



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

FERNANDO JOSÉ GAIOTTO

DESIGN DE TRANSFORMADORES CERÂMICOS PIEZOELÉTRICOS E APLICAÇÕES

Orientador: Ivair A. dos Santos

Co-Orientador: José Roberto D. Pereira

Dissertação de mestrado apresentada à
Universidade Estadual de Maringá para a
obtenção do título de mestre em Física.

Maringá, Junho/2012

Fernando José Gaiotto

**DESIGN DE TRANSFORMADORES CERÂMICOS
PIEZOELÉTRICOS E APLICAÇÕES**

Dissertação de mestrado apresentada à
Universidade Estadual de Maringá para a
obtenção do título de mestre em Física.

Orientador: Ivair A. dos Santos

Co-Orientador: José Roberto D. Pereira

Maringá, Junho/2012

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que me proporcionou caminhos que me levassem a esta realização.

Aos professores Dr. José Roberto Dias Pereira e Dr. Ivair A. Santos pelo apoio, amizade, orientação e paciência ao longo deste trabalho.

Ao Msc. Diogo Zampieri Montanher, por dividir comigo seus conhecimentos e suas experiências no dia a dia do laboratório.

À minha esposa Juliana S. Gaiotto pelos momentos de apoio e pela compreensão incondicional!

A toda minha família por momentos de incentivo e descontração.

Agradecimentos especiais aos os colegas de turma Msc. Danilo L. Degan, Msc. Otávio A. Protzek e Msc. Aline Milan Farias pelo estudo em grupo.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

Sumário

RESUMO	9
ABSTRACT	10
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	11
1. 1 MOTIVAÇÃO	11
1. 2 – HISTÓRICO	12
1. 3 – PIEZELETRICIDADE.....	14
1. 3.1 – MODELAGEM BÁSICA DOS TRANSFORMADOR CERÂMICOS	15
1. 4 – OS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	17
CAPÍTULO 2 – DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	20
2. 1 – POLARIDADE E EFEITO PIEZOELÉTRICO	21
2. 2 - FORMAS E MODOS DE VIBRAÇÃO DE UMA CERÂMICA	22
2.2. 1 – MODO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL (COMPRIMENTO).....	24
2.2. 2 – MODO DE ESPESSURA	24
2.2. 3 – MODO DE ESPESSURA CISALHAMENTO.....	25
2. 3 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM NA CERÂMICA	25
2. 4 – ESTRUTURAS MULTICAMADAS.....	29
CAPÍTULO 3 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR PIEZOELETRICO	30
3. 1 – CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO PARA UM ELEMENTO PIEZOELÉTRICO (1ª ABORDAGEM).....	30
3.1. 1 – MODO PIEZOELETRICO LONGITUDINAL	31
3.1. 3 – REPRESENTAÇÕES DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA UM ELEMENTO PIEZOELÉTRICO	31
3. 2 – CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO PARA UM TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO.....	32
3.2. 1 – O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO TIPO ROSEN.....	33
3.2. 2 – TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO MODO DE ESPESSURA	34
3. 3 – EQUAÇÕES CARACTERÍSTICAS DO CIRCUITO EQUIVALENTE TP MODO RADIAL	40
3.3. 1 - ANÁLISE DE DESEMPENHO DO TPS MODO RADIAL	42
3.4 – PARAMETROS DO CICUITO EQUIVALENTE.....	45

3.5 – CIRCUITO ELÉTRICO DE UM REATOR DE CARGA VARIÁVEL	49
CAPÍTULO 4 – CONSTRUÇÕES DOS PROTOTÍPOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	50
4.1 – CONSTRUÇÃO DO DISPOSITIVO PROTÓTIPO	50
4.2 – TIPOS DE PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS.....	51
CAPÍTULO 5 – MEDIDAS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS SIMULADOS	54
5.1 - EQUIPAMENTOS E AQUISIÇÃO DOS DADOS	54
5.2 - MEDIDAS EXPERIMENTAIS DOS PARÂMETROS DAS CERÂMICAS	56
5.3 - CONSTATAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE.....	58
5.4 - CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO PARA O TP PZT5A – TIPO DISCO.....	60
5.5 - CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO PARA O TP PZT5A – QUADRADO	66
5.6 - CURVAS DE CARACTERIZAÇÃO PARA O TP PZT4 – TIPO DISCO COM FURO NO CENTRO.	68
5.7 - ANÁLISE DO GANHO DOS TPS PARA CARGAS RESISTIVAS.....	75
5.8 - APLICAÇÕES DE TP PARA REATORES DE LÂMPADAS FLUORESCENTES	79
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA	88

Lista de Figuras

<i>FIGURA 1. 1: CÉLULA NEUTRA.</i>	14
<i>FIGURA 1. 2: TENSÃO MECÂNICA APLICADA</i>	14
<i>FIGURA 1. 3: DOIS ELETRODOS DEPOSITADOS SOBRE A CERÂMICA DE MATERIAL PIEZOELÉTRICO.</i>	15
<i>FIGURA 1. 4: TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO DE ROSEN.</i>	16
<i>FIGURA 1. 5: DIAGRAMA DO TRANSFORMADOR ELÉTRICO DE MODO ESPESSURA, DESENVOLVIDO PELA NEC JAPONESA POR VOLTA DE 1990.</i>	17
<i>FIGURA 1. 6: TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO DE MODO RADIAL. DESENVOLVIDO EM 1998 PELA FACE ELETRONICS USA.</i>	17
<i>FIGURA 2. 1: RELAÇÃO DE CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS DE DIFERENTES FORMAS GEOMÉTICAS. FONTE: ADAPTADA DE CHANNEL INDUSTRIES INC [24].</i>	23
<i>FIGURA 2. 2: MODO DE VIBRAÇÃO TRANSVERSAL.</i>	24
<i>FIGURA 2. 3: VIBRAÇÃO EM MODO DE ESPESSURA.</i>	24
<i>FIGURA 2. 4: MODO DE VIBRAÇÃO POR ESPESSURA.</i>	25
<i>FIGURA 2. 5: A) EMPILHAMENTO MULTICAMADAS TIPO X. B) TIPO Y.</i>	29
<i>FIGURA 3. 1: ELEMENTO DE MATERIAL PIEZOELÉTRICO.</i>	30
<i>FIGURA 3. 2: ELEMENTO PIEZOELÉTRICO EM MODO LONGITUDINAL</i>	31
<i>FIGURA 3. 3: ELEMENTO PIEZOELÉTRICO E O SEU CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO.</i>	32
<i>FIGURA 3. 4: PROCESSO DE OBTENÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO DO TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO, A PARTIR DOS CIRCUITOS EQUIVALENTE DE DOIS ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS SEPARADOS.</i>	33
<i>FIGURA 3. 5: O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO DE ROSEN.</i>	33
<i>FIGURA 3. 6: O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO DE MODO DE ESPESSURA.</i>	34
<i>FIGURA 3. 7: O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO DE MODO RADIAL.</i>	35
<i>FIGURA 3. 8: O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO DE MODO RADIAL, DIVIDIDO EM ATUADOR E TRANSDUTOR.</i> 35	
<i>FIGURA 3. 9: (A) DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM ELEMENTO PIEZOELÉTRICO ATUADOR. (B) DIAGRAMA ELÉTRICO DE UM ELEMENTO PIEZOELÉTRICO TRANSDUTOR.</i>	36
<i>FIGURA 3. 10: PROCESSO DE DERIVAÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA TP EM MODO RADIAL DE VIBRAÇÃO.</i>	36
<i>FIGURA 3. 11: CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO DO TRANSFORMADOR DE MODO RADIAL.</i>	38
<i>FIGURA 3. 12: CIRCUITO EQUIVALENTE.</i>	40
<i>FIGURA 3. 13: CIRCUITO EQUIVALENTE CONVENCIONAL DE TRANSFORMADOR.</i>	41
<i>FIGURA 3. 14: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA TPS MULTICAMADAS.</i>	42
<i>FIGURA 3. 15: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O TP COM SECUNDÁRIO REFLETINDO NO LADO PRIMÁRIO.</i>	42
<i>FIGURA 3. 16: CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O TP COM A TRANSFORMAÇÃO DA LIGAÇÃO PARALELA EM SÉRIE.</i>	43
<i>FIGURA 3. 17: CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO DO TRANSFORMADOR DE MODO RADIAL COM SAÍDA EM CURTO CIRCUITO.</i>	45
<i>FIGURA 3. 18: CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO DO TRANSFORMADOR DE MODO RADIAL NO PROCEDIMENTO DE CARACTERIZAÇÃO PASSO 2.</i>	45
<i>FIGURA 3. 19: CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO REDUZIDO PELO PASSO 1(A) E PELO PASSO 2(B).</i>	46
<i>FIGURA 3. 20: CIRCULO DE ADMITÂNCIA.</i>	47
<i>FIGURA 3. 21: REATORES ELETRÔNICOS CONVENCIONAIS (TRAFÓ MAGNÉTICO);</i>	49
<i>FIGURA 4. 1: ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS PZT-4 E PZT-5A.</i>	50
<i>FIGURA 4. 2: TP 1.1 I C V – TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO PZT5A 1:2 ISOLADO COM VIDRO E ELETRODO EM PARALELO.</i>	51
<i>FIGURA 4. 3: TP 1.1 I C V - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO 1:1 ISOLADO COM VIDRO, CERÂMICA PZT5A, QUADRADA (20 MM X 20 MM).</i>	52
<i>FIGURA 4. 4: TP 1.2 I C V Q - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO 1:2 ISOLADO COM VIDRO, CERÂMICA PZT5A, QUADRADA (20 MM X 20 MM).</i>	52
<i>FIGURA 4. 5: TP 1.1 I C V - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO PZT4 - 1:1 ISOLADO COM VIDRO.</i>	53
<i>FIGURA 4. 6: ELEMENTOS DE PZT4 COM 45 MM DE DIÂMETRO EXTERNO, 15 MM DIÂMETRO INTERNO E 5 MM ESPESSURA. ELETRODO PARALELO, TAMBÉM CONHECIDO COMO DISC WITH HOLE.</i>	53
<i>FIGURA 4. 7: TP 1.2 I C V - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO PZT4 - 1:2 ISOLADO COM VIDRO, DUAS CAMADAS COMO ATUADOR E UMA COMO TRANSDUTOR, TIPO RADIAL.</i>	53

FIGURA 4. 1: ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS PZT-4 E PZT-5A.	50
FIGURA 4. 2: TP 1.1 I C V – TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO PZT5A 1:2 ISOLADO COM VIDRO E ELETRODO EM PARALELO.	51
FIGURA 4. 3: TP 1.1 I C V - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO 1:1 ISOLADO COM VIDRO, CERÂMICA PZT5A, QUADRADA (20 MM X 20 MM).	52
FIGURA 4. 4: TP 1.2 I C V Q - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO 1:2 ISOLADO COM VIDRO, CERÂMICA PZT5A, QUADRADA (20 MM X 20 MM).	52
FIGURA 4. 5: TP 1.1 I C V - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO PZT4 - 1:1 ISOLADO COM VIDRO.	53
FIGURA 4. 6: ELEMENTOS DE PZT4 COM 45 MM DE DIÂMETRO EXTERNO, 15 MM DIÂMETRO INTERNO E 5 MM ESPESSURA. ELETRODO PARALELO, TAMBÉM CONHECIDO COMO DISC WITH HOLE.	53
FIGURA 4. 7: TP 1.2 I C V - TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO PZT4 - 1:2 ISOLADO COM VIDRO, DUAS CAMADAS COMO ATUADOR E UMA COMO TRANSDUTOR, TIPO RADIAL.	53
FIGURA 5. 1: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISPOSIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E CONEXÕES.	54
FIGURA 5. 2: PROGRAMA DE LEITURA E AQUISIÇÃO DOS DADOS NO DELPHI.	55
FIGURA 5. 3: SOFTWARE SIMULADOR DOS TRANSFORMADORES CERÂMICOS.	56
FIGURA 5. 4: CURVA DO MÓDULO DE ADMITÂNCIA VERSUS FREQUÊNCIA DO ELEMENTO CERÂMICO PIEZOELÉTRICO (ATUADOR) PZT 5A.	57
FIGURA 5. 5: CURVA DO MÓDULO IMPEDÂNCIA VERSUS FREQUÊNCIA DO ELEMENTO CERÂMICO PIEZOELÉTRICO (ATUADOR) PZT 5A.	57
FIGURA 5. 6: CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO PARA O TP 1.0 I C V, DUAS CAMADA COMO ATUADOR E UMA COMO TRANSDUTOR DE PZT 5A.	58
FIGURA 5. 7: CÍRCULO DE ADMITÂNCIA REFERENTE AO ELEMENTO PZT 4, LADO PRIMÁRIO (DUAS CAMADAS) E O SECUNDÁRIO (UMA CAMADA) EM CURTO.	58
FIGURA 5. 8: CÍRCULO DE ADMITÂNCIA REFERENTE AO ELEMENTO PZT 4, LADO PRIMÁRIO (DUAS CAMADAS) E O SECUNDÁRIO (UMA CAMADA) EM CURTO.	59
FIGURA 5. 9: CIRCUITO EQUIVALENTE SIMULADO PELO PROGRAMA SIMULADOR DOS TRANSFORMADORES PARA O TP PZT4 1:2.	60
FIGURA 5. 10: CURVA DA FREQUÊNCIA VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	60
FIGURA 5. 11: CURVA DA EFICIÊNCIA VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	61
FIGURA 5. 12: CURVAS DA EFICIÊNCIA VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	62
FIGURA 5. 13: CURVAS DO GANHO DE TENSÃO VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	62
FIGURA 5. 14: CURVA DA POTÊNCIA DE SAÍDA VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	63
FIGURA 5. 15: CURVAS CONFRONTANDO O GANHO DE TENSÃO VERSUS FREQUÊNCIA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1) E PARA UM TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM DUAS CAMADAS COMO ATUADOR (1:2) E RESISTÊNCIA DE CARGA FIXA 400Ω.	64
FIGURA 5. 16: CURVAS CONFRONTANDO O GANHO DE TENSÃO VERSUS FREQUÊNCIA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1) E PARA UM TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM DUAS CAMADAS COMO ATUADOR (1:2) E RESISTÊNCIA DE CARGA FIXA 700Ω.	64
FIGURA 5. 17: CURVAS CONFRONTANDO A EFICIÊNCIA VERSUS CARGA COM VALORES MEDIDOS E SIMULADOS, PARA VALORES DE FREQUÊNCIA ONDE OCORRE O MÁXIMO GANHO DE TENSÃO.	65
FIGURA 5. 18: CURVA DA POTÊNCIA DE SAÍDA VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A COM DUAS CAMADAS NO ATUADOR (1:2).	65
FIGURA 5. 19: CURVA DA EFICIÊNCIA VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A - 20 MM X 20 MM COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	66
FIGURA 5. 20: CURVA DO GANHO DE TENSÃO VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A - 20 MM X 20 MM COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	67
FIGURA 5. 21: CURVA DA FASE (EM DEG) VERSUS FREQUÊNCIA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A - 20 MM X 20 MM COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	67
FIGURA 5. 22: CURVA DA POTÊNCIA DE SAÍDA VERSUS CARGA PARA O TRANSFORMADOR PIEZOELÉTRICO (TP) PZT5A 20 MM X 20 MM COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	68
FIGURA 5. 23: CURVAS CONFRONTANDO O GANHO DE TENSÃO VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).	68

FIGURA 5. 24: CURVAS CONFRONTANDO A EFICIÊNCIA VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).....	69
FIGURA 5. 25: CURVAS CONFRONTANDO A POTÊNCIA DE SAÍDA VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1).....	70
FIGURA 5. 26: CURVAS CONFRONTANDO O GANHO DE TENSÃO VERSUS FREQUÊNCIA PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1) E PARA UM TP PZT4 COM DUAS CAMADAS COMO ATUADOR (1:2) E RESISTÊNCIA DE CARGA FIXA 600Ω.....	70
FIGURA 5. 27: CURVAS CONFRONTANDO O GANHO DE TENSÃO VERSUS FREQUÊNCIA PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:1) E PARA UM TP PZT4 COM DUAS CAMADAS COMO ATUADOR (1:2) E RESISTÊNCIA DE CARGA FIXA 1000Ω.....	71
FIGURA 5. 28: CURVA DA FASE (EM DEG) VERSUS FREQUÊNCIA PARA O TP PZT4 1:2.....	71
FIGURA 5. 29: CURVA DA IMPEDÂNCIA VERSUS CARGA PARA O TP PZT4 1:1.....	72
FIGURA 5. 30: CURVA DA IMPEDÂNCIA VERSUS CARGA PARA O TP PZT4 1:2.....	72
FIGURA 5. 31: CURVAS CONFRONTANDO A EFICIÊNCIA VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TP PZT4 COM DUAS CERÂMICAS ATUADORAS E UMA TRANSDUTORA (1:2).....	73
FIGURA 5. 32: CURVAS CONFRONTANDO A POTÊNCIA DE SAÍDA VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:2).....	74
FIGURA 5. 33: CURVAS CONFRONTANDO O GANHO DE TENSÃO VERSUS CARGA, SIMULADO E MEDIDO, PARA O TP PZT4 COM UMA ÚNICA CAMADA CADA LADO (1:2).....	74
FIGURA 5. 34: CIRCUITO SIMPLIFICADO DO REATOR PARA A LÂMPADA FLUORESCENTE.....	75
FIGURA 5. 34A: SIMULAÇÃO PARA A TENSÃO E CORRENTE DE SAÍDA DO INVERSOR DC/AC, DE PONTE COMPLETA, CHAVEADO NA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA, APLICADO NO TP COM CARGA RESISTIVA.	76
FIGURA 5. 34B: SIMULAÇÃO PARA A TENSÃO DE ENTRADA DE UM CONVERSOR DC/AC CHAVEADO NA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DO TP E CORRENTE NA CARGA RESISTIVA DE 100R NA SAÍDA DO T EM FASE COM A TENSÃO, CONFERINDO ALTO FATOR DE POTÊNCIA.....	76
FIGURA 5. 34C: SIMULAÇÃO PARA A TENSÃO E CORRENTE NA CARGA RESISTIVA DE 100R EM FASE NA SAÍDA DO TP, CHAVEADO POR CONVERSOR DC/AC DE PONTE COMPLETA.....	76
FIGURA 5. 35 – TELA DO OSCILOSCÓPIO REGISTRANDO A TENSÃO DE ENTRADA NO TP.....	77
FIGURA 5. 36 - TELA DO OSCILOSCÓPIO REGISTRANDO A TENSÃO NA CARGA (R = 180 kΩ).....	78
FIGURA 5. 37 - TELA DO OSCILOSCÓPIO REGISTRANDO A TENSÃO NA CARGA (R = 1,1 kΩ).....	78
FIGURA 5. 38 – TELA DO OSCILOSCÓPIO REGISTRANDO A TENSÃO NA CARGA (R = 220 Ω).....	79
FIGURA 5. 39: TP PZT4 1:2 APLICADO A UM REATOR DE UMA LÂMPADA FLUORESCENTE DE 20W – TIPO 1. ...	82
FIGURA 5. 40: LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA DE 20W ACESA PELO TP PZT4 1:2 APLICADO A UM REATOR.....	82
FIGURA 5. 41: TELA DO OSCILOSCÓPIO REGISTRA A TENSÃO (CH1) E CORRENTE (CH2) NA ENTRADA DO TP, QUANDO LIGADO A UMA LÂMPADA DE 20W COMPACTA.....	83
FIGURA 5. 42: TELA DO OSCILOSCÓPIO REGISTRANDO A TENSÃO (CH1) E CORRENTE (CH2) NA SAÍDA DO TP, OU SEJA, ENTRADA DA LÂMPADA DE 20 W COMPACTA.....	83
FIGURA 5. 43: TP PZT4 1:2 APLICADO A UM REATOR DE UMA LÂMPADA FLUORESCENTE TUBULAR DE 20W. ..	84
FIGURA 5. 44: LÂMPADA FLUORESCENTE COMPACTA DE 20W ACESA PELO TP PZT4 1:2 APLICADO A UM REATOR.....	85
FIGURA 5. 45: (A) TEMPERATURA NO CENTRO DA CERÂMICA E (B) TEMPERATURA NA CERÂMICA.....	85

Lista de Tabelas

TABELA 1. 1: PROPRIEDADES DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS.....	18
TABELA 2. 1: DEFINIÇÃO DE ALGUNS SÍMBOLOS UTILIZADOS NESTE CAPÍTULO 2.....	26
TABELA 2. 2 – CONSTANTES DE FREQUÊNCIA COM SEUS RESPECTIVOS TIPOS DE CLASSIFICAÇÃO, USADA PELA CHANNEL INDUSTRIES, INC.	27
TABELA 5. 1: PARÂMETROS MEDIDOS E SIMULADOS DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA O TP PZT4 1:2.....	59

RESUMO

Este trabalho consiste em estudar os modelos de transformadores piezoelétricos de modo radial, construídos com cerâmicas ferroelétricas de $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ para aplicações em conversão de potência. Tivemos como aplicação explorar suas características físicas e utilizá-las como um componente para construção de um reator para uma lâmpada fluorescente. Foi aplicado um modelo de circuito equivalente elétrico de um transformador piezoelétrico com aplicação em conversão de potência em regime de alta frequência (25kHz – 2MHz). O transformador piezoelétrico é um dispositivo que combina um atuador piezoelétrico (lado primário) com um transdutor piezoelétrico (lado secundário), onde ambos podem trabalhar com modos de vibração transversais ou longitudinais. Estes atuadores e transdutores são feitos de elementos piezoelétricos, sendo por sua vez compostos de placas (eletrodos) e de materiais cerâmicos ferroelétricos polarizados. Neste trabalho também exploramos os modelos de multicamadas, construindo um TP com mais de um elemento piezoelétrico como atuador, visando maior potência de carga e alto ganho de tensão. A modelagem elétrica, considerando o seu funcionamento e as análises das características de cada modelo de transformador piezoelétrico foram realizadas através de medições e simulações numéricas que possibilitou a melhor escolha para a aplicação em um protótipo do reator da lâmpada. O uso de transformadores cerâmicos se justifica devido à simplicidade de produção do circuito em larga escala, redução no número de componentes e custo baixo.

