensidade, sendo que um deles corresponde à frequência de máximo ganho de tensão (frequência de ressonância) e o outro corresponde à frequência de anti-ressonância. Para o transformador TRF esses dois picos de intensidade se fundem quando o transformador está conectado a cargas de 500 e 1000  $\Omega$ , criando dessa forma uma ampla faixa de frequências de alta eficiência. Por outro lado, o transformador TRM-A apresentou apenas um pico de intensidade, que corresponde à frequência de ressonância.

Ainda nos gráficos de tensão e eficiência por frequência (figuras 4.17 a 4.22) podemos observar que o ganho de tensão, a eficiência, e a frequência de máxima eficiência variam com a carga de prova conectada aos terminais de saída do transformador, deste modo, a comparação entre os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A pode ser melhor visualizada com a utilização de 3 gráficos: máximo ganho por carga de prova (figura 4.23), eficiência na frequência de ressonância por carga de prova (figura 4.24) e frequência de máximo ganho por carga de prova (figura 4.25).

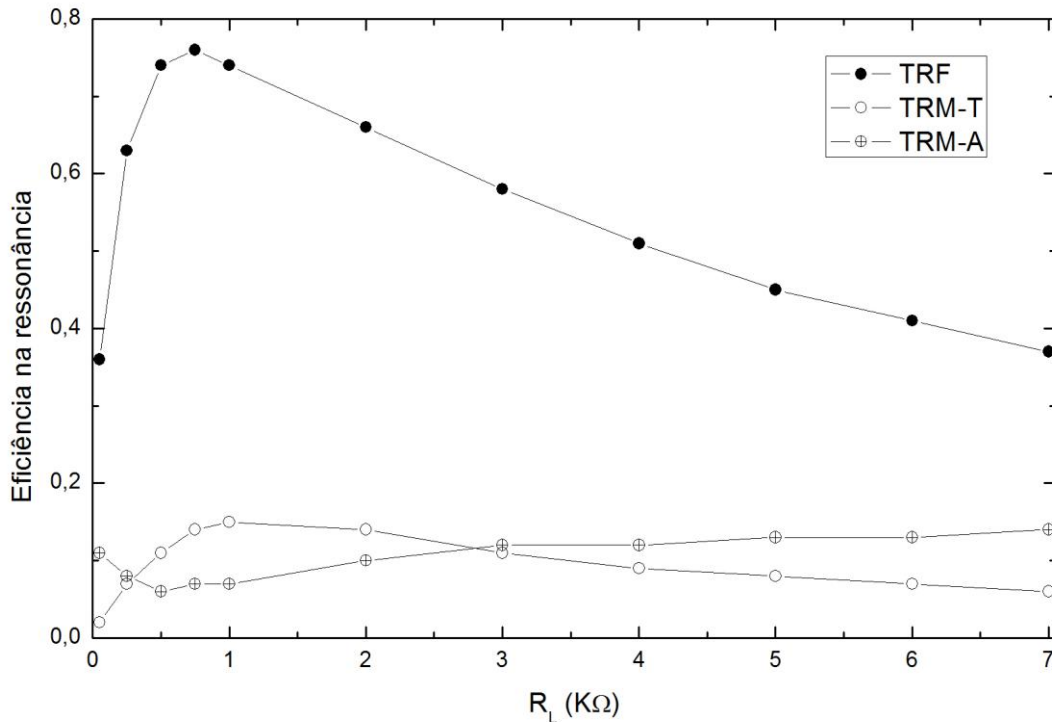


**Figura 4.23: Máximo ganho de tensão em função da resistência de prova para os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A.**

Conforme podemos observar na figura 4.26, o transformador TRF apresenta um ganho de tensão superior quando comparado com o transformador TRM. Também podemos observar que o transformador TRM que utiliza a cerâmica multiferroica de BF-PT como transdutor eletromecânico (TRM-T) apresenta um ganho de tensão superior ao transformador TRM que utiliza a cerâmica multiferroica de BF-PT como atuador eletromecânico (TRM-A). Podemos observar ainda que, para resistências de carga inferiores que 1  $k\Omega$ , os valores de máximo ganho de tensão dos transformadores TRF e TRM-T são aproximadamente iguais.