ABSTRACT

This work is to study models (design) of radial mode piezoelectric transformers are constructed with ferroelectric ceramic $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ for applications in power conversion. We explore how to apply their physical characteristics and use them as a component for building a reactor to a fluorescent lamp. We applied an electrical equivalent circuit model of a piezoelectric transformer with applications in power conversion using switched high resonant frequency (25kHz – 2MHz). The piezoelectric transformer is a device that combines a piezoelectric actuator (primary side) with a piezoelectric transducer (secondary side), where both can work with vibration modes of transverse or longitudinal. These actuators and transducers are made of piezoelectric elements, which in turn made up of plates (electrodes) and polarized ferroelectric ceramics. This work also explored the models of multilayer building a TP over a piezoelectric element as actuator for greater load power and high voltage gain. The modeling power, considering its operation and analyzes the characteristics of a piezoelectric transformer model were performed by measurements and simulations that allowed the best choice for use in a prototype of the lamp ballast. The use of ceramic transformer is justified because of the simplicity of large-scale production at low cost.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1. 1 Motivação

Na incessante busca pela miniaturização e integração de sistemas modernos de transformadores elétricos, temos como objeto de pesquisa os transformadores piezelétricos que se apresentam como uma alternativa na aplicação de substituição aos tradicionais transformadores magnéticos de fio e núcleo ferroso. Os transformadores piezelétricos foram propostos, por volta de 1950, porém não se obteve sucesso no seu uso, devido à baixa condução de eletricidade por estes materiais. Com a melhora na qualidade do material e tecnologia dominada, a fabricação dos transformadores piezelétrico nos últimos anos vem sendo dominada, em diversas áreas de aplicações, tais como, reatores elétricos para lâmpadas fluorescentes, inversores de tensão utilizados em telas de LCD (iguinição da luz de fundo de Display de Cristal Líquido) de “notebooks”, carregadores de bateria para celulares, e conversores CC/DC de baixa e média potência.

Algumas características dos transformadores magnéticos podem se entendidas como desvantagens quando comparadas com os transformadores piezoelétricos, por exemplo, dificuldades em aplicação de alta tensão em pequenas dimensões, grande volume, e alto custo quando se trata de transformadores com maiores potências, devido a grande quantidade de cobre requerida.

Por outro lado, os transformadores piezoelétricos apresentam vantagens como: simplificação e redução no número de componentes, redução das dimensões do circuito (há exceções), menor peso, tornando sua produção industrial mais simples e rápida. Além disso, os materiais de sua composição são basicamente materiais isolantes, que no caso de falhas ou rompimento da sua isolação, proporcionam maior segurança, não apresentando risco de incêndio em caso de falhas. Destaca-se ainda, pela elevada eficiência (para potências < 50W), elevada densidade de potência e alta frequência de chaveamento [1, 2].

Os transformadores cerâmicos (transformadores piezelétricos) apresentam grande potencialidade de aplicação, sendo alvo de diversos estudos ou trabalhos acadêmicos, visando o desenvolvimento, aperfeiçoamento e a busca por novas propriedades de aplicações.

1. 2 – Histórico

A modelagem de um ressonador simples em termos de um circuito elétrico equivalente foi desenvolvida pelo cientista Stephen Butterworth¹ ao descrever um sistema eletromecânico capacitivo, representado por uma rede elétrica consistindo de uma capacitância em paralelo com uma impedância RLC série. Mas foi W.P. Mason [4] quem levou o crédito do desenvolvimento de um modelo eletromecânico para um ressonador mecânico retangular piezoelétrico. Depois de Mason, muitos cientistas trabalharam na modelagem de sistemas com um único seguimento (camada). Um análise detalhada destes sistemas de única camada é apresentado na literatura [3, 4]. Para maior eficiência, também foi proposto sistemas de várias camadas. A modelagem desses dispositivos é mais complexa e o tratamento teórico para este empilhamento de ressonadores tem sido relatada em [5] onde um modelo simplificado do circuito eletromecânico foi desenvolvido para um tubo cilíndrico de material ferroelétrico polarizado longitudinalmente.

Em 1956, T. Tanaka [6] fabricou diversos tipos de filtros mecânicos para provar a utilidade dos dispositivos piezoelétricos como atuadores. Ele revelou a importância de determinados modos de vibração e métodos de acoplamento para os ressonadores. A descoberta de vários segmentos de transdutores impulsionou os diferentes modelos de Transformadores Piezoelétricos (TPs).

Os estudos de transformadores piezoelétricos começou em 1957, nos EUA e no Japão em 1961 [6]. Entretanto, os TPs não se tornaram comercialmente bem sucedido, frente à indústria concorrente das tecnologias com transformadores magnéticos. Porém, já na década de 90, os pesquisadores japoneses fizeram grandes esforços para produzir TPs eficientes e compactos para aplicações em fontes de “laptop” com eficiência entre 85% [7] até 92% [8]. Continuando os trabalhos dos cientistas japoneses, C.A. Rosen propos [9] um sistema operacional TP no modo de vibração longitudinal. Este dispositivo de forma retangular foi nomeado como TP tipo Rosen. O tratamento de Rosen abriu as portas para o uso dos TP, conforme é reportado nas referências [10] e [11]. Estes trabalhos foram importantes para reduzir o tamanho dos dispositivos TP. As limitações fundamentais da densidade de energia e taxa de transferência de energia de

¹ Stephen Butterworth (1885-1958) foi um físico britânico que inventou o filtro Butterworth, uma classe de circuitos elétricos que são usadas para separar diferentes frequências de sinais elétricos.

um TP estão discutidas em [13]. As limitações fundamentais estão impostas por uma força de campo elétrico máximo, densidade de carga máxima de superfície, e tensão máxima para o material piezoelétrico. Recentemente, um TP tipo Rosen foi analisado [14] usando o método de elementos finitos. Um modelo de circuito elétrico equivalente foi desenvolvido nesta análise, e usado para validar o modelo do TP tipo Rosen. Foi encontrado a relação de transformação de energia e eficiência para os TP, e observado que a eficiência é sensível a frequência de ressonância do sistema.

São várias as aplicações recentes para os TP. Podemos observar na referência [11] um transformador piezoelétrico multi-camadas para fontes chaveadas. O TP opera no segundo modo de ressonância (a 1MHz) e todos os segmentos operaram no modo de vibração de espessura. Em [15] temos a aplicação de um TP em um conversor com comutação suave de tensão, operando no modo extensional, ou espessura. Este trabalho, afirma que a comutação suave elimina perdas capacitivas, devido à baixa impedância de entrada de TP modelo Rosen. Em [16] temos um TP projetado para alta tensão e possíveis aplicações. A combinação de um PT e um conversor DC-DC para um perfil de baixa aplicação é descrito em [17].

Recentemente tem-se desenvolvido muitas aplicações de TPs em conversores de potência para reatores de lâmpadas fluorescentes e carregadores de bateria têm sido relatados em [18, 19] e um conversor com capacitância de entrada em série foi investigado [20].

Nesta breve revisão bibliográfica, apresentamos o contexto da evolução dos dispositivos eletrônicos Transformadores Piezoelétricos, que atualmente estão sendo mais difundidos devido às várias empresas especializadas em fabricação de cerâmicas piezoelétricas no mercado internacional. Apesar de existir no Brasil vários grupos de pesquisa que estudam cerâmicas piezoelétricas, eles ainda não demonstraram capacidade ou interesse de industrialização de cerâmicas piezoelétricas. Até o momento e até onde sabemos, não temos nenhuma indústria nacional especializada na fabricação de cerâmicas ferroelétricas aplicadas em TP. Provavelmente, deve-se ao fato de que as empresas Brasileiras estão vendo as cerâmicas piezoelétricas com um certo receio ou como uma tecnologia ainda não totalmente consolidada. Atualmente quem vem dominando o mercado de cerâmicas PZT com aplicação no uso de TP são empresas localizadas na China, Japão e USA.

1.3 – Piezeletricidade

Piezeletricidade é a propriedade que certos materiais possuem de se tornarem eletricamente carregados quando submetidos a uma tensão mecânica. Estes materiais também exibem um efeito de conversão, ou seja, a ocorrência de deformação mecânica ao serem submetidos a um campo elétrico. O efeito piezoelétrico é encontrado em cristais que não têm centro de simetria, como o quartzo, sal de Rochelle [23]. O termo “piezo” é derivado do grego e significa pressão. Em 1880, Jacques e Pierre Curie descobriram que um potencial elétrico poderia ser gerado aplicando-se pressão em cristais de quartzo, chamados de sais de Rochelle. Nomearam este fenômeno de “o efeito piezo”. Atualmente estes efeitos também podem ser observados em cristais de cana de açúcar, porém com uma resposta muito pequena. De maneira simplificada, este efeito se caracteriza como uma distorção na estrutura da célula unitária do composto piezoelétrico, conforme se observa analisando as figuras 1.1 e 1.2, que mostram uma célula unitária do cristal de quartzo sem a aplicação de tensões mecânicas ou campos elétricos e uma tensão mecânica aplicada na célula unitária que sofre uma deformação, respectivamente.

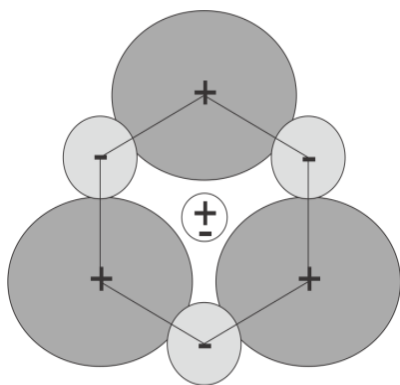


Figura 1. 1: Célula neutra.

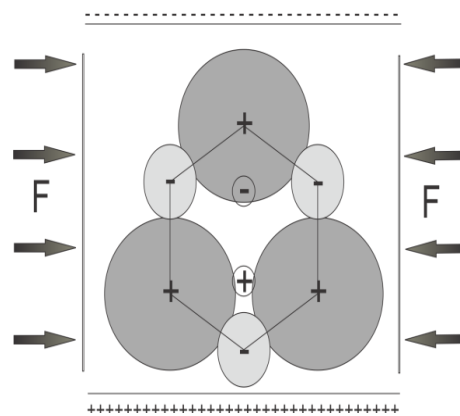


Figura 1. 2: Tensão mecânica aplicada na célula.

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

A piezoelectricidade inversa foi deduzida matematicamente dos princípios fundamentais da termodinâmica por Lipmann. Logo, os Curies então confirmaram imediatamente a existência do “efeito piezo inverso” (ocorre devido aos mesmos princípios, porém, ao invés de ser uma tensão mecânica que separa o centro de carga positivo do negativo gerando uma tensão, é um campo elétrico que separa o centro de carga positivo do negativo gerando uma deformação), e continuaram os estudos para obter a prova quantitativa da reversibilidade completa das deformações eletro elasto mecânicas em cristais piezoelétricos. Outra grande aplicação foi feita por Paul Langevin, o desenvolvimento de sonares na primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventando o transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz's. A utilização da piezoelectricidade no sonar, e o sucesso deste projeto, causaram um intenso interesse no desenvolvimento de dispositivos piezoelétricos. Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo por estes demandarem geradores de alta tensão iniciaram-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos.

1. 3.1 – Modelagem básica dos Transformadores Cerâmicos

Os transformadores piezoelétrico podem ser modelados como um dispositivo que combina um atuador piezoelétrico, no lado primário, acoplado a um transdutor piezoelétrico, no lado secundário. Transdutores e atuadores são feitos de materiais piezoelétricos e cobertos por uma fina placa metálica (eletrodo) depositado sobre as faces do material ferroelétrico, como se fosse um capacitor cujo dielétrico seria o material ferroelétrico, conforme se observa na figura 1.3.



Figura 1. 3: Dois eletrodos depositados sobre a cerâmica de material piezoelétrico.

Assim como os transformadores magnéticos, os transformadores piezoelétricos são dispositivos de transmissão de energia elétrica, porém no caso dos TPs a

transferência acontece através de acoplamento eletromecânico entre o lado primário e o lado secundário. Já nos transformadores magnético a transferência acontece por indução de campo magnético. Semelhantes ao transformador magnético, o acoplamento entre os lados primário e secundário podem ser eletricamente isolados ou não, e o TP pode ser um abaixador ou elevador de tensão elétrica, ou ainda para acoplamento de impedâncias.

De acordo com [17, 26] o modo de vibração mais comum dos elementos piezoelétricos, o transformador piezoelétrico é classificado em: Tipo Rosen, modo espessura, e modo radial. Cada uma das categorias é subdividida em dois tipos, e dependendo do número de elementos piezoelétricos podem ser denominados como: “single-layer” ou “multi-layer”. O single-layer é composto por dois elementos piezoelétricos, um atuador e um transdutor, enquanto que o multi-layer é composto por três ou mais elementos piezoelétricos. As categorias são divididas como;

- a) *Transformador de Rosen*: Este modelo de transformador foi inventado por C. A. Rosen, nos anos 50. Ele consiste em uma combinação tendo o atuador cerâmico vibrando no modo transversal, enquanto o transdutor cerâmico vibra no modo longitudinal (ver figura 1.4). Nas figuras seguintes iremos utilizar a letra P para representar na cerâmica a direção da polarização e a letra T para representar a direção tensão mecânica. Além disso, + (positivo) e - (negativo) representa a polaridade da cerâmica.

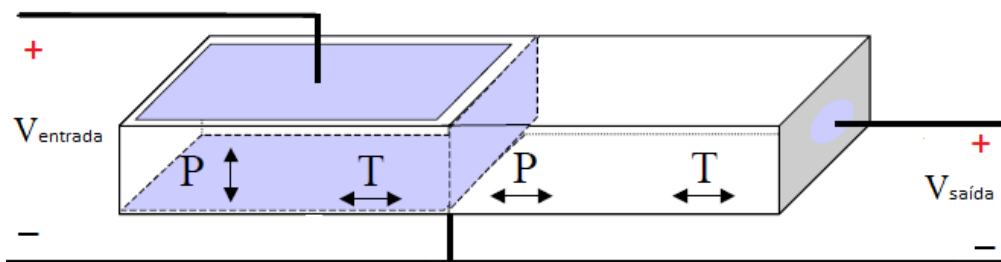


Figura 1. 4: Transformador piezoelétrico de Rosen.

O transformador tipo Rosen apresenta alto ganho de tensão, sendo chamado por alguns autores de transformador piezoelétrico de alta tensão. Apresenta grande aplicação em dispositivos que necessita de alta tensão em regime de baixas potências, como é o caso, da luz de fundo dos Displays de Cristal Líquido (LCDs).

b) *Transformador de modo de espessura*: Este modelo consiste em uma combinação de um atuador piezoelétrico (lado primário) vibrando em modo longitudinal acoplado em transdutor piezoelétrico (lado secundário) também vibrando em modo longitudinal, como pode ser visto na figura 1.5.

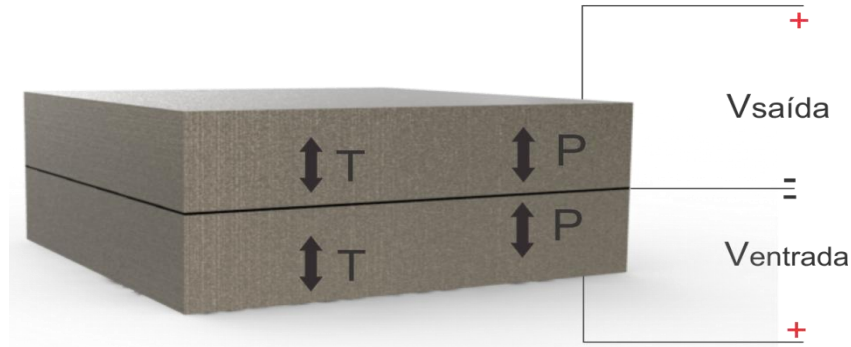


Figura 1. 5: Diagrama do transformador elétrico de modo espessura, desenvolvido pela NEC japonesa por volta de 1990.

Por se tratar de um TP de baixo ganho de tensão elétrica, este modelo também ficou conhecido como transformador piezoelétrico de baixa tensão, sendo aplicado em conversores e adaptadores de tensão.

c) *Transformador de modo radial*: Este modelo consiste em uma combinação de um atuador piezoelétrico (lado primário) vibrando em modo transversal acoplado em transdutor piezoelétrico (lado secundário) também vibrando em modo transversal, como pode ser visto na figura 1.6.

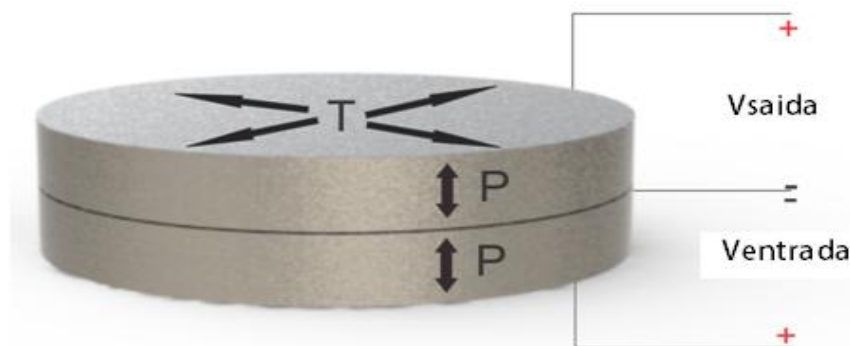


Figura 1. 6: Transformador piezoelétrico de modo radial. Desenvolvido em 1998 pela FACE Eletronics USA.

1. 4 – Os materiais Piezoelétricos

Muitos estudos levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos EUA.

Podemos observar na tabela 1.1, diversas composições fabricadas pela Channel Industries [24], que fabrica titanato zirconato de chumbo e titanato de bário, e outras composições especializadas.

PROPRIEDADES DAS CERÂMICAS PIEZOELÉTRICAS										
		TITANATO DE BÁRIO			TITANATO ZIRCONATO DE CHUMBO					
Números de referência do material Indústrias Channel, Inc.		300	600	1300 Navy IV	5400 Navy I	5500 Navy II	5600 Navy V	5700 Navy VI	5800	5804 Navy III
Coefficiente de Acoplamento	k_{33}	0,46	0,39	0,45	0,71	0,73	0,73	0,72	0,67	0,66
	k_{31}	-0,19	-0,16	-0,18	-0,36	-0,37	-0,36	-0,37	-0,32	-0,32
	k_{15}	0,46	0,39	0,45	0,72	0,71	0,68	0,65	0,60	0,59
	k_p	-0,32	-0,27	-0,30	-0,60	-0,62	-0,62	-0,62	-0,55	-0,54
Constante Piezoelétrica										
	d_{33} (10^{-12}) m/V	145	82	145	300	400	505	550	245	240
	d_{31} "	-58	-33	-56	-135	-185	-225	-250	-107	-105
	d_{15} "	245	150	245	525	625	670	690	390	382
	g_{33} (10^{-3}) Vm/N	13,1	16,8	12,2	26,1	25,8	22,0	19,4	25,2	25,8
	g_{31} "	-5,2	-6,8	-4,7	-11,7	-11,9	-9,8	-8,8	-11,0	-11,3
	g_{15} "	20,5	29,8	19,1	40,5	40,0	31,5	26,4	31,5	32,2
Constante Dielétrica livre										
	K_3^T	1250	625	1350	1300	1750	2600	3200	1100	1050
	K_1^T	1350	570	1450	1475	1775	2400	2950	1400	1340
Constante Elástica										
	$1/S_{11}^E = Y_{11}^E \cdot 10^{10}$ N/m ²	11,7	11,6	11,9	8,2	6,4	6,2	6,2	8,6	8,6
	$1/S_{11}^E = Y_{11}^E \cdot 10^{10}$ N/m ²	11,1	11,0	11,3	6,5	5,2	5,1	4,8	7,1	7,1
	c_{44}^E "	4,2	4,2	4,3	2,5	2	2,2	2,3	2,9	2,9
	Densidade(min) 10^3 kg/m ³	5,5	5,4	5,55	7,55	7,6	7,5	7,4	7,55	7,55
	Mecânica Q	450	1200	600	500	75	70	65	1100	1050
	Ponto de Currie, °C	>115	>140	>115	>300	>350	>240	>190	>300	>300
Tangente de perda dielétrica (Max)										
	Campo Baixo	0,008	0,003	0,008	0,004	0,02	0,02	0,02	0,004	0,004
	2 KV/cm RMS	NA	0,01	0,015*	0,02	NA	NA	NA	0,007	0,005
	4 KV/cm RMS	NA	0,025*	0,03*	0,04	NA	NA	NA	0,01	0,01
Mudança de K_3^T (%) (Max)										
	2 KV/cm RMS	NA	3	6*	5	NA	NA	NA	2,5	2,0
	4 KV/cm RMS	NA	8	12*	18	NA	NA	NA	6,5	4,0
Resistência à Tração estática psi		7500	8500	7500	11000	11000	11000	11000	12000	12000
Classificação de Resistência à Tração Dinâmica		3000	3500	3000	6000	4000	4000	4000	7000	7000
Mudança de N_1 / tempo em década (%)		0,5	0,4	0,4	1,5	0,2	0,25	0,25	1,0	1,0
Mudança de K_p / tempo em década (%)		-1,8	-0,7	-1,9	-2,3	-0,2	-0,35	0,35	-2,0	-1,8
Mudança de K_3^T / de tempo em década (%)		-0,8	-2,9	-1,3	-5,5	-1,0	-1,5	-1,5	-5,0	-4,0

* Os valores para 1300 são de 1,5 e 3 KV/cm RMS. NA não aplicável

Tabela 1. 1: Propriedades das cerâmicas piezoelétricas.

O titanato zirconato de chumbo é caracterizado por fatores de acoplamento piezoelétrico altos, constantes dielétricas grandes, grande intervalo de temperatura e alta intensidade de amplitudes quando sujeito a uma pressão aplicada (ou campo elétrico).

Estes materiais são usados extensivamente para transdutores eletro-mecânicos e eletro-acústico. Já o titanato de bário modificado é amplamente utilizado em transdutores de potência moderada e boa sensibilidade. Características especiais fizeram do titanato de bário um material comprovado para uso em dispositivos tais como sondas de profundidade e hidrofones.

Os materiais piezoelétricos cerâmicos são compostos de propriedades vantajosas, dependendo de sua utilização final. São representados em duas categorias principais:

- Cerâmica com potência de coercividade alta que são capazes de aceitar a entrada de alta potência contínua e operar em níveis elevados de estresse mecânico. As propriedades mais importantes deste grupo de materiais são as baixas perdas dielétricas e mecânicas, mesmo em grandes amplitudes de deslocamento ou de intensidade acústica.
- Os materiais sensores que são caracterizados por alta sensibilidade a tensão, com altas constantes dielétricas e resistividade, bem como baixo envelhecimento de suas propriedades. A maioria desses materiais são capazes de grandes deslocamentos e tem a vantagem de ser aplicada campos elétricos estáticos, mas são limitados na sua utilização como transdutores dinâmicos para projetores de potência muito baixa, devido a dissipação dielétrica de grande amplitude.

CAPÍTULO 2 – DEFINIÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

Para uma compreensão das propriedades físicas do material usado para construção dos TP é necessário fazermos uma revisão sobre os conceitos e propriedades dos materiais piezoelétricos. Segundo [2] define-se então as seguintes características:

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

$$D = \epsilon^T E \quad (2.1)$$

- Constante de Distorção Piezoelétrica (d): se refere a pressão mecânica (S) desenvolvida em resposta a um campo elétrico (E) aplicado, sem estresse mecânico (T) aplicado. De uma forma geral, é dado como:

$$S = d^T E \quad (2.2)$$

- Constante de Elasticidade Piezoelétrica ou compliância (s^E): se relaciona a tensão aplicada devido um estresse mecânico (T), na presença de um campo elétrico (E) constante. De uma forma geral, é dada como:

$$S = s^E T \quad (2.3)$$

Onde, s^E é a compliância dado um campo elétrico constante (E). O inverso da compliância é conhecido como Módulo de Young.

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

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia Elétrica Armazenada}}{\text{Energia Mecânica de Entrada}}} \quad \text{ou} \quad (2.4)$$

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

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

$$k = \frac{d}{\sqrt{s^E \cdot \epsilon^T}} \quad (2.5)$$

- Densidade: está relacionado com a massa e o volume de um material piezoelétrico pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad (2.6)$$

- Fator de Qualidade Mecânica (Q): é a medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material, fundamental para se determinar a qualidade de resposta e por sua vez permite analisar a nitidez do pico de ressonância.

2.1 – Polaridade e Efeito Piezoelétrico

De modo geral, a aplicação de um campo elétrico com mesma polaridade do campo de polarização da cerâmica provoca um alongamento na direção de polarização e contração em todas as direções perpendiculares ao eixo de polarização. Em contraste, um campo reverso irá causar contração ao longo do eixo de polarização e expandido na direção transversal. A deformação permanece enquanto um campo é mantido. Do mesmo modo, uma força de compressão aplicada perpendicularmente ao eixo de polarização produz um campo elétrico da polaridade igual ao eixo de polarização. A

aplicação de uma força reversa poderá inverter a polaridade do campo elétrico gerado. Porém há várias exceções, que por sua vez depende da geometria da cerâmica ou do modo de vibração principal. O eletrodo positivo da cerâmica é normalmente identificado por uma marca de polaridade usada para indicar polaridade da tensão positiva, aplicada durante a operação de polarização [24].

2. 2 - Formas e modos de vibração de uma cerâmica

O comportamento multi ressonante de cerâmica piezoelétrica depende de sua forma, orientação de polarização e da direção do campo elétrico aplicado. O padrão de deslocamento dentro de um piezo-dispositivo depende da frequência mecânica. O tipo de padrão de deslocamento ou de flexão é referido como o modo de vibração. O piezo dispositivo pode ter várias formas para alcançar diferentes modos de vibração ou, alternativamente, um modo de vibração necessário ditará a forma básica do ressonador. O modo de vibração usado é determinado pela frequência alvo do ressonador e distribuição de tensão desejada. Temos hoje no mercado internacional várias empresas que fabricam cerâmicas piezoelétricas de acordo com a necessidade do projetista ou usuário. Na Figura 2.1 podemos observar várias formas de cerâmica piezoelétrica, fornecidas por [24]. Para desenvolvimento de equipamentos ou dispositivos, basta somente especificar as dimensões de interesse e analisar qual tipo de geometria se encaixa em sua necessidade de aplicação. Para efeito de custo de projeto é sempre melhor adequar o dispositivo dentro das formas de cerâmicas do fabricantes em produção. O desenvolvimento de novas formas ou padrão das diferente do mercados requer grande custo inicial na fabricação de matrizes.

Ação / Forma	Geometria Típica	Geometria	k	Modo Principal do Movimento ou Força Aplicada
1. Paralelo Modo Longitudinal		$l > 3d$	k_{33}^l	
2. a) Transversal Modo Comprimento		$l > 3w > 3t$	k_{31}^l	
b) Transversal Modo Largura		$w < .3l$ $w > 3t$	k_{31}^w	
3. Transversal Modo Aro		$d_o > 3h > 3t$	k_{31}^{eff} k_{31}	
4. Paralelo Modo Largura		$w < .3l$ $w > 3t$	k_{33}^w	
5. a) Modo Planar		$d > 5t$	k_p	
b) Espessura Modo extensional		$t < .2d$	k_{33}^t	
6. Corte de Espessura, E Paralelo.		$t < .2w$ $t < .2l$	k_{15}	
7. Cilindro Oco de parede fina		$d_o > 8t$ $l > .5t$	k_{31}	
8. Cilindro Oco Listrado		$d_o > 8t$	k_{33}	
9. Hemisfério		$d_o > 8t$	k_p	
10. Esfera Oca		$d_o > 8t$	k_{31}^{eff} k_p	

Figura 2. 1: Relação de cerâmicas piezoelétricas de diferentes formas geométricas. Fonte: Adaptada de Channel Industries Inc [24].

2.2. 1 – Modo de vibração transversal (comprimento)

Neste modo de vibração temos a direção de vibração ortogonal à direção de polarização. A Figura 2.2 mostra uma forma de placa retangular vibrando neste modo. Onde P = direção de polarização, E = direção do campo elétrico

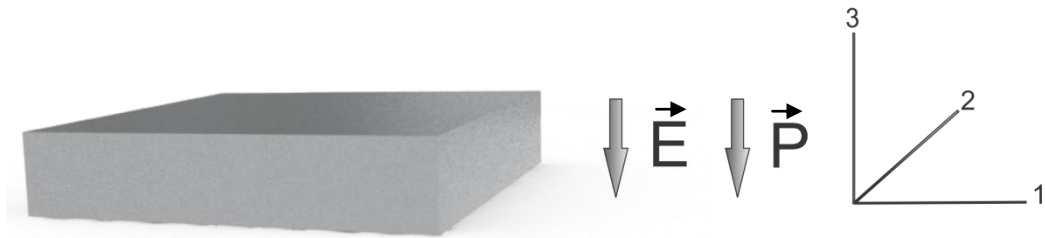


Figura 2. 2: Modo de vibração transversal.

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

2.2. 2 – Modo de espessura

Para este modo, a vibração é orientada ao longo da direção de polarização. A Figura 2.3 mostra que as formas disco e placa retangular são utilizados nesta modalidade, onde a espessura (comprimento de propagação) é muito menor que o comprimento, largura, ou diâmetro.

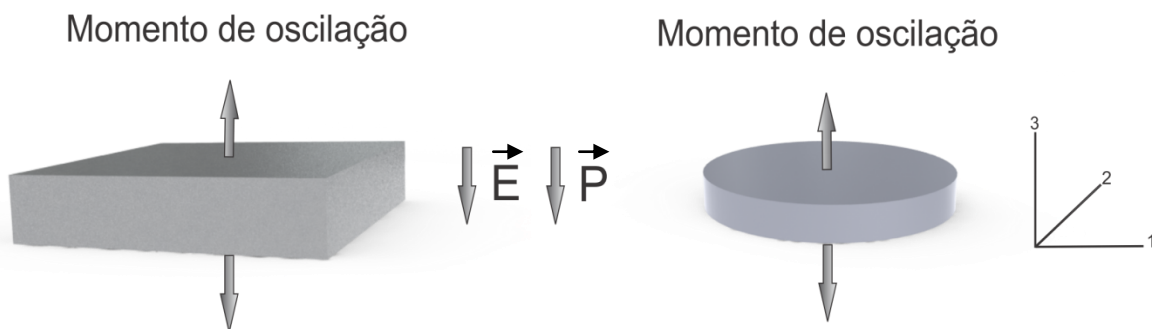


Figura 2. 3: Vibração em modo de espessura.

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

2.2. 3 – Modo de espessura (cisalhamento)

Neste modo, a cerâmica piezoelétrica expande na espessura, bem como na diagonalidade, assim como o modelo 6 da tabela da figura 2.1 deste capítulo . Figura 2.4 mostra que as placa retangulares são utilizados nesta modalidade e na direção do comprimento a propagação é muito menor do que a superfície dos eletrodos.

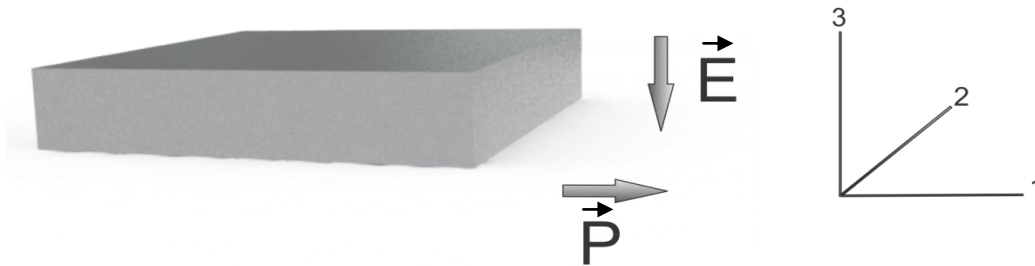


Figura 2. 4: Modo de vibração por espessura.

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

2. 3 – Velocidade de Propagação do som na cerâmica

A velocidade de propagação do som através de uma cerâmica piezoelétrica tem um valor específico para cada modo de vibração. Para uma cerâmica piezoelétrica com determinada forma e modo de vibração, a relação entre comprimento de onda λ de uma vibração e do comprimento de propagação ℓ em um ponto de ressonância é dada por:

$$\frac{\lambda}{2} = \ell \quad (2.7)$$

A velocidade do som é dada por:

$$v = f_r \cdot \lambda \quad (2.8)$$

onde f_r , é o frequência ressonância. Por isso

$$f_r = \frac{g}{2\ell} \quad (2.9)$$

ou

$$f_{r\ell} = \frac{g}{2} = N \quad (2.10)$$

onde N , é a constante de frequência (ver também tabela 2.1), depende do modo de vibração e propriedades do material [23].

N_{31}	Constante de Frequência para quando o eixo de polarização é perpendicular ao do stress ou tensão;
N_{33}	Constante de Frequência para quando o eixo de polarização é na mesma direção do estresse e da tensão;
N_{15}	Constante de Frequência para quando o eixo de polarização é perpendicular ao do estresse ou tensão e campo elétrico
N_p	Constante de Frequência para quando a polarização bem como a tensão ou estresse são todos na mesma direção.
k_{31}	Coefficiente de acoplamento eletromecânico indica que a polarização está na direção do eixo 3, e tensão ou a deformação é ao longo do eixo 1.
k_p	Coefficiente de acoplamento eletromecânico planar indica que a polarização, bem como a tensão ou stress é tudo na direção do eixo 3. (Também conhecido como modo planar)
k_t	Coefficiente de acoplamento eletromecânico de espessura indica que a polarização está na direção do eixo 3, e a tensão ou a deformação é ao longo do eixo 1 (também referida como o modo de espessura)

Tabela 2. 1: Definição de alguns símbolos utilizados neste capítulo 2.

A frequências para os modos específicos estão listados abaixo:

$$\text{Modo transversal: } f_r = \frac{N_{33}}{l} \quad (2.11)$$

onde l = comprimento do ressonador;

$$\text{Modo espessura: } f_r = \frac{N_{31}}{t} \quad (2.12)$$

onde t = espessura do ressonador;

$$\text{Modo corte: } f_r = \frac{N_{15}}{t} \quad (2.13)$$

onde t = espessura do ressonador;

$$\text{Modo radial: } f_r = \frac{N_p}{d} \quad (2.14)$$

onde d = diametro do ressonador;

Já a tabela 2.2 tem como objetivo relacionar as constantes de frequência com seus respectivos tipos;

Constantes de Frequência									
	Titanato de Bário			Titanato Zirconato de Chumbo – PZT					
Número de referência da Channel Industries, Inc. U.S.Navy	300	600	1300 Navy IV	5400 Navy I	5500 Navy II	5600 Navy V	5700 Navy VI	5800	5804 Navy III
N ₁ , (transversal)	2310	2310	2310	1650	1470	1450	1450	1680	1700
N _t (espessura)	2690	2640	2690	2030	1980	1900	1980	2110	2110
N _r (radial)	3150	3150	3150	2210	1980	1980	1980	2260	2310
N _c (circunferencial)	1470	1470	1470	1040	910	940	910	1070	1070
N _{3c} (circunferencial)	1370	1400	1370	970	910	910	890	1010	1010
N _{3l} (paralelo longitudinal)	2290	2290	2290	1500	1400	1420	1400	1570	1570
N _s (corte de espessura)	1420	1450	1420	940	890	890	890	960	960
N _{sp} (esfera oca)	2410	2440	2410	1730	1550	1520	1520	1800	1830
N _{3w} (paralelo a largura)	2490	2490	2490	1650	1550	1520	1550	1700	1700

Tabela 2. 2 – Constantes de Frequência com seus respectivos tipos de classificação, usada pela Channel Industries, Inc.

A escolha de trabalho das cerâmicas PZT a serem usadas, depende das características de trabalho, como frequência, tensão e corrente. Por exemplo, temos de acordo com a Tabela 2.2, para as cerâmicas PZT5A (5500) e PZT4 (5400). Essas amostras são ainda classificadas de acordo com área interna da curva de histerese, sendo denominados como Hard ou Soft. Os materiais “Hard” são aqueles que apresentam um curva de histerese fechada, com área pequena, e os materiais “Soft” são aqueles que apresentam uma curva de histerese “aberta”, com área expressiva. Os materiais “Hard” também são denominados materiais de alta potência e os “Soft” de materiais de alta sensibilidade. A marinha americana criou uma normalização que [32], [33] subdivide os materiais “Hard” e “Soft” em sub-grupos, através de intervalos de propriedades e de acordo com as principais aplicações. Esta mesma norma costuma ser utilizada como referência por pesquisadores e projetistas, para estabelecer tabelas de equivalência entre os diversos fabricantes de cerâmicas piezoelétricas e facilitar a escolha de materiais. Os subgrupos são divididos da seguinte forma:

- **Navy Tipo I (“Hard”)** Recomendado para aplicações de média e alta potência em condições de uso contínuo e repetitivo. É capaz de gerar altas amplitudes de vibração mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas. Tem como propriedades de destaque: dissipação dielétrica, constante de carga piezoelétrica, d_{33} e fator de qualidade mecânico (Q). Geralmente são aplicadas em: Sistemas de limpeza por ultra-som e sonares. Conhecido comercialmente como PZT-4.
- **Navy Tipo II (“Soft”)** Alta sensibilidade, ideal para dispositivos de transmissão e recepção de baixa potência,. Apresenta perdas dielétricas e mecânicas que inviabilizam a excitação contínua com alta intensidade. Propriedades de destaque: constante de carga piezoelétrica (d), constante de tensão piezoelétrica(g_{15}), constantes de frequência (N) e temperatura de Curie (TC). Aplicações: Dispositivos para NDT, hidrofones e acelerômetros. Conhecido comercialmente como PZT-5A.
- **Navy Tipo III (“Hard”)** Similar, mas menos sensível que o Navy Type I; é capaz de converter o dobro de potência mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas. Recomendado para aplicações de alta potência. Propriedades de destaque: dissipação dielétrica, fator de qualidade mecânico(Q) e conversão de potência máxima. Aplicações: sistemas de solda por ultra-som e processamento de materiais. Conhecido comercialmente como PZT-8.
- **Navy Tipo IV (“Soft”)** Adequado para aplicações de média potência. Tornou-se obsoleto com o advento dos PZT’s, sendo substituído principalmente pelo Navy Type I (o sub-grupo Navy Tipo IV é constituído por BT’s e não por PZT’s). Possui baixa temperatura de Curie, TC. Aplicações: manutenção de equipamentos antigos. Conhecido comercialmente como Titanato de Bário.
- **Navy Tipo V (“Soft”)** Adequado para aplicações que requerem altas energias e diferença de potencial. Propriedades em destaque: constante de carga piezoelétrica, constante de carga piezoelétrica, d_{33} , coeficiente de acoplamento, K_{33} e constante de tensão piezoelétrica g_{33} . Aplicações: detonadores de impacto e magic clicks. Conhecido comercialmente como PZT-5J.
- **Navy Tipo VI (“Soft”)** Adequado para aplicações que requerem grandes deformações mecânicas. Propriedades em destaque: constante de carga piezoelétrica, d_{33} e coeficiente de acoplamento, K_{33} . Aplicações: posicionadores e atuadores. Conhecido comercialmente como PZT-5H.

Diante destas classificações, fica fácil ver que os materiais que serão utilizados em nossos protótipos mais adiante, tipo I e II e portanto seguirá os valores apresentados pela tabela 2.2.

2.4 – Estruturas multicamadas

Denomina-se multicamadas camadas piezoelétricas empilhadas uma sobre as outras, como se fosse uma associação de pilhas. O modo pilha é uma maneira prática de montagem que consiste em um grande número de camadas piezoelétricas em uma estrutura monolítica. A pilha, que compreende um grande número de camadas piezoelétricas, é uma estrutura muito rígida. Ela também tem uma capacitância elevada quando suas estruturas estão ligadas eletricamente em paralelo. O dispositivo é adequado para trabalhar com alta potência e armazenar um grande volume de carga. Todavia, ao aumentar o volume de uma cerâmica maior quantidade de energia pode ser entregue a carga. À medida que o número de camadas aumenta dificulta-se o acesso de ligação de todas as camadas. Segundo [25], temos que em situações com mais de 3 camadas torna-se quase impraticável a montagem em multicamadas, para alguns fabricantes.