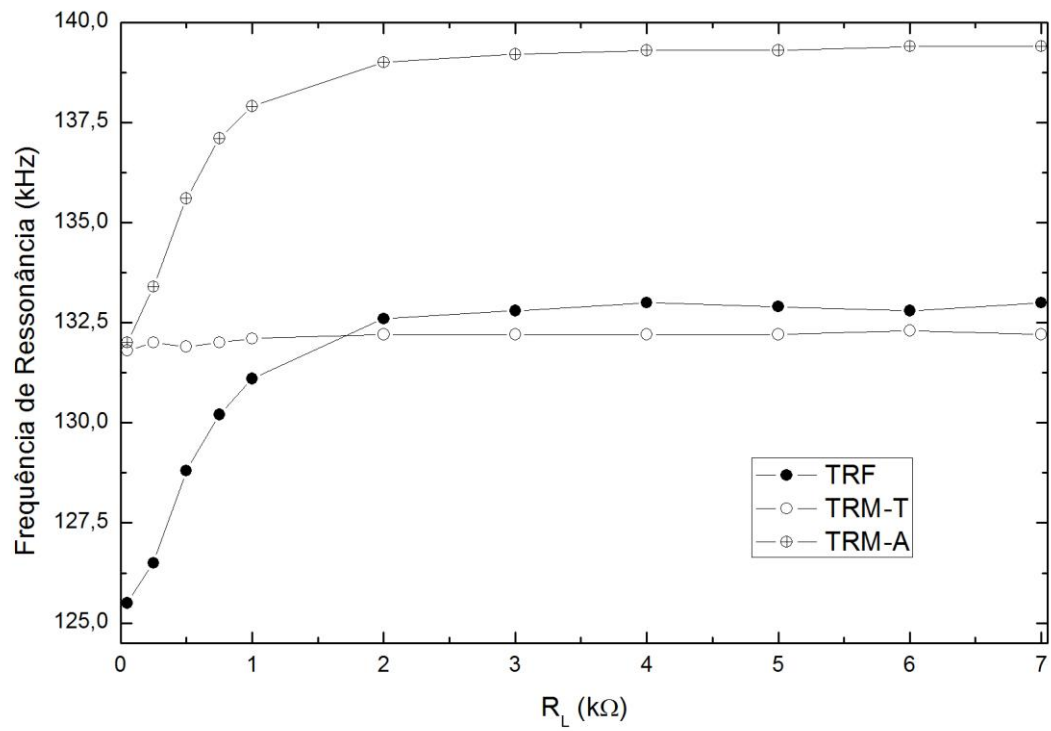
No gráfico de eficiência na frequência de ressonância versus carga de prova apresentada na figura abaixo (figura 4.27), podemos observar que a eficiência do transformador TRF é superior ao do transformador TRM, este fato pode ter como causa a diferença da frequência de ressonância entre os elementos piezoelétricos utilizados na confecção do transformador, conforme discutido anteriormente. Além disso, podemos ver claramente que o comportamento da eficiência na frequência de ressonância do transformador TRM que utiliza a cerâmica multiferroica BF-PT como atuador eletromecânico (TRM-A) apresenta um comportamento diferente do transformador TRF

e TRM que utiliza a cerâmica multiferroica BF-PT como transdutor eletromecânico (TRM-T). Segundo a literatura [8, 11, 17], a máxima eficiência ocorre quando a impedância de saída do transformador piezoelétrico ( $X_c = 1/\omega C_{d2}$ ) é igual à impedância da carga conectada aos terminais de saída do transformador. Este comportamento é coerente com as curvas TRF e TRM-T apresentadas na figura 4.27, mas difere para o transformador TRM que utiliza a cerâmica de BF-PT como atuador eletromecânico.



**Figura 4.24: Máxima eficiência em função da resistência de prova para os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A.**

Por fim, podemos observar na figura 4.28, que o transformador TRM que utiliza a cerâmica multiferroica de BF-PT como transdutor eletromecânico (TRM-T), apresenta um comportamento diferente dos transformadores TRF e TRM-A. Segundo a literatura [8, 11, 17], a frequência de ressonância dos transformadores piezoelétricos varia com a resistência de carga acoplada aos terminais de saída do transformador, conforme podemos observar nas curvas de frequência de ressonância versus resistência de carga para os transformadores TRM-A e TRF (figura 4.28), entretanto, para o transformador TRM-T, a frequência de ressonância é invariante perante a resistência de carga.



**Figura 4.25: Frequência de ressonância em função da resistência de prova para os transformadores TRF, TRM-T e TRM-A.**



## 5. CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos neste trabalho indicaram que a utilização de cerâmicas multiferroicas do composto  $(0.6)\text{BiFeO}_3-(0.4)\text{PbTiO}_3$  em transformadores de estado sólido, do tipo monocamada e de modo de vibração radial, é plenamente viável. Suas características de funcionamento são semelhantes às dos transformadores de estado sólido formados por cerâmicas piezoelétricas de PZT-5A, que são as largamente utilizadas na fabricação desses dispositivos.