Segundo [2], temos dois modos básicos de polarização para montagem das camadas. Modo X e Modo Y: O modo X refere-se ao caso em que os vetores de polarização para cada uma das duas camadas aponta em direções opostas (Figura 2.5-a) especificamente, em relação uns aos outros. O modo Y refere-se ao caso em que os vetores de polarização para cada uma das camadas apotam na mesma direção (Figura 2.5-b)). Podemos observar na Figura 2.5: a) dois elementos polarizados empilhados com ambos os lados de mesma polaridade (+ e +) ou (- e -), já na Figura 2.5: b) ambos estão com polaridades contrárias (+ e -) e (- e +).



Figura 2. 5: a) Empilhamento multicamadas tipo X. b) Tipo Y.

CAPÍTULO 3 – CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO TRANSFORMADOR PIEZOELETRICO

Os TPs são classificados em três tipos principais: Rosen (comprimento) [9] modo a vibração por espessura [27] ou modo de vibração radial [26].

3. 1 – Circuito equivalente elétrico para um elemento piezoelétrico (1ª Abordagem)

Um elemento piezoelétrico é coberto por uma fina camada metálica (eletrodos de níquel ou prata) tendo entre elas o material cerâmico ferroelétrico polarizado, neste caso Titanato Zirconato de Chumbo (Pb(Zr,Ti)O₃), ou PZT, conforme pode ser visto na Figura 3.1;



Figura 3. 1: Elemento de material Piezoelétrico.

Para este elemento [34], podemos escrever as equações piezoelétricas lineares da seguinte forma:

$$S = s^E T + dE \quad \text{Atuador} \quad (3.1)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad \text{Transdutor} \quad (3.2)$$

onde E é o campo elétrico, T é a tensão mecânica, e D vetor deslocamento elétrico. A orientação padrão do campo se encontra na direção do eixo z , E e D ficam:

$$D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ D_3 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

3.1. 1 – Modo piezoelétrico longitudinal

Neste modo de vibração [34] a polarização da cerâmica está na mesma direção que a tensão e a deformação, que por sua vez, também está na mesma direção do campo elétrico:

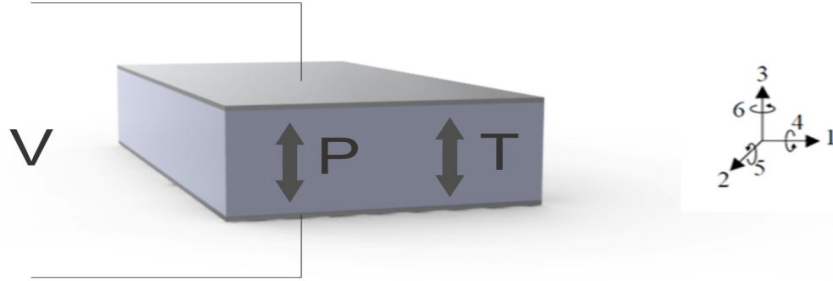


Figura 3. 2: Elemento piezoelétrico em modo longitudinal.

Os vensores tensão e deformação, podem ser escritos como:

$$T = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Baseado nas equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, as equações 3.1 e 3.2 podem ser abertas e simplificadas segundo [17], em:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11}^E & S_{12}^E & S_{13}^E \\ S_{12}^E & S_{11}^E & S_{13}^E \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad \text{Atuador} \quad (3.7)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad \text{Transdutor} \quad (3.8)$$

3.1. 2 – Representações do circuito equivalente para um elemento piezoelétrico

Baseado nas equações piezoelétricas podemos representar o circuito elétrico equivalente para um elemento piezoelétrico, conforme se observa no diagrama esquemático da Figura 3.3 [1-3].

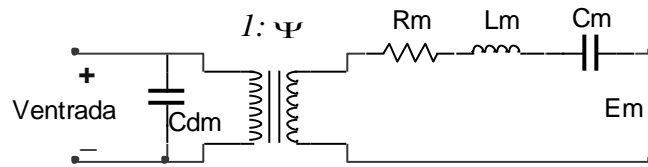


Figura 3. 3: Elemento piezoelétrico e o seu circuito equivalente elétrico.

V_{entrada} = tensão elétrica elétrica aplicada aos eletrodos;

C_{dm} = capacitância entre as placas;

R_m = resistência mecânica equivalente, análoga a uma resistência elétrica;

L_m = massa mecânica equivalente, análoga a uma indutância elétrica;

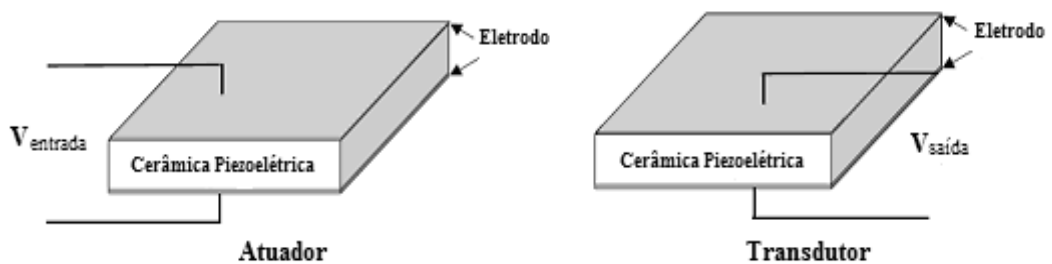
C_m = compliância mecânica equivalente, análoga a uma capacitância elétrica;

E_m = força mecânica equivalente, análoga a um campo elétrico;

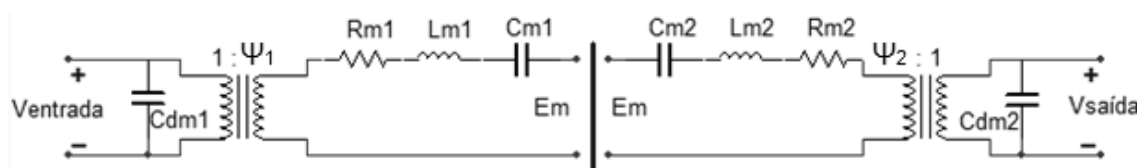
Ψ = fator de força mecânica equivalente, análogo à relação de espiras.

3. 2 – Circuito equivalente elétrico para um transformador piezoelétrico

Uma vez que o TP é uma combinação de um atuador piezoelétrico com um transdutor piezoelétrico, o seu circuito equivalente elétrico é obtido pela conexão, das propriedades de ressonância de um sistema mecânico com um sistema de ressonância RLC, acoplados com os dois lados do sistema como um todo.



Os circuitos equivalentes são acoplados da seguinte forma;



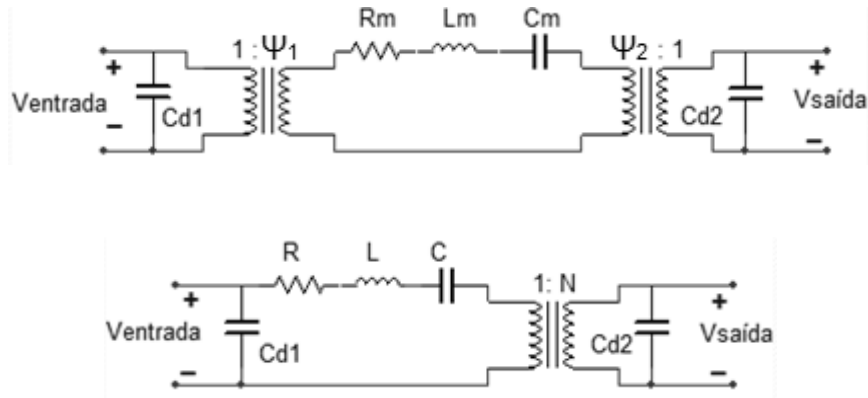


Figura 3. 4: Processo de obtenção do circuito equivalente elétrico do transformador piezoelétrico, a partir dos circuitos equivalentes de dois elementos piezoelétricos separados.

3.2. 1 – O transformador piezoelétrico tipo Rosen

O transformador piezoelétrico de Rosen é uma combinação de um atuador vibrando no modo transversal do lado primário com um transdutor vibrando no modo longitudinal do lado secundário [17, 28], assim como apresenta a Figura 3.5.

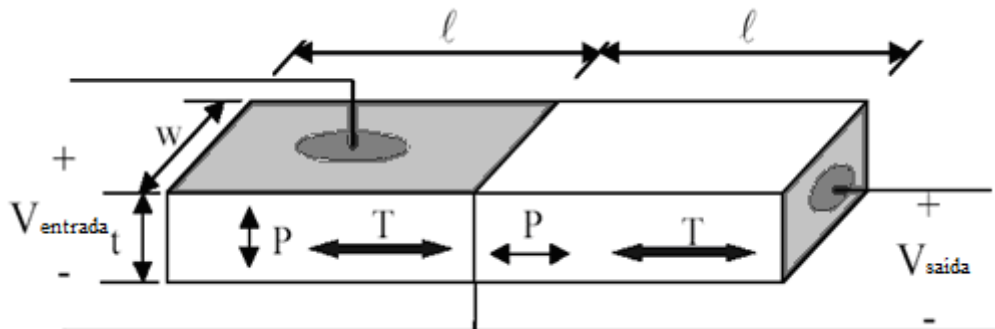


Figura 3. 5: O transformador piezoelétrico de Rosen.

Além da dependência com os coeficientes mecânicos, elétricos e piezoelétricos, os parâmetros do circuito equivalente elétrico para o transformador de Rosen também dependem das dimensões do mesmo e os parâmetros R , L , C , N , C_1 e C_2 podem ser determinados através das seguintes expressões:

$$C_1 \propto \frac{w \cdot \lambda}{t} \quad (3.9)$$

$$C_2 \propto \frac{w \cdot t}{\lambda} \quad (3.10)$$

$$R \propto \frac{t}{w} \quad (3.11)$$

$$L \propto \frac{t \cdot \lambda}{w} \quad (3.12)$$

$$C \propto \frac{w \cdot \lambda}{t} \quad (3.13)$$

$$N \propto \frac{\lambda}{t} \quad (3.14)$$

3.2. 2 – Transformador piezoelétrico modo de espessura

Este modelo, segundo [17, 26] consiste em uma combinação de um atuador piezoelétrico (lado primário) vibrando em modo longitudinal acoplado em transdutor piezoelétrico (lado secundário) também vibrando em modo longitudinal.

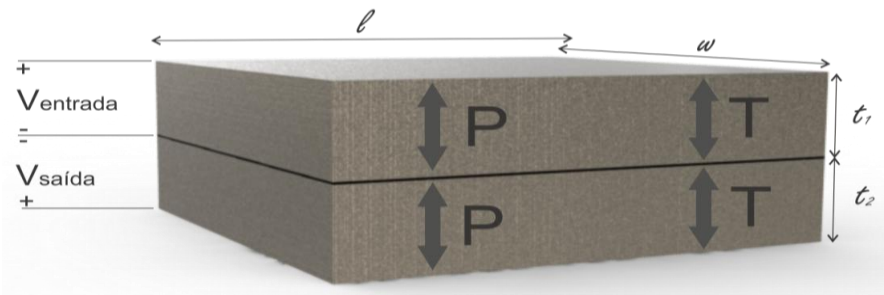


Figura 3. 6: O transformador piezoelétrico de modo de espessura.

Novamente, além da dependência com os coeficientes mecânicos, elétricos e piezoelétricos, os parâmetros do circuito equivalente elétrico também dependem das dimensões, como se pode ver a seguir:

$$C_1 \propto \frac{w \cdot \lambda}{t_1} \quad (3.15)$$

$$C_2 \propto \frac{w \cdot \lambda}{t_2} \quad (3.16)$$

$$R \propto \frac{t_1^2}{w \cdot \lambda} \quad (3.17)$$

$$L \propto \frac{(t_1 + t_2) \cdot t_1^2}{w \cdot \lambda} \quad (3.18)$$

$$C \propto \frac{(t_1 + t_2) \cdot \lambda \cdot w}{t_1^2} \quad (3.19)$$

$$N \propto \frac{t_1}{t_2} \quad (3.20)$$

3.2.3 – O transformador piezoelétrico de modo radial (uma camada)

O TP de modo radial (single-layer) é a combinação de um atuador em modo transversal no primário com um transdutor também em modo transversal no secundário. Quando se aplica uma tensão alternada V_{entrada} com frequência próxima ao modo de vibração radial no atuador, este vibra e transmite energia via deformação ao transdutor piezoelétrico do lado secundário, que por sua vez sente uma carga induzida entre seus eletrodos, produzindo a tensão de saída $V_{\text{saída}}$.



Figura 3. 7: O transformador piezoelétrico de modo radial.

Por se tratar de um modelo com grande perspectiva de pesquisa, será apresentado este modelo detalhando alguns pontos de maior interesse, assim como seu circuito equivalente elétrico. O TP de modo radial pode ser dividido em dois elementos piezoelétricos de acoplamento em modo transversal.

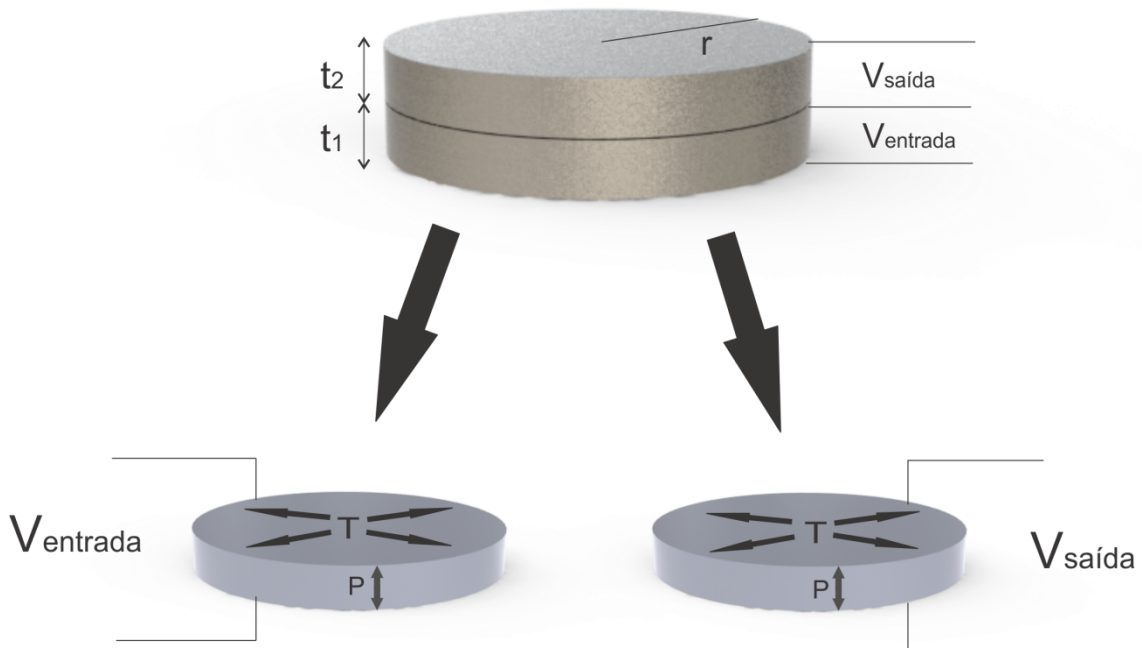


Figura 3. 8: O transformador piezoelétrico de modo radial, dividido em atuador e transdutor.

A combinação entre um diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico atuador (Figura 3.9-a) e um diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico transdutor (Figura 3.9-b), nos mostra como se dá o processo de transferência de energia (atuadora - transdutora).

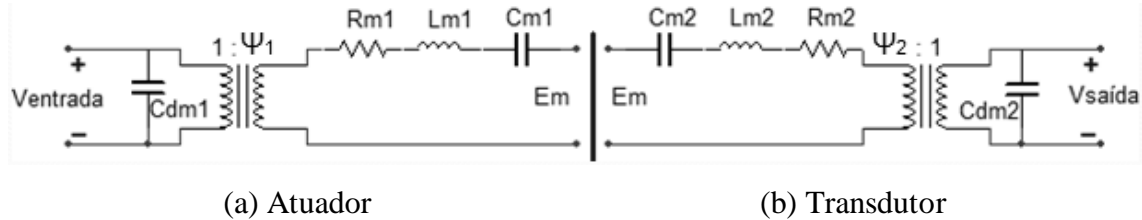


Figura 3. 9: (a) Diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico atuador. (b) Diagrama elétrico de um elemento piezoelétrico transdutor.

De maneira simplificada observa-se no diagrama elétrico do elemento piezoelétrico atuador que a energia potencial elétrica é convertida em energia mecânica, e do outro lado (elemento piezoelétrico transdutor) temos a conversão da energia mecânica em energia elétrica. Para um caso ideal, não há perdas dielétricas no atuador e no transdutor, e não há perdas mecânicas nas interfaces entre os elementos piezoelétricos. No caso ideal, toda a energia mecânica produzida pelo elemento atuador é transferida para o elemento transdutor, ou seja, não temos perdas de energia transferida. A energia mecânica obtida como resposta no elemento atuador passa a ser a excitação do elemento transdutor. O diagrama elétrico para o TP pode ser representado conforme a Figura 3.10.

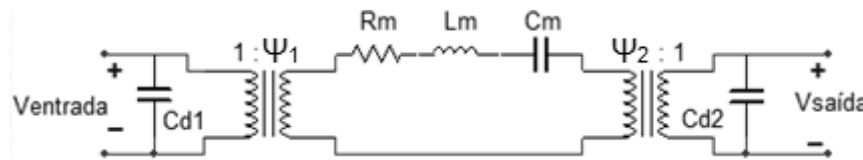


Figura 3. 10: Processo de derivação do circuito equivalente para TP em modo radial de vibração.

Os parâmetros do circuito equivalente para o elemento piezoelétrico (em função das dimensões e dos coeficientes do material) são:

$$R_m = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{r \cdot t}{Q_m} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{S_{11}^E (1 - \sigma)}} \quad (3.21)$$

$$L_m = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot t}{2} \quad (3.22)$$

$$C_m = \frac{4(1-\sigma) \cdot s_{11}^E}{\pi^3 \cdot t} \quad (3.23)$$

$$\Psi = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot r \cdot d_{31}}{(1-\sigma) s_{11}^E} \quad (3.24)$$

$$C_{dm} = \frac{r^2 \cdot \pi}{t} \cdot \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{31}^2}{(1-\sigma) \cdot s_{11}^E \cdot \varepsilon_{33}^T} \right) \quad (3.25)$$

Onde: r é o raio;

t é a espessura;

Q_m é o fator de qualidade mecânica;

ρ é a densidade;

s_{11}^E é a compliância elástica a campo elétrico constante;

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

d_{31} é o coeficiente piezelétrico;

ε_{33}^T é a constante dielétrica;

Aplicando a teoria de associação dos elementos resistivos, capacitivos e indutivos, localizados na parte central da Figura 3.10 pode simplificar o circuito por um resistor equivalente (R_m), um capacitor equivalente (C_m) e um indutor equivalente (L_m).

Segundo [17, 26], os parâmetros estão relacionados da seguinte forma:

$$C_1 = C_{dm1} = \frac{r^2 \cdot \pi}{t_1} \cdot \varepsilon_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{(1-\sigma) \cdot s_{11}^E \cdot \varepsilon_{33}^T} \right) \quad (3.26)$$

$$C_2 = C_{dm2} = \frac{r^2 \cdot \pi}{t_2} \cdot \varepsilon_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{(1-\sigma) \cdot s_{11}^E \cdot \varepsilon_{33}^T} \right) \quad (3.27)$$

$$\psi_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot r_1 \cdot d_{31}}{(1-\sigma) s_{11}^E} \quad (3.28)$$

$$\psi_2 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot r_2 \cdot d_{31}}{(1 - \sigma) s_{11}^E} \quad (3.29)$$

$$R_m = R_{m1} + R_{m2} = \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{r \cdot (t_1 + t_2)}{(1 - \sigma) \cdot Q_m} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{s_{11}^E \cdot (1 - \sigma)}} \quad (3.30)$$

$$L_m = L_{m1} + L_{m2} = \frac{r^2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot (t_1 + t_2)}{2} \quad (3.31)$$

$$C_m = \frac{C_{m1} \cdot C_{m2}}{C_{m1} + C_{m2}} = \frac{4(1 - \sigma) \cdot s_{11}^E}{\pi^3 \cdot (t_1 + t_2)} \quad (3.32)$$

Se comparado com um transformador magnético, podemos dizer que diferença de potencial aplicada ao ramo esquerdo do circuito elétrico simplificado (Figura 3.10), gera uma corrente elétrica que passa através do enrolamento primário ($N_1 = \Psi_1$) e induz uma corrente elétrica no enrolamento secundário ($N_2 = \Psi_2$), que por sua vez, gera uma diferença de potencial no ramo central do circuito. Quando não há percas de energia no transformador, a razão do número de espiras entre o enrolamento primário e secundário é proporcional à 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 3.10. Ou seja, para um transformador ideal, vale a seguinte relação:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\psi_1} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.33)$$

Sendo que $\psi_1 = N_2/N_1$.