A análise do ganho de tensão dos transformadores radiais multiferroicos (TRM) mostrou que o transformador TRM-T pode ser utilizado em aplicações que visam a elevação da tensão elétrica, enquanto que o transformador TRM-A se adapta melhor em aplicações que visam a redução da tensão elétrica. A eficiência dos transformadores TRM apresentou valores bem inferiores quando comparada com o transformador TRF. Entretanto, essa desvantagem é compensada pelas novas perspectivas de funcionalidades dos transformadores multiferroicos. Essas novas perspectivas de funcionalidade são decorrentes do acoplamento magnetoelétrico existente nas cerâmicas multiferroicas de BF-PT. Deste modo, caracterizar o ganho de tensão e a eficiência dos transformadores TRM submetidos à aplicação de campos magnéticos externos deve ser a principal frente de pesquisa a ser desenvolvida nesses sistemas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. L. Lin, F. C. Lee, E. M. Baker, e D. Y. Chen. Inductor-less piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp. IEEE APEC`01Rec., 2001, pp. 664-669.
- [2] H. Kakedhashi, T. Hidaka, T. Ninomiya, M. Shoyama, H. Ogasawara, e Y. Ohta. Electronic ballast using piezoelectric transformers for fluorescent lamps. IEEE PESC`98 Rec., pp29-35.
- [3] T. Zaitso, Y. Fuda, Y. Okabe, T. Ninomiya, S. Hamamura, e M. Katsuno. New piezoelectric transformer converter for ac adapter. IEEE APEC`97 Rec., pp. 568-572.
- [4] J. Navas, T. Bove, J. A. Cobos, F. Nuno, e K. Brebol. Miniaturised battery charge using piezoelectric transformers. in IEEE APEC`01 Rec., 2001, pp. 492-496.
- [5] Shuxiang Dong, Jie-Fang Li, e D. Viehland. Magnetolectric coupling, efficiency, and voltage gain effect in piezoelectric-piezomagnetic laminate composites. Journal of materials science`06 Rec., 2006, pp. 97-106.
- [6] G. Ivensky, S. Bronstein, e S. Ben-Yaakov. A comparison of piezoelectric transformer AC/DC converters with current doubler and voltage doubler rectifiers. IEEE transactions on power electronics, vol. 19, Nº 6, November 2004.
- [6] B. Jaffe, W. R. Cook Jr., and H. Jaffe (1971). Piezoelectric ceramics. New York: Academic press inc., 1971. 317p.
- [7] T. Ikeda (1984). Fundamentals of piezoelectricity. New York: Oxford university press, 1990. 263p.
- [8] R. L. Lin. Piezoelectric transformer characterization and application of electronic ballast. 2001. 160f. Tese (Doutorado em Electrical Engineering) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 2001.
- [9] R. Bechmann, and I. E. Fair, “Standard definitions and methods of measurement for piezoelectric vibrators,” in IEEE ANSI 176. 1970, pp. 1-12.
- [10] D. Halliday, R. Resnick, e J. Walker. Fundamentos de física: Eletromagnetismo. São Paulo: LTC, 2007. 376p.
- [11] W. Huang. Design of a radial mode piezoelectric transformer for a charge pump electronic ballast with high power factor and zero voltage switching. 2003. 58f. Dissertação (Master of science in Electrical Engineering) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 2003.

- [12] Face International Corp., Norfolk, VA, (US). Clark Davis Boyd. Multilayer Piezoelectric Transformer. United Estate Patent n. US 6346764 BI, 2002 Feb. 10.
- [13] Face International Corp., Norfolk, VA, (US). Richard P. Bishop. Multilayer Piezoelectric Transformer. United Estate Patent n. 5834882, 1998 Nov. 12.
- [14] R. L. Boylestad (1972). Electronic devices and circuit theory. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1999.
- [15] M. M. Silva (1995). Introdução aos circuitos eléctricos e electrónicos. Lisboa: Fundação calouste gulbenkian, 2001.
- [16] A. M. V. Cipelli, W. J. Sandrini. Teoria e desenvolvimento de projetos de circuitos eletrônicos. São Paulo: Érica, 1979.
- [17] C. Y. Lin. Design and analysis of piezoelectric transformer converters. 1997. 192f. Tese ((Doutorado em Electrical Engineering) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 1997.
- [18] J.P. Rivera e H. Schmid. Piezoelectric measurements of Ni-I boracite by the technique of admittance circle and motional capacitance. G. W. Taylor, ed., Piezoelectricity. NY: Gordon and Breach Science Publishers, 1985.
- [19] Berlincourt, D..K.H.H.A.. N. C. Morgan Electro ceramics. Disponível em: <http://www.morganelectroceramics.com/pdfs/tp226.pdf>. Acessado em: 20 set. 2010.
- [20] V. F. Freitas, I. A. Santos, E. Botero, B. M. Fraygola, D. Garcia, J. A. Eiras. Piezoelectric characterization of (0.6) BiFeO<sub>3</sub>-(0.4) PbTiO<sub>3</sub> multiferroic ceramics. The american ceramic society. 2010, pp. 1-5.