Do mesmo modo que a tensão elétrica e corrente podem ser modificadas ao passar por um transformador, uma impedância “vista” de um dos lados (primário ou secundário) do circuito também pode ser modificada, e desta forma o circuito equivalente é reduzido novamente.

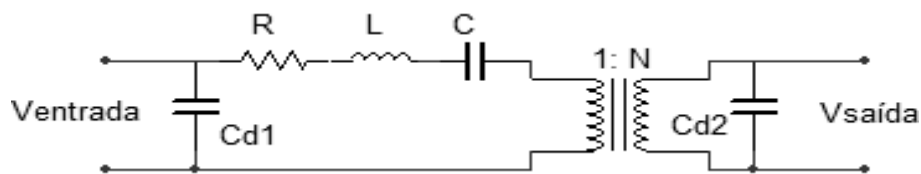


Figura 3. 11: Circuito equivalente elétrico do transformador de modo radial.

Onde foram usadas as seguintes relações para a reflexão do lado mecânico para o lado elétrico:

$$N = \frac{\psi_1}{\psi_2} \quad (3.34)$$

$$R = \frac{R_m}{\psi_1^2} \quad (3.35)$$

$$L = \frac{L_m}{\psi_1^2} \quad (3.36)$$

$$C = C_m \cdot \psi_1^2 \quad (3.37)$$

Por fim, os parâmetros do transformador piezoelétrico de modo radial são:

$$Cd_1 = C_1 = \frac{r^2 \cdot \pi}{t_1} \cdot \mathcal{E}_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{(1-\sigma) \cdot s_{11}^E \cdot \mathcal{E}_{33}^T} \right) [F] \quad (3.38)$$

$$Cd_2 = C_2 = \frac{r^2 \cdot \pi}{t_2} \cdot \mathcal{E}_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{(1-\sigma) \cdot s_{11}^E \cdot \mathcal{E}_{33}^T} \right) [F] \quad (3.39)$$

$$R = \frac{(t_1 + t_2)}{r} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot (s_{11}^E)^3 \cdot (1-\sigma)^3 \cdot \rho}}{32 \cdot Q_m \cdot d_{31}^2} [\Omega] \quad (3.40)$$

$$L = \frac{\rho(t_1 + t_2) \cdot (s_{11}^E)^2 \cdot (1-\sigma)^2}{16\pi \cdot d_{31}^2} [H] \quad (3.41)$$

$$C = \frac{32 \cdot r^2 \cdot d_{31}^2}{\pi \cdot (t_1 + t_2) \cdot (1-\sigma) \cdot s_{11}^E} [F] \quad (3.42)$$

3. 3 – Equações características do circuito equivalente TP modo radial

Nesta abordagem, escreve se o modelo elétrico do TP conforme a Figura 3.12 e

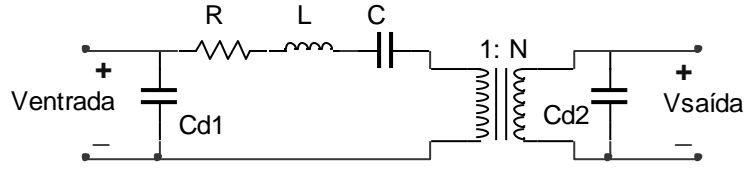


Figura 3. 12: Circuito equivalente.

considera-se a razão de Poisson diretamente nas equações, de forma que são reescritas como;

$$C_{d1} = \frac{N_1 \cdot r^2 \cdot \pi}{t_1} \cdot \epsilon_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E} \right) [F] \quad (3.43)$$

$$C_{d2} = \frac{N_1 \cdot r^2 \cdot \pi}{t_2} \cdot \epsilon_{33}^T \cdot \left(1 - \frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T \cdot s_{11}^E} \right) [F] \quad (3.44)$$

$$R = \frac{(N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2)}{r} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot (s_{11}^E)^3 \cdot \rho}}{16 \cdot Q_m \cdot (N_1 \cdot d_{31})^2} [\Omega] \quad (3.45)$$

$$L = \frac{\rho \cdot (N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2) \cdot (s_{11}^E)^2}{8 \cdot \pi \cdot (N_1 \cdot d_{31})^2} [H] \quad (3.46)$$

$$C = \frac{16 \cdot r^2 \cdot (d_{31} \cdot N_1)^2}{\pi \cdot (N_1 \cdot t_1 + N_2 \cdot t_2) \cdot s_{11}^E} [F] \quad (3.46)$$

$$N = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.47)$$

onde,

ρ - Densidade;

- ϵ_{33}^T - Permissividade;
- Q_m – Fator de Qualidade Mecânica;
- d_{31} - Coeficiente Piezoelétrico;
- S_{11}^E - Compliância Elástica;
- $\tan \delta$ - Fator de Dissipação;
- N_R – Constante de Frequência em Modo Radial;
- t_1 – Espessura do primário;
- t_2 – Espessura do lado secundário;
- N_1 – Número de camada do primário;
- N_2 – Número de camada do secundário;
- r – Raio da camada;

Na Figura 3.12, a resistência interna R representa a perda mecânica do dispositivo piezoelétrico. Para considerar a perda dielétrica do material como um todo, os resistores R_{Cd1} e R_{Cd2} são adicionados em paralelo com as capacitâncias de entrada e saída, C_{d1} e C_{d2} , como mostra Figura 3.13.

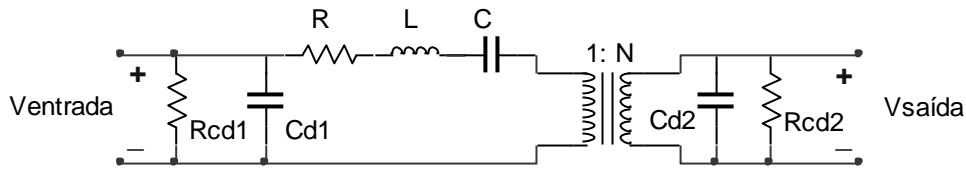


Figura 3. 13: Circuito equivalente convencional de Transformador.

Os resistores R_{Cd1} e R_{Cd2} podem ser estimados pelas relações 3.48 e 3.49:

$$R_{Cd1} = \frac{1}{\omega_s \cdot C_{d1} \cdot \tan \delta} \quad (3.48)$$

$$R_{Cd2} = \frac{1}{\omega_s \cdot C_{d2} \cdot \tan \delta} \quad (3.49)$$

É necessário lembrar que as relações apresentadas até agora trata se de uma análise para o modo de vibração principal, desconsiderando os modos “secundários” que podem existir. Além disso, estas relações podem ser aplicadas para os TP multicamadas conforme mostra a figura 3.14.

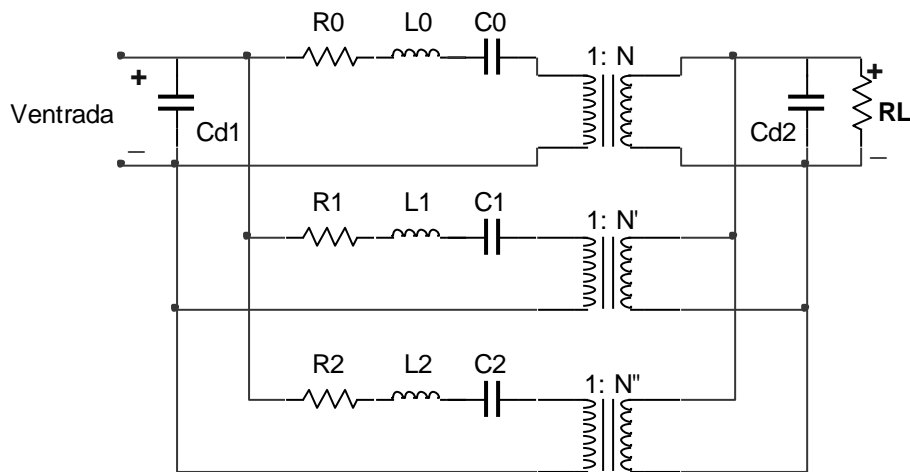


Figura 3. 14: Circuito equivalente para TPs multicamadas.

3.3. 1 - Análise de desempenho do TPs modo radial

Usando o circuito equivalente e características do TP como a impedância de entrada, ganho de tensão e eficiência é possível analisar com boa precisão a carga utilizada. Afim de pontuar algumas relações importantes iremos apresentar algumas relações:

a) Otimizando a carga à uma determinada frequência

Para uma dada frequência ω , existe uma carga ideal que dá a máxima eficiência do TP, [34]. Na Figura 3.15 mostra uma carga resistiva R_L em paralelo com a capacitância de saída C_{d2} e refletindo o lado secundário no lado primário. No circuito, N ou n é a relação de espiras do transformador piezoelétrico e é definido como (3.47).

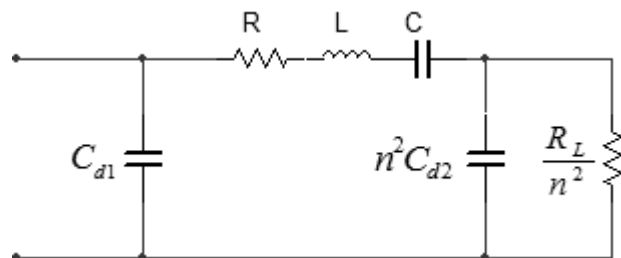


Figura 3. 15: Circuito equivalente para o TP com secundário refletindo no lado primário.

Para uma dada frequência ω , a carga R_L paralelo conectado a C_{d2} pode ser transformada e ser ligada em série, como mostrado na Figura 3.16.

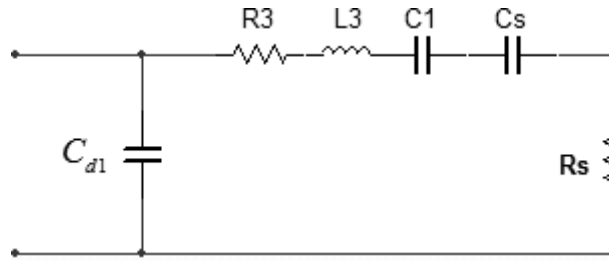


Figura 3. 16: Circuito equivalente para o TP com a transformação da ligação paralela em série.

Na Figura 3.16, a equação que rege R_s e C_s são mostrados em (3.50) e (3.51)

$$R_s = \frac{R_L}{N^2} \cdot \frac{1}{1 + (\omega \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2} \quad (3.50)$$

$$C_s = N^2 \cdot C_{d2} \cdot \frac{1 + (\omega \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2}{(\omega \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2} \quad (3.51)$$

e a eficiência do circuito pode ser expressa por (3.52):

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} = \frac{I_{rms}^2 \cdot R_s}{I_{rms}^2 \cdot R_s + I_{rms}^2 \cdot R_3} = \frac{R_s}{R_s + R_3} = \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_s}} = \frac{1}{1 + [1 + (\omega \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2] \cdot \frac{N^2 \cdot R_3}{R_L}} \quad (3.52)$$

tomando a derivada da eficiência:

$$\frac{d\eta}{dR_L} = 0 \quad (3.53)$$

$$\text{então temos: } \eta_{m\acute{a}x} = \frac{R_{L(\text{otimizada})}}{2n^2 \cdot R_3 + R_{L(\text{otimizada})}} \quad (3.54)$$

onde

$$R_{L(\text{otimizada})} = \frac{1}{\omega \cdot C_{d2}} \quad (3.55)$$

Equação (3.54) e (3.55) mostrou que para uma frequência, o máximo eficiência do PT é obtido quando a carga é igual à impedância de saída, característica esta, que é fundamental na construção do seu transformador.

b) *Frequência de ressonância para uma dada carga*

Para uma determinada carga R_L , há também uma frequência de ressonância que dá o máximo ganho de tensão do PT. Para Figura 3.16, quando a saída está em curto i.e. $R_L = 0$, a frequência de ressonância do circuito é:

$$f_{R0} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \quad (3.56)$$

Quando a saída está aberta, i.e. $R_L = \infty$, a frequência de ressonância do circuito do circuito é:

$$f_{R\infty} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.(C.n^2.C_{d2})}} = f_{R0}.\sqrt{1 + \frac{C}{N^2.C_{d2}}} \quad (3.57)$$

Quando uma carga finita resistência R_L é dada, a frequência de ressonância f_r é:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.\frac{C.C_s}{C+C_s}}} \quad (3.58)$$

Onde C_s é:

$$C_s = N^2.C_{d2}.\frac{1+(2.\pi.f_r.C_{d2}.R_L)^2}{(2.\pi.f_r.C_{d2}.R_L)^2} \quad (3.59)$$

Através de 3.59 é possível apresentar f_r como:

$$f_r = \frac{\sqrt{2.L.C.(-L.C.N^2 + N^2.C_{d2}^2.R_L^2 + C_{d2}.R_L^2.C + \sqrt{\Delta})}}{4.\pi.L.C.N.C_{d2}.R_L} \quad (3.60)$$

$$\Delta = L^2.C^2.N^2 + 2.L.C.N^2.C_{d2}^2.R_L^2 - 2.L.C^2.n^2.C_{d2}.R_L^2 + N^4.C_{d2}^2.R_L^4 + 2.C_{d2}^3.R_L^4.C.N^2 + C_{d2}^2.R_L^4.C^2 \quad (3.61)$$

Desse modo a equação (3.55) mostrou que para uma determinada carga R_L , há uma frequência de ressonância correspondente f_r do circuito e deve ser entre f_{R0} e $f_{R\infty}$.

c) *Ganho de Tensão, Potência e Eficiência na ressonância*

Para uma determinada carga R_L , se o TP é impulsionado na frequência de

ressonância f_r que é correspondente ao R_L dado, o ganho de tensão, potência de saída e eficiência na ressonância pode ser expressa por (3.62) a (3.64), respectivamente.

$$A_v = 20 \cdot \log \left(\frac{R_L \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2}}{N^2 \cdot R \cdot [1 + (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2] + R_L} \right) \quad (3.62)$$

$$P_o = \frac{V_{in}^2 \cdot N^2 \cdot R_L \cdot [1 + (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2]}{\{N^2 \cdot R \cdot [1 + (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2] + R_L\}^2} \quad (3.63)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + [1 + (2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot C_{d2} \cdot R_L)^2] \cdot \frac{N^2 \cdot R}{R_L}} \quad (3.64)$$

3.4 – Parametros do Circuito Equivalente

Para o modelamento do circuito equivalente se faz necessário as medidas dos parâmetros R , L , C , N , C_{d1} e C_{d2} do circuito equivalente elétrico do TP. Faz-se necessário a medida da impedância complexa do TP construído. Determina-se a parte real e imaginária da admitância de entrada e de saída do TP em função da frequência. São realizados os seguintes passos:

Passo 1 – Para obter C_{d1} , R , L e C , coloca-se o lado secundário do transformador em curto e conecta-se o lado primário ao impedancímetro (Agilent E4980A 20 Hz – 2 MHz), como pode ser visto pela imagem da Figura 3.17.

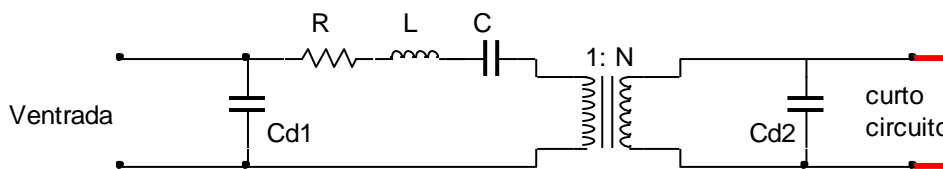


Figura 3. 17: Circuito equivalente elétrico do transformador de modo radial com saída em curto circuito.

Passo 2 – Para obter N e C_{d2} do circuito equivalente, colocamos o lado primário do transformador em curto e o lado secundário ao impedancímetro, conforme Figura 3.18.

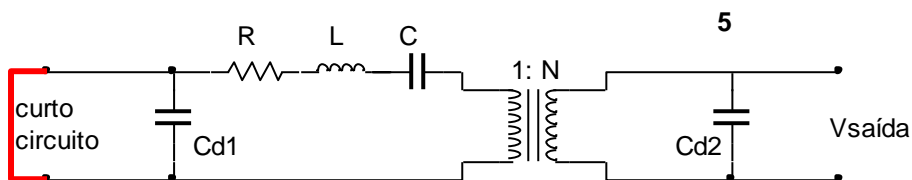


Figura 3. 18: Circuito equivalente elétrico do transformador de modo radial no procedimento de caracterização passo 2.

As características da admitância para o circuito equivalente do transformador piezoelétrico são reduzidas para (a) e (b) apresentados na Figura 3.19.

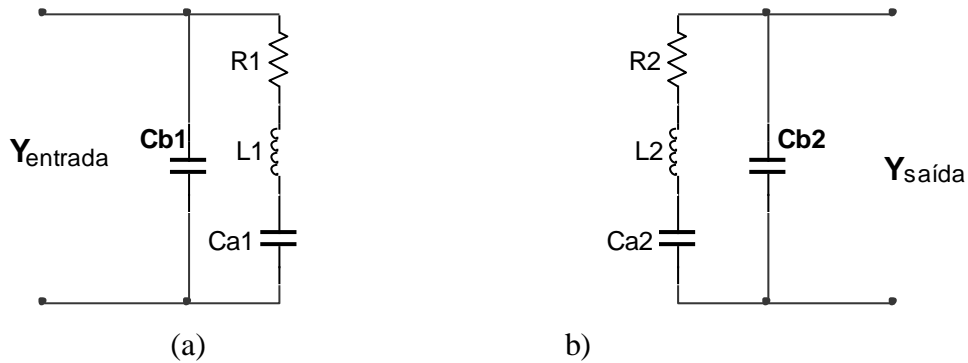


Figura 3. 19: Circuito equivalente elétrico reduzido pelo passo 1(a) e pelo passo 2(b).

Determina-se no passo 1 as quantidades;

$$C_{d1} = C_{b1} \quad (3.65)$$

$$R = R_1 \quad (3.66)$$

$$L = L_1 \quad (3.67)$$

$$C = C_{a1} \quad (3.68)$$

E no passo 2 as quantidades restantes

$$C_{d2} = C_{b2} \quad (3.69)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (3.70)$$

Os parâmetros relacionados acima são obtidos experimentalmente através da medida de condutância (G) e susceptância (B) plotados em um gráfico de G versus B chamado de círculo de admitância, como mostra a Figura 3.20 .

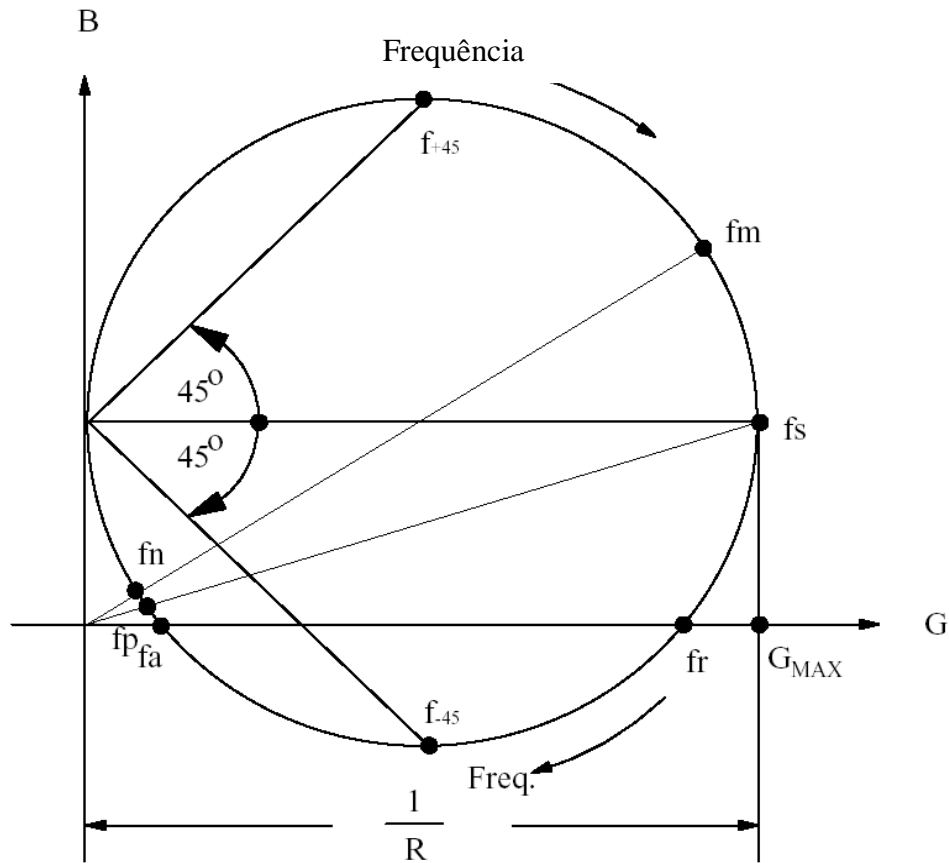


Figura 3. 20: Círculo de admitância.

Onde;

f_m :Frequência de máxima admitância;

f_s :Frequência de ressonância serie;

f_r :Frequência de ressonância, susceptância = 0;

f_a :Frequência de antirressonância; susceptância = 0

f_p :Frequência de ressonância paralelo;

f_n :Frequência de mínima admitância;

Segundo as referências [1] e [34] se as perdas mecânicas, R , forem muito pequenas, as frequências críticas, f_m , f_s e f_r são aproximadamente iguais, e consequentemente, f_n , f_p e f_a também são aproximadamente iguais. Para extrairmos os parâmetros do circuito equivalente, é preciso determinar também a capacitância total além das frequências críticas do círculo de admitância. Em baixa frequência, menor que 1KHz, a reatância indutiva é aproximadamente zero. Se a admitância do capacitor, C_{a1} , for muito maior que $1/R_1$, somente um capacitor intrínseco é visto quando medimos o

terminal de entrada do transformador com o terminal de saída em curto circuito. Deste modo, a capacitância total medida na entrada do transformador piezoelétrico é:

$$C_T = C_{b1} + C_{a1} \quad (3.71)$$

Agora de posse da capacitância total, podemos calcular os parâmetros do circuito equivalente com o terminal de saída em curto circuito através das relações (3.72) à (3.75)

$$C_{b1} = \frac{\omega_r^2}{\omega_a^2} C_T \quad (3.72)$$

$$C_{a1} = C_T - C_{b1} \quad (3.73)$$

$$L_1 = \frac{1}{\omega_s^2 C_{a1}} \quad (3.74)$$

$$R_1 = \frac{1}{G_{\max}} \quad (3.75)$$

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 (3.76) a (3.81).

$$C_{d1} = C_{b1} = \frac{f_{r1}^2}{f_{a1}^2} C_{T1} \quad (3.76)$$

$$C_{d2} = C_{b2} = \frac{f_{r2}^2}{f_{a2}^2} C_{T2} \quad (3.77)$$

$$C = C_{a1} = C_T - C_{b1} \quad (3.78)$$

$$L = L_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_{s1}^2 C_{a1}} \quad (3.79)$$

$$R = R_1 = \frac{1}{G_{\max 1}} \quad (3.80)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \sqrt{\frac{4\pi^2 f_{s1}^2 C_{a1}}{4\pi^2 f_{s2}^2 C_{a2}}} \quad (3.81)$$

3.5 – Circuito elétrico de um reator de carga variável

A Figura 3.21 mostra a representação esquemática de um reator convencional para lâmpadas fluorescente usando um transformador piezoelétrico, que pode ser usado para substituir o transformador convencional de fios, reduzindo custos e peso do sistema. Uma fonte com TP's baseados em uma corrente variável foi proposto em diversos trabalhos [7, 15 e 17], bem como seu princípio de funcionamento analisado em detalhes [4]. Mais informações também podem ser encontrada em [7, 15, 17 e 28].

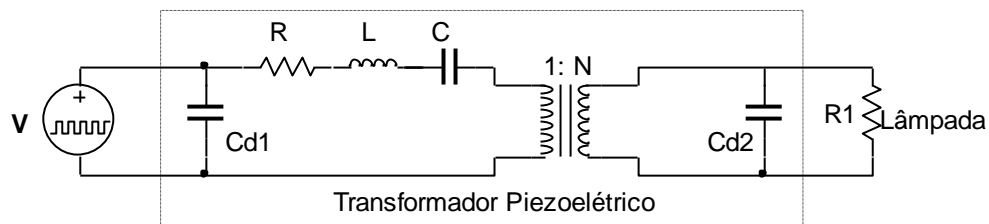


Figura 3. 21: Reatores eletrônicos convencionais utilizando TP;

CAPÍTULO 4 – CONSTRUÇÕES DOS PROTÓTIPOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste CAPÍTULO, poderemos observar alguns protótipos de transformadores piezoelétrico de modo radial confeccionados durante este trabalho. Estes protótipos foram usados para realização dos ensaios teóricos e experimentais, a fim de verificar os resultados, bem como a consistência dos métodos apresentados nos capítulos anteriores. Os protótipos foram construídos com elementos PZT-4 e PZT-5A conforme a Figura 4.1.

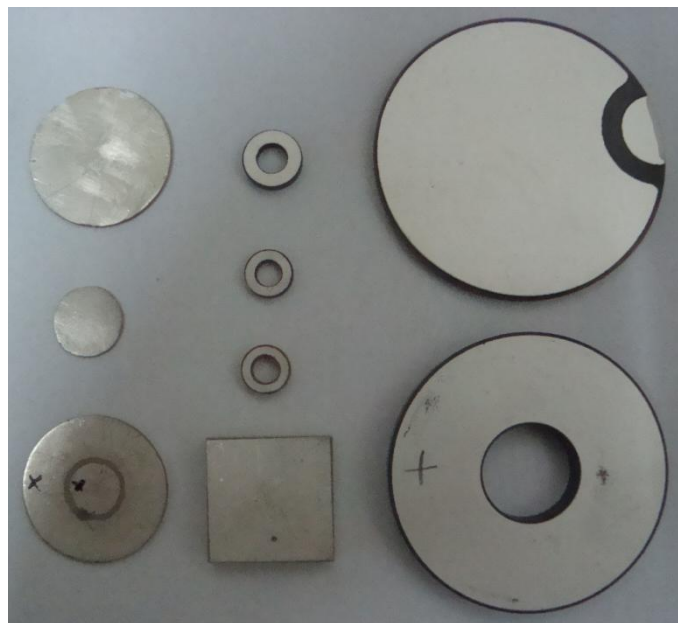


Figura 4. 1: Elementos piezoelétricos PZT-4 e PZT-5A.

4. 1 – Construção do dispositivo protótipo

Para estudos dos protótipos PZT5A construídos foram utilizadas cerâmicas piezoelétricas polarizadas. Todos os elementos estavam ou foram polarizados na direção z (eixo 3) através de eletrodos formados por tinta condutiva (tinta a base de prata). Foi necessário grande cuidado com a limpeza e a regularidade das superfícies, para perfeita aderência condutiva dos contatos elétricos. Após secagem da tinta dos eletrodos foram fixados com solda (estanho) os terminais elétricos (fios). De posse dos elementos cerâmicos piezoelétricos preparados, inseriu-se uma lamínula de vidro de espessura igual a 0,15mm entre os elementos e efetuou-se a colagem das mesmas usando uma prensa mecânica em temperatura ambiente por 24 h.

4. 2 – Tipos de protótipos construídos

Todos os protótipos de Transformadores Piezoelétricos (TP) construídos neste trabalho são isolados. Em função da praticidade e do baixo custo, usamos lamínula de vidro como isolador entre o primário e secundário, como elemento isolador. Pode ser usado qualquer tipo de material isolante, porém aluminas são mais indicadas, por apresentar boa transferência de energia mecânica entre transdutor e atuador, porém de custo maior. Por se tratar de uma cerâmica circular e uma lamínula de vidro retangular, precisamos tomar alguns cuidados na montagem:

1. Deixar a lamínula nas mesmas dimensões da cerâmica, para que não exista modos espúrios de vibração.
2. Colocar a quantidade certa de cola, para não faltar – provocando bolhas de ar e nem ser excessivo – para não transbordar pelas laterais cobrindo o contato do eletrodo com cola.
3. Por fim, quando unir ambas as partes, lembre-se de não aplicar muita pressão, pois trata-se de uma camada “muito frágil” de vidro e/ou algumas vezes de cerâmica.

Finaliza-se conferindo a solda dos terminais, e removendo o excesso de resina e de vidro, nas bordas. A Figura 4.2 apresenta o primeiro protótipo.



Figura 4. 2: TP 1.1 I C V – Transformador Piezoelétrico PZT5A 1:2 isolado com vidro e eletrodo em paralelo.

A imagem da Figura 4.2 apresenta um transformador protótipo construído com elementos de cerâmicas de PZT5A, de 1 mm de espessura cada camada, sendo este, um

transformador 1:2 tipo disco de eletrodos paralelos. Este modelo de transformador apresenta baixa potência de saída e baixa corrente de saída.

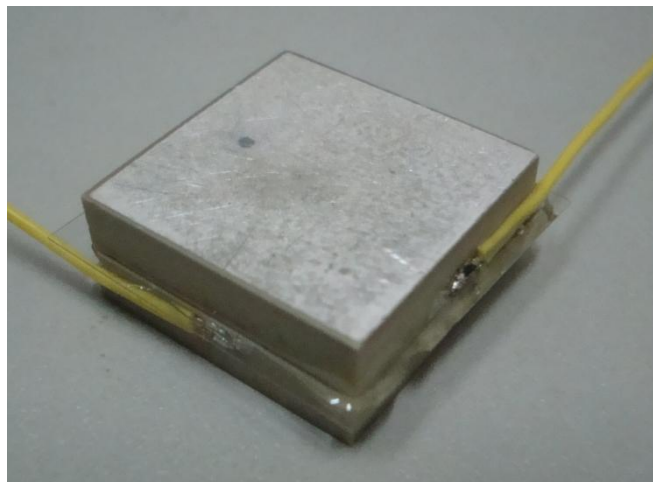


Figura 4. 3: TP 1.1 I C V - Transformador Piezoelétrico 1:1 Isolado com vidro, cerâmica PZT5A, quadrada (20 mm x 20 mm).

A imagem da Figura 4.3 mostra um transformador protótipo construído com dois elementos de cerâmicas de PZT5A, de 4,5 mm de espessura cada um.

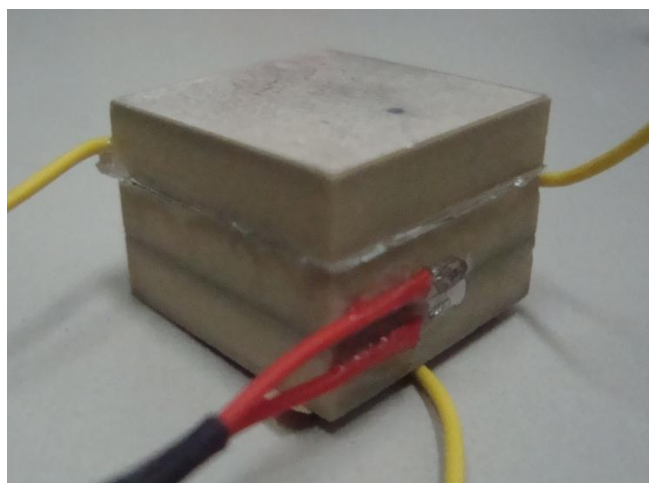


Figura 4. 4: TP 1.2 I C V Q - Transformador Piezoelétrico 1:2 Isolado com Vidro, cerâmica PZT5A, Quadrada (20 mm x 20 mm).

O TP com cerâmica retangular facilita a montagem e construção, porém, os protótipos contruidos apresentaram modos espúrios (outros modos de vibração, além do modo radial), por se tratar de uma cerâmica quadrada, e por isso, sua eficiência é bem inferior aos demais construídos com cerâmicas disco ou anel.

A Figura 4.5 mostra um transformador construído com elementos de eletrodos do tipo *Wrap Around* (com aba para solda), todavia isso diminui a eficiência e dificulta a construção em multicamadas. Por sua vez, estes elementos têm grandes aplicações em ultrassom, por apresentam eletrodos de fácil acesso para os terminais de alimentação.

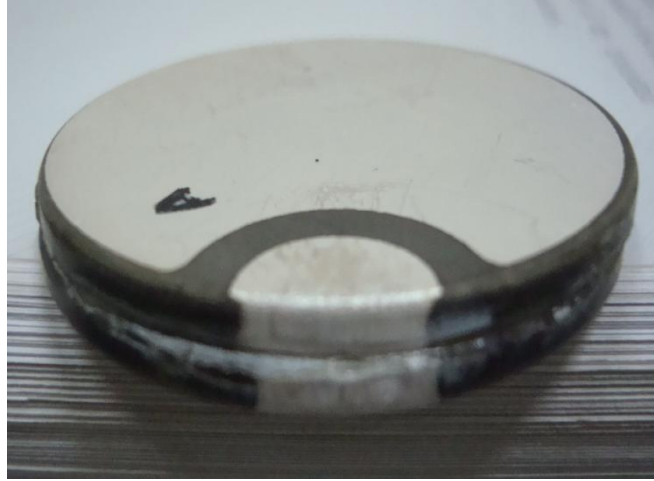


Figura 4. 5: TP 1.1 I C V - Transformador Piezoelétrico PZT4 - 1:1 Isolado com Vidro.

Nas figuras seguintes temos a sequência para um transformador multicamadas, sendo usado três camadas, para aplicação em alta potência.



Figura 4. 6: Elementos de PZT4 com 45 mm de diâmetro externo, 15 mm diâmetro interno e 5 mm espessura. Eletrodo Paralelo, também conhecido como Disc with Hole.



Figura 4. 7: TP 1.2 I C V - Transformador Piezoelétrico PZT4 - 1:2 Isolado com Vidro, duas camadas como atuador e uma como transdutor, Tipo Radial.

CAPÍTULO 5 – MEDIDAS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS SIMULADOS

Neste capítulo iremos apresentar através de algumas simulações características de funcionamento dos TP's em modo radial, cuja carga resistiva é a de uma lâmpada fluorescente, bem como, dimensionar os parâmetros deste tipo de TP modelando de acordo com cada aplicação. Para comparar os dados utilizaremos alguns gráficos com os dados obtidos e simulados.

5.1 - Equipamentos e aquisição dos dados

Através do esquema montado, ver Figura 5.1, podemos ver como ocorreu à aquisição dos dados, bem como, os equipamentos utilizados.

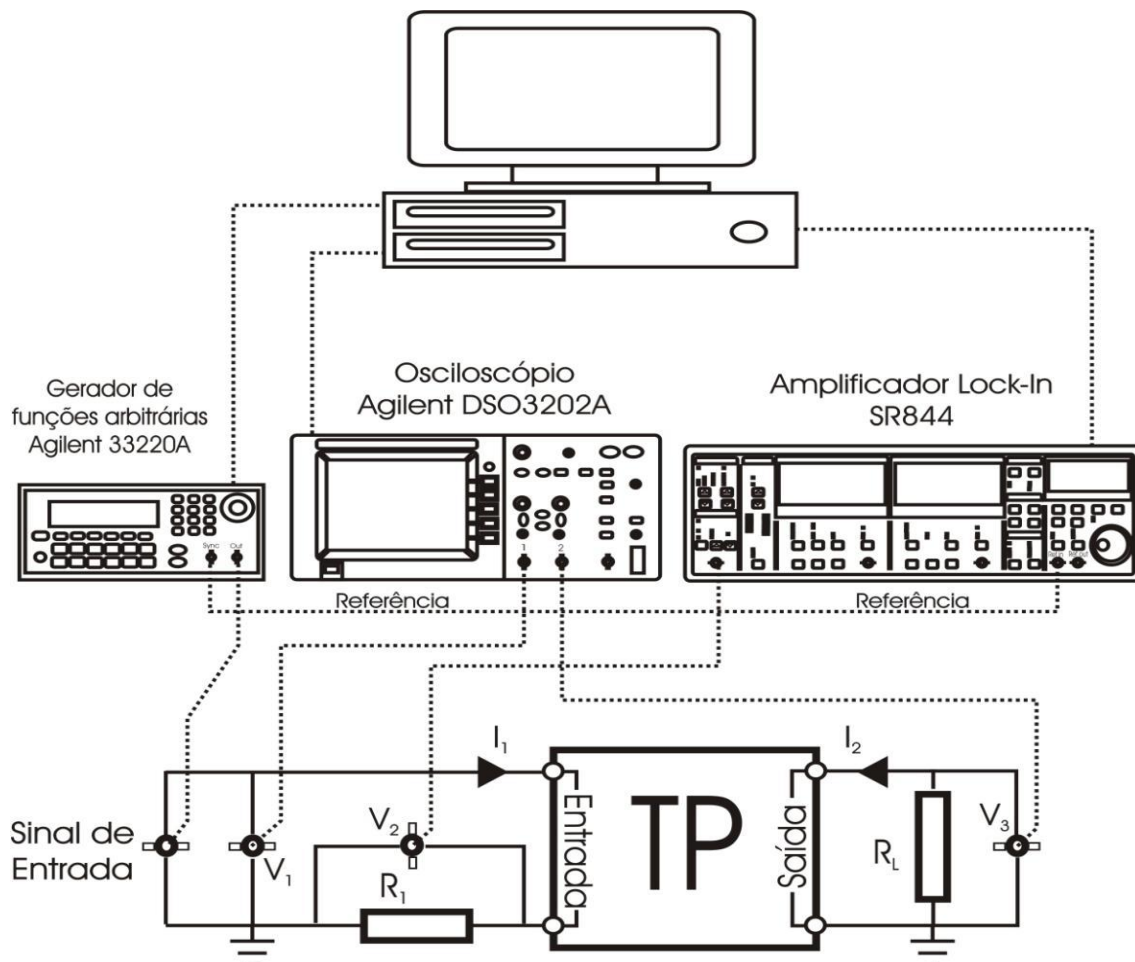


Figura 5. 1: Representação esquemática da disposição dos equipamentos e conexões.

Foi desenvolvido um programa de leitura e aquisição de dados em linguagem orientada a objetos (ver Figura 5.2), que por sua vez, faz o controle dos equipamentos

(Osciloscópio, Lock-in, Gerador de Sinal) ao PC. Ao iniciar o programa, o mesmo abre campos para o pesquisador definir qual a amplitude da tensão de aplicada no TP, a frequência inicial e a frequência final de varredura, a resolução espectral, o valor de resistor de prova (na entrada) e o valor da resistência de carga (R_L) que irá trabalhar. Um vez configurado e iniciado o programa realiza as medidas obtendo as curvas características do transformador, como corrente de entrada, fase, tensão de entrada, tensão de saída, potência de entrada, potência de saída, impedância, ganho de potência (A_p) (“eficiência”), ganho de tensão (A_v), ganho de corrente (A_i) de um transformador piezoelétrico em função da frequência.



Figura 5. 2: Programa de leitura e aquisição dos dados no Delphi.

Os outros dados do transformador piezoelétrico puderam ser medidos com o mesmo 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, θ , entre a d.d.p. aplicada pelo gerador de função, V_1 , e a ddp V_2 nos terminais do resistor R_1 . Para não reduzir a tensão aplicada ao TP, causada pela queda de potencial deste resistor R_1 , foi necessário utilizar um resistor de resistência

baixa, no nosso caso por volta de 5Ω . É importante dizer ainda, que para a realização das medidas nos TP de cerâmicas PZT5A utilizou-se uma tensão de 1 Vrms e para os TP de PZT4 7 Vrms e conforme esta tensão aumenta as características deste TP mudam, principalmente o ganho de tensão e a eficiência devido o aumento de temperatura.

Para efeito de comparação também foi desenvolvido outro programa de simulação dos dados experimentais com bases em dados discretos dos parâmetros das cerâmicas usadas na construção dos transformadores. Na figura 5.3 podemos observar o software usado para análise e simulação dos transformadores cerâmicos, com objetivo de confrontar com os dados medidos.

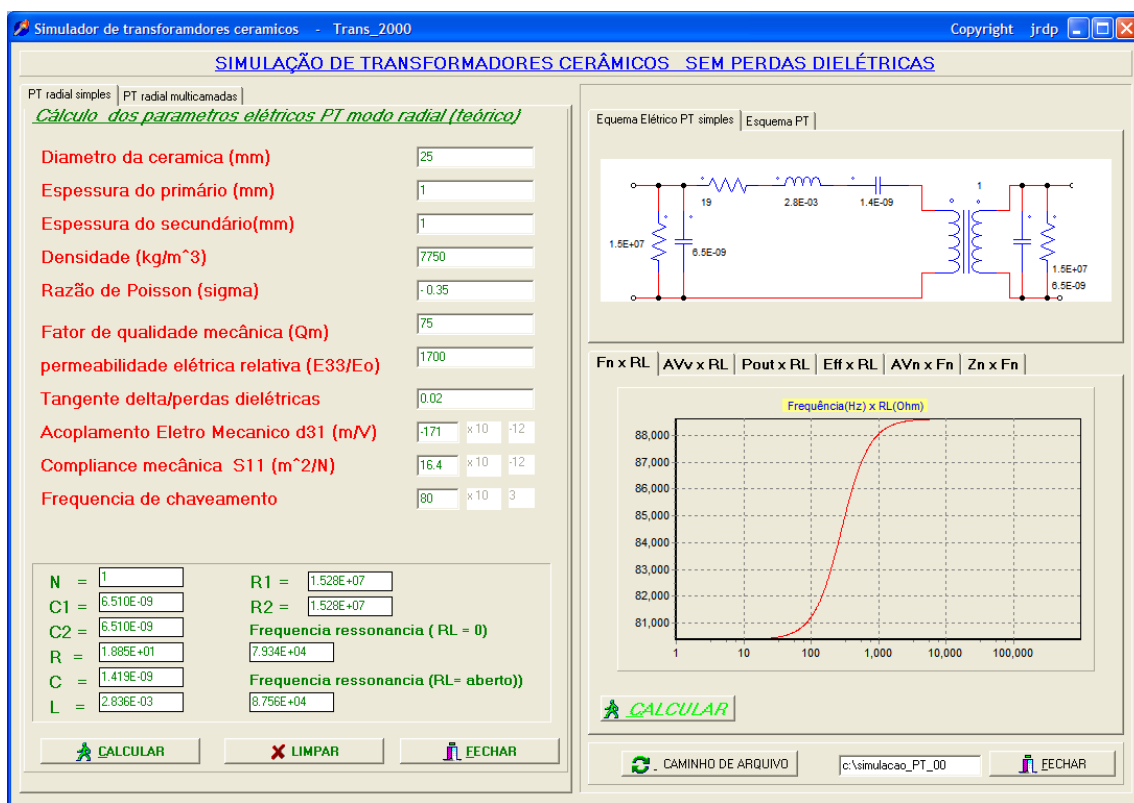


Figura 5. 3: Software simulador dos transformadores cerâmicos.

5. 2 - Medidas experimentais dos parâmetros das cerâmicas

Usando o equipamento de medidas de impedância foram realizadas as medidas das Figuras 5.4 e 5.5. Podemos identificar os valores de frequência para a impedância mínima (na ressonância, $f_r = 79,3\text{kHz}$) e para a impedância máxima (na antirressonância, $f_a = 92,6 \text{ kHz}$). Observa-se que na frequência de ressonância o circuito é puramente resistivo.

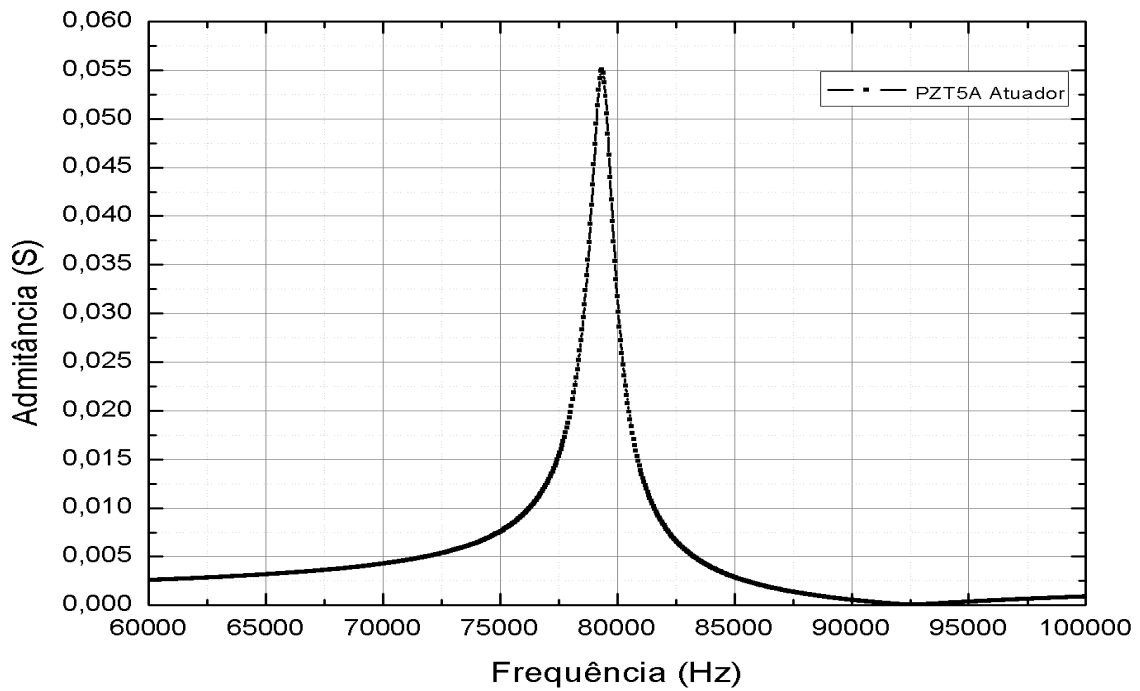


Figura 5. 4: Curva do módulo de admitância versus frequência do elemento cerâmico piezoelétrico (atuador) PZT 5A.

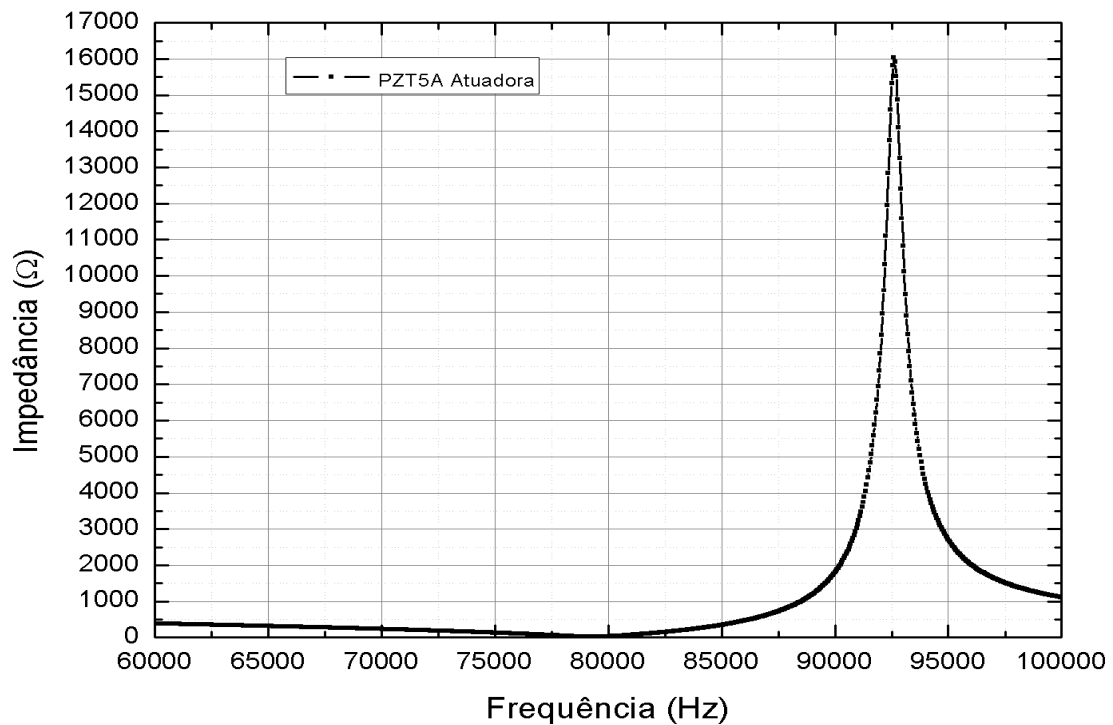


Figura 5. 5: Curva do módulo impedância versus frequência do elemento cerâmico piezoelétrico (atuador) PZT 5A.

Usando as definições obtidas do CAPÍTULO 3 (equação 3.43 até 3.47) , os dados das cerâmicas fornecidos pelo fabricante e os dados medidos com programa

(Software simulador dos transformadores cerâmicos), determinou-se o circuito equivalente elétrico:

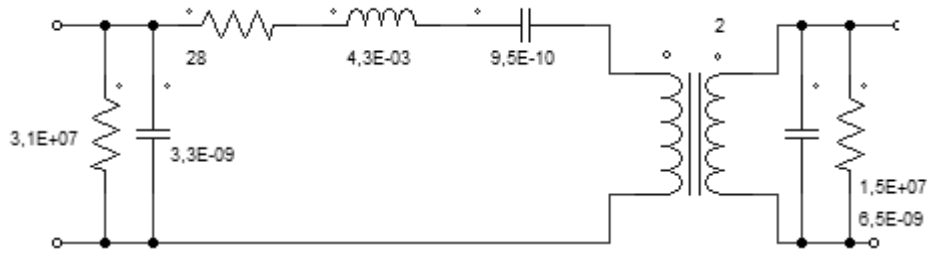


Figura 5. 6: Circuito equivalente elétrico para o TP 1.0 I C V, duas camada como atuador e uma como transdutor de PZT 5A.

5. 3 - Constatações dos Parâmetros do Circuito Equivalente

Os valores dos parâmetros dos circuitos equivalentes aos transformadores podem ser medidos e calculados utilizando as equações 3.71 à 3.75 e 3.76 à 3.81. Os dados necessários para isso são obtidos do círculo de admitância. Para exemplificar este trabalho, escolhemos o transformador TP PZT4 -1:2 como protótipo do nosso estudo. Veja nas Figuras 5.7 e 5.8 o círculo de admitância para o lado atuador e transdutor deste TP.

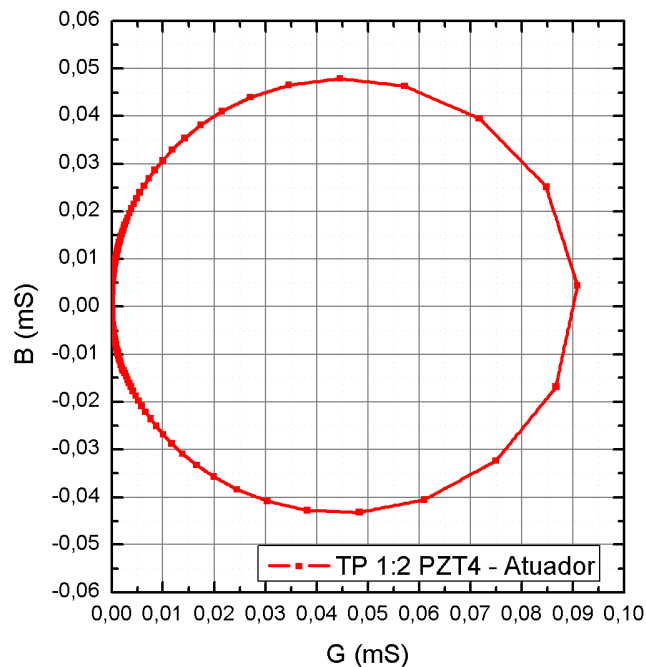


Figura 5. 7: Círculo de admitância referente ao elemento PZT 4, lado primário (duas camadas) e o secundário (uma camada) em curto.

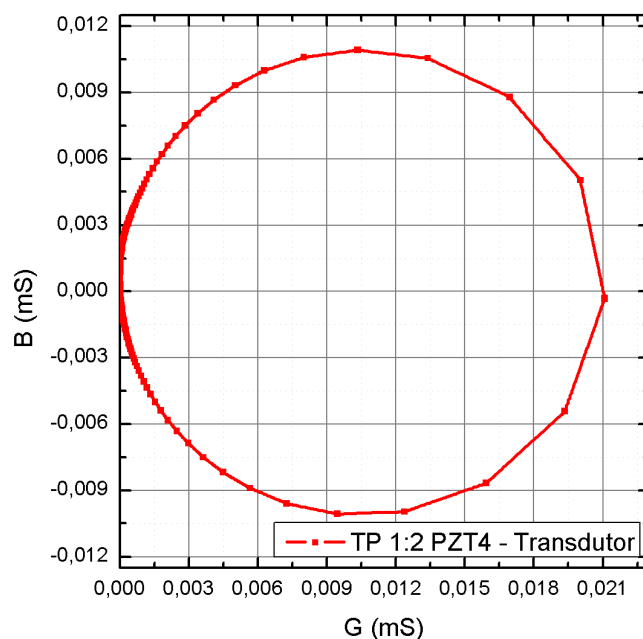


Figura 5. 8: Círculo de admitância referente ao elemento PZT 4, lado primário (duas camadas) e o secundário (uma camada) em curto.

Desse modo obtemos os seguintes valores medidos:

Parâmetros do Circuito Equivalente – TP PZT4 1:2.		
	Medido	Simulado
C (nF)	0,85	1,2
L (mH)	21,6	11
R (Ω)	11	5,8
C _{d1} (nF)	5,66	6,7
C _{d2} (nF)	2,96	3,4
N	2,06	2

Tabela 5. 1: Parâmetros medidos e simulados do circuito equivalente para o TP PZT4 1:2.

A Tabela 5.1 compara os dados dos parâmetros do circuito equivalente (Figura 5.9) medidos e simulados, para este tipo de TP. Note que alguns valores simulados e medidos não conferem com exatidão uma vez que estamos desconsiderando nestes valores as perdas mecânicas que existem no TP construído.

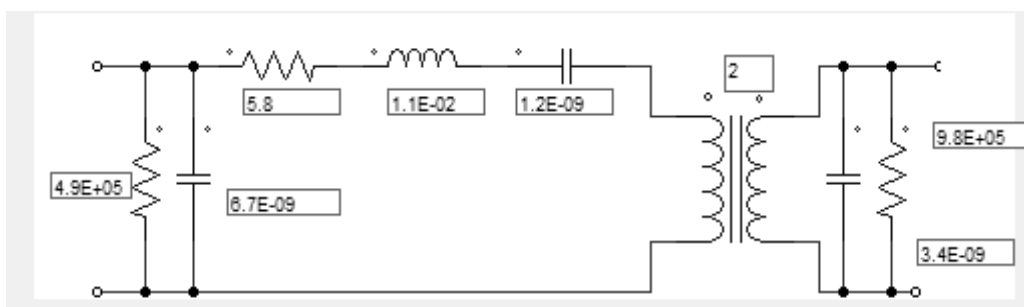


Figura 5. 9: Circuito equivalente simulado pelo Programa Simulador dos Transformadores para o TP PZT4 1:2.

Apesar de apresentar grandes discrepâncias entre os valores, podemos dizer que os valores medidos são mais verdadeiros e confiáveis, até porque, os valores simulados dependem de dados geométricos dos elementos cerâmicos, ou seja, uma vez que analisamos um elemento tipo disco com furo (Discs with Holes) e aplicamos às equações do modelo tipo disco, isso pode justificar esta diferença nos valores. Além disso, entre os próprios fabricantes há divergência de dados entre as constantes, [24, 31].

5.4 - Curvas de caracterização para o TP PZT5A – Tipo Disco

As figuras que agora seguem apresentam curvas características de TP construídos com elementos cerâmicos PZT5A tipo disco com vibração em modo radial.

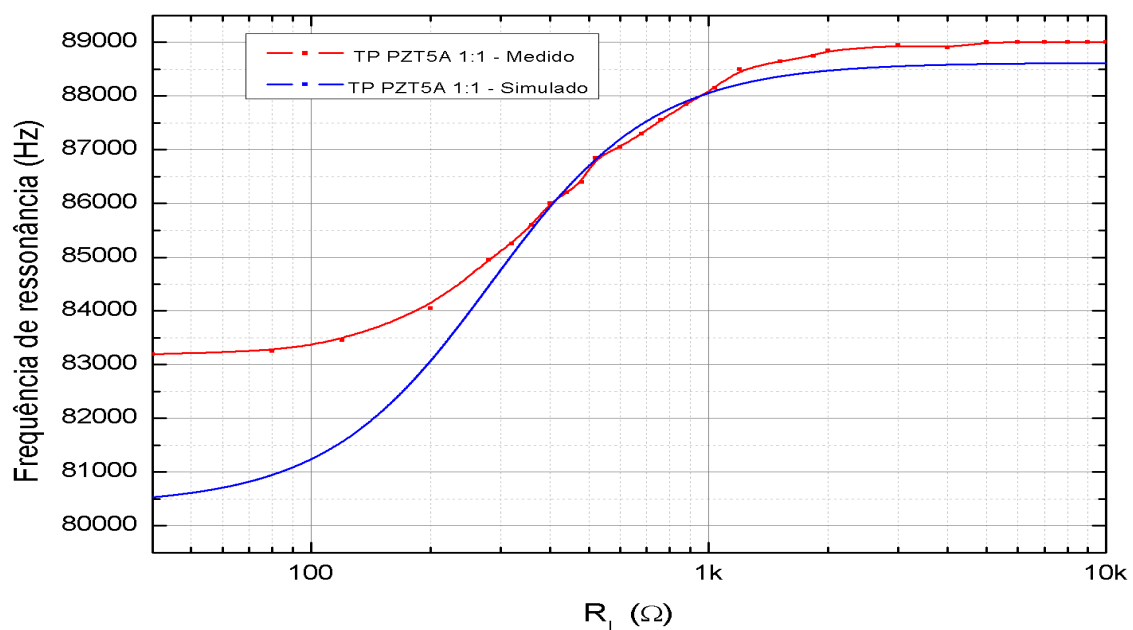


Figura 5. 10: Curva da frequência versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada cada lado (1:1).

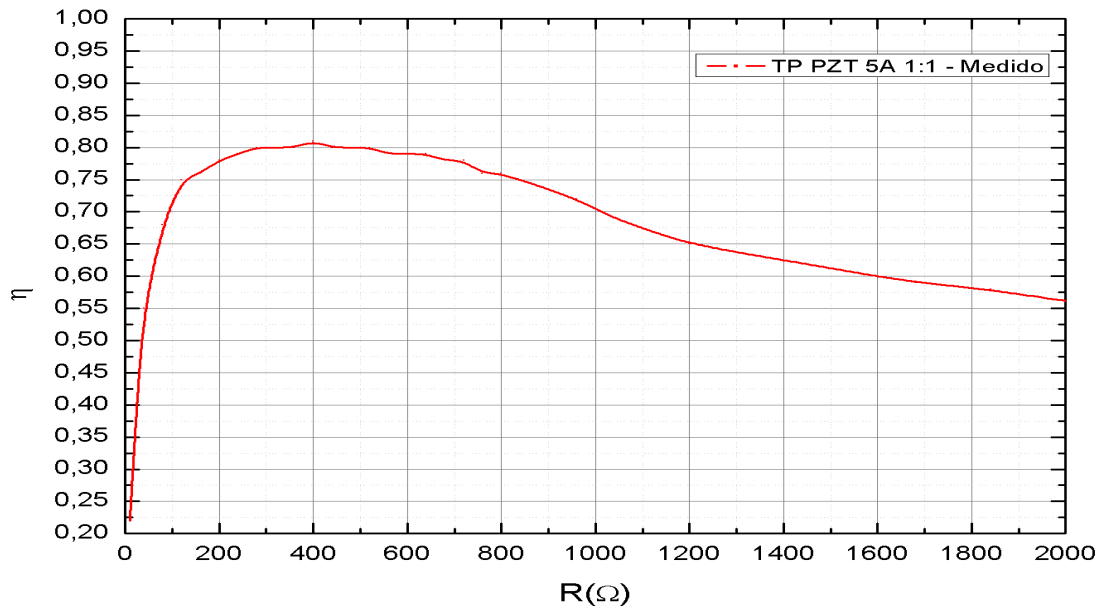


Figura 5. 11: Curva da eficiência versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada cada lado (1:1).

Verifica-se na Figura 5.10 um gráfico de frequência versus carga, onde se observa o mesmo comportamento entre o dado simulado e o dado medido, todavia com algumas discrepâncias de frequência mais acentuadas em baixas frequências. Por sua vez, a frequência de ressonância aumenta com o valor da carga no secundário do transformador. Na Figura 5.11 podemos observar o comportamento da eficiência em função da carga R_L . Como se observa na figura 5.10, a frequência de ressonância muda de valor com a carga, e isto afeta a eficiência. Para a medida de eficiência, foi mantido uma frequência fixa e variou-se a carga. Observou – se que neste caso, o TP PZT5A apresenta uma eficiência de 0,81 (81%) para uma carga de 440 Ω . Antes e depois desta região de carga a eficiência é menor. Isto nos leva a crer que otimizaríamos muito nosso TP se utilizássemos o mesmo à carga adequada. Para buscarmos isso, devemos utilizar as equações do CAPÍTULO 3, 3.54 e 3.55. Na Figura 5.12 podemos observar a eficiência com gráfico em escala logarítmica, para melhor visualização do ponto de máximo.

Temos na Figura 5.12 um pico de eficiência medida menor do que o valor simulado, isso pode ser justificado por uma simples divergência nos parâmetros físicos do TP, uma vez que os dados utilizados para cada cerâmica são tabelados e apresentam até 20% de diferença dos dados do fabricante.

Mesmo com um bom resultado de eficiência apresentado, este tipo de TP apresenta graves problemas, como por exemplo, baixo ganho de tensão e baixa potência

de saída. Nota-se ainda que conforme aumenta a tensão de entrada, sua eficiência diminui e a cerâmica aumenta sua temperatura, provavelmente por perdas dielétricas condutivas.

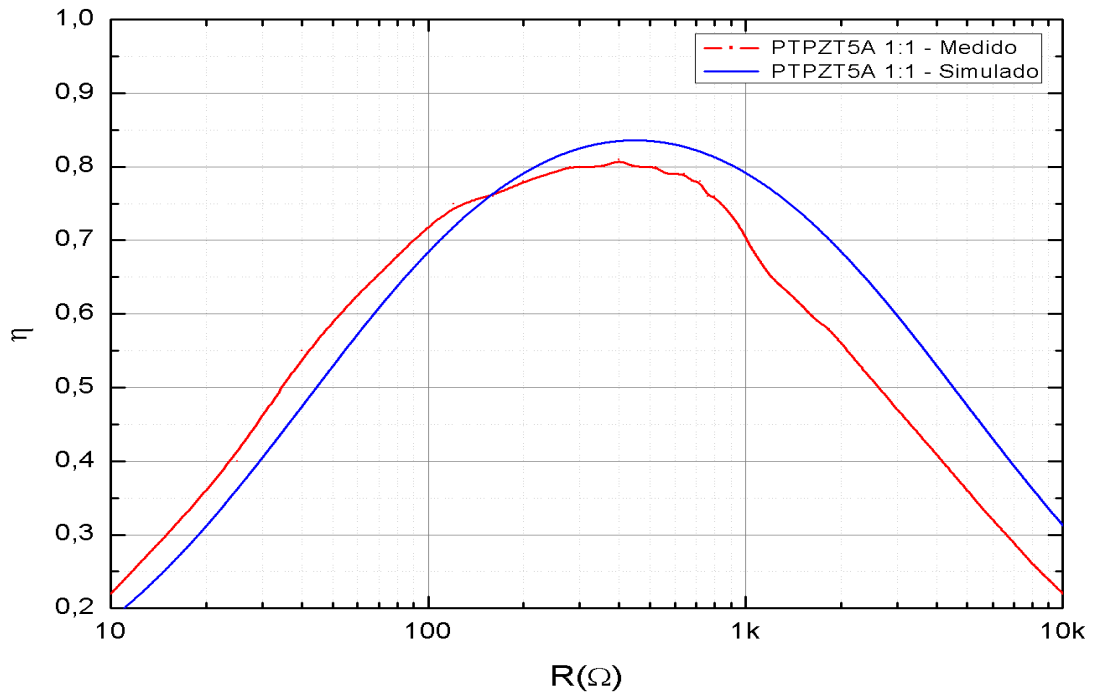


Figura 5. 12: Curvas da eficiência versus carga, simulado e medido, para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada de cada lado (1:1).

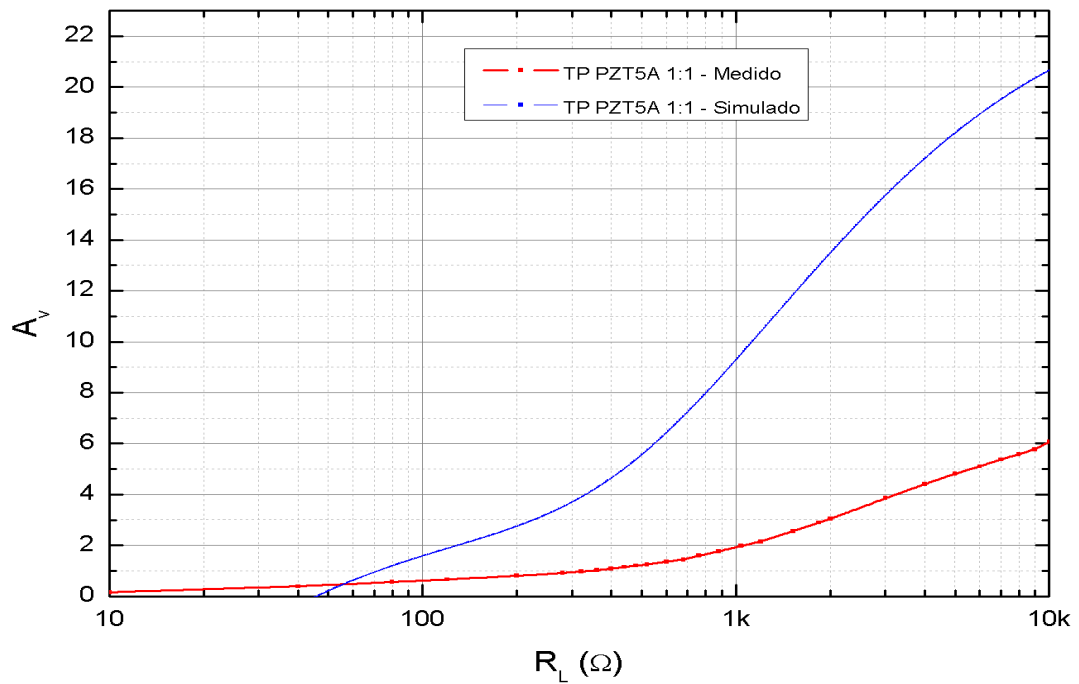


Figura 5. 13: Curvas do ganho de tensão versus carga, simulado e medido, para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada de cada lado (1:1).

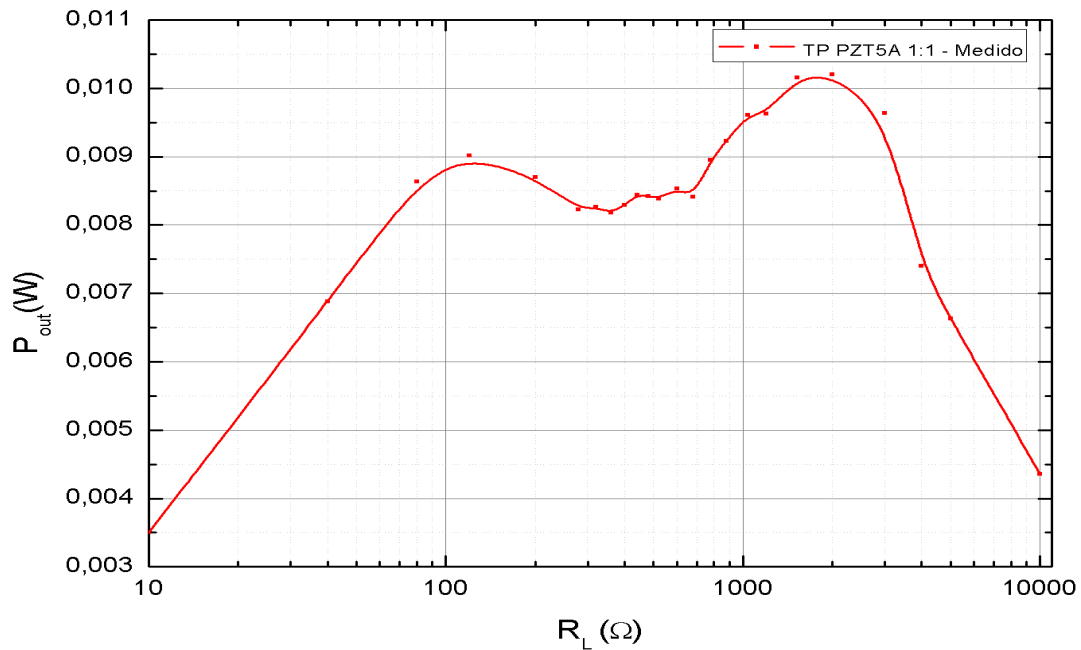


Figura 5. 14: Curva da Potência de saída versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada cada lado (1:1). Considerando a tensão de entrada (V_{in}) constante.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam o ganho de tensão e a potência em função da carga para o TP PZT5A 1:1. Fizemos estas medidas para o TP de duas camadas somente para efeito de comparação com as medidas futuras do TP de três camadas e verificação das suas diferenças e vantagens em se montar TP de duas camadas ou de multicamadas.

Para este uma tensão de 1Vrms no TP PZT5A 1:1, a potência de saída para a carga otimizada fica próximo de 8,4mW o que é muito baixa. É justamente pensando em resolver estes tipos de problemas apresentados, que foi desenvolvido os TPs multicamadas. A Figura 5.15 e 5.16 mostra que ao colocarmos duas cerâmicas como primário (atuador) temos uma melhor resposta, considerando a mesma carga de 400 Ω e mesma tensão aplicada.

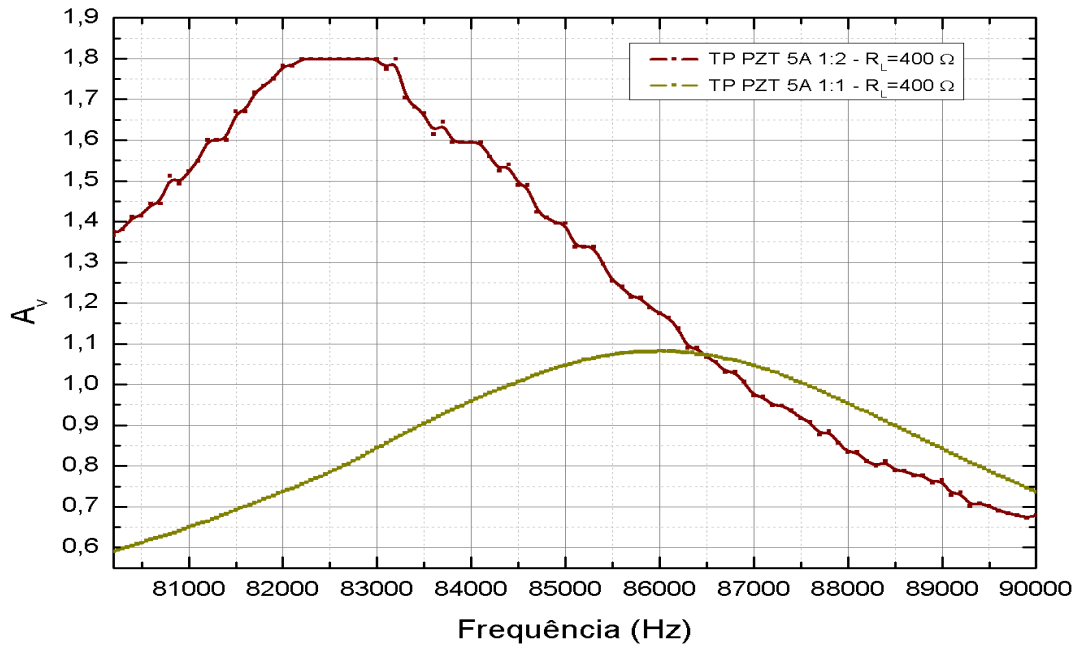


Figura 5. 15: Curvas confrontando o ganho de tensão medido versus frequência para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada cada lado (1:1) e para um Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com duas camadas como atuador (1:2) e resistência de carga fixa $400\ \Omega$.

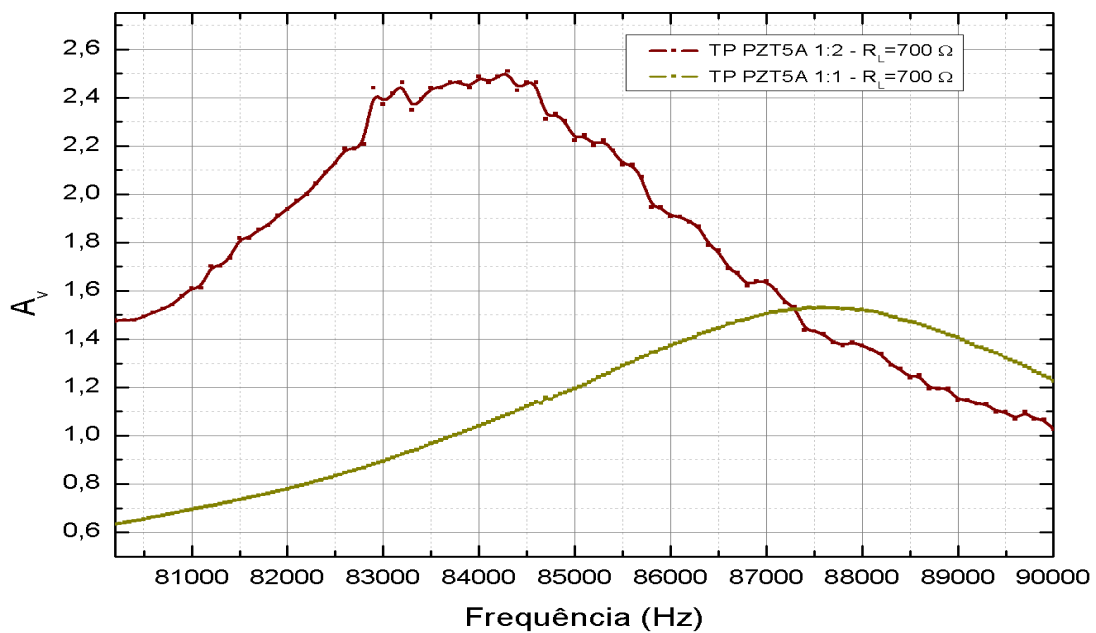


Figura 5. 16: Curvas confrontando o ganho de tensão medido versus frequência para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com uma única camada cada lado (1:1) e para um Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com duas camadas como atuador (1:2) e resistência de carga fixa $700\ \Omega$.

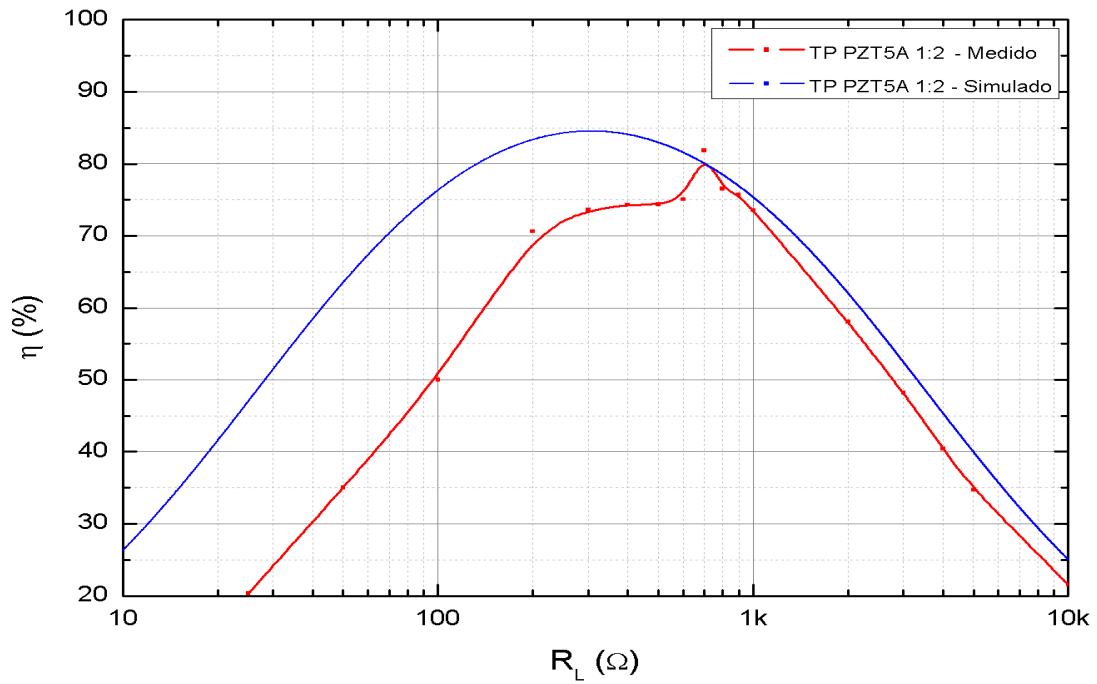


Figura 5. 17: Curvas confrontando a eficiência versus carga com valores medidos e simulados, para valores de frequência onde ocorre o máximo ganho de tensão.

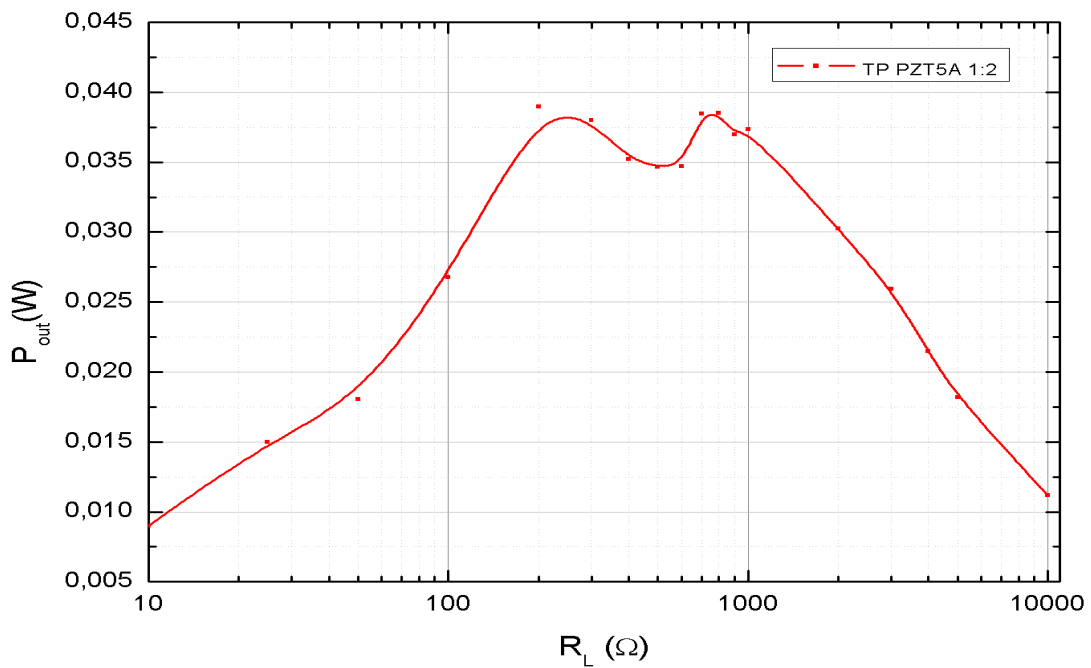


Figura 5. 18: Curva da Potência de saída versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A com duas camadas no atuador (1:2).

A Figura 5.17 confronta a curva a eficiência versus carga com valores medidos e simulados, para valores de frequência onde ocorre o máximo ganho de tensão. É importante observar que a eficiência neste caso cai para aproximadamente 75% para a

mesma carga que antes (400Ω). Isso se deve as perdas na montagem, como por exemplo, colagem, camada de isolamento, eletrodos, estanho, etc.

Já a Figura 5.18 apresenta curva da potência de saída versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A. Nota-se que a potência de saída passou de 8,4 mW para 35 mW.

5.5 - Curvas de caracterização para o TP PZT5A – Quadrado

Para este tipo de Transformador realizamos poucas medidas, motivo pelo qual já foi dito, baixa eficiência, devido suas formas geométricas que originam modos espúrios de vibração (ver Figura 5.21). Quando adicionamos outra camada, a eficiência diminuiu mais ainda. Note pela Figura 5.19, que a eficiência do TP PZT5A - 20 mm x 20 mm com uma única camada cada lado chega ao máximo a 80%.

Outra característica que nos desmotivou o uso de cerâmicas PZT5A quadradas foi o baixo ganho de tensão e baixa potência de saída, como pode ser visto respectivamente nas Figuras 5.20 e 5.22.

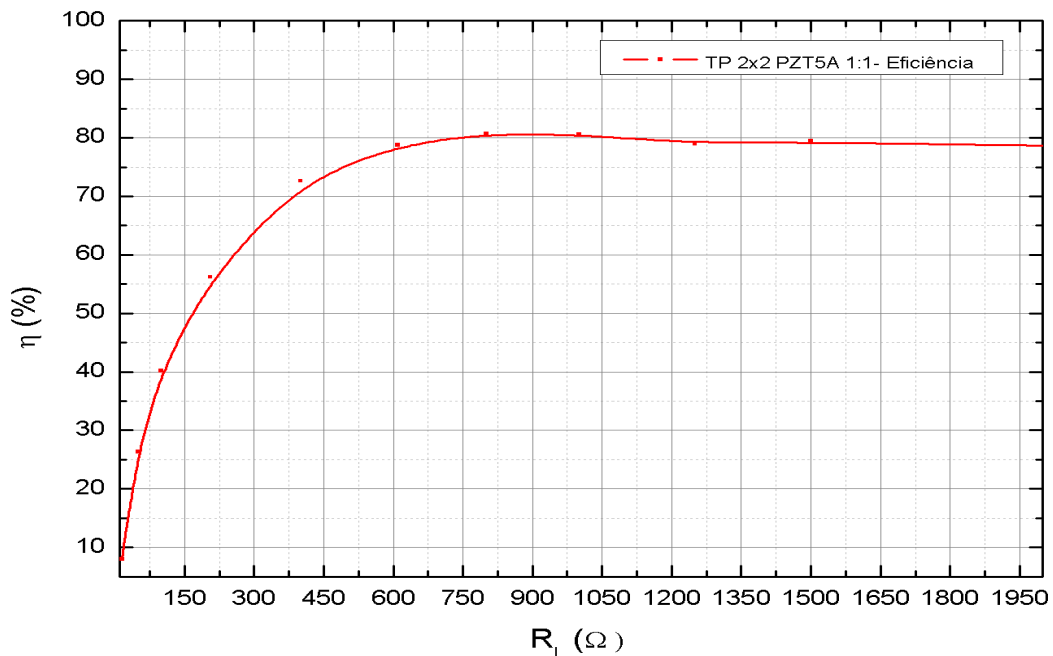


Figura 5. 19: Curva da eficiência versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A - 20 mm x 20 mm com uma única camada cada lado (1:1).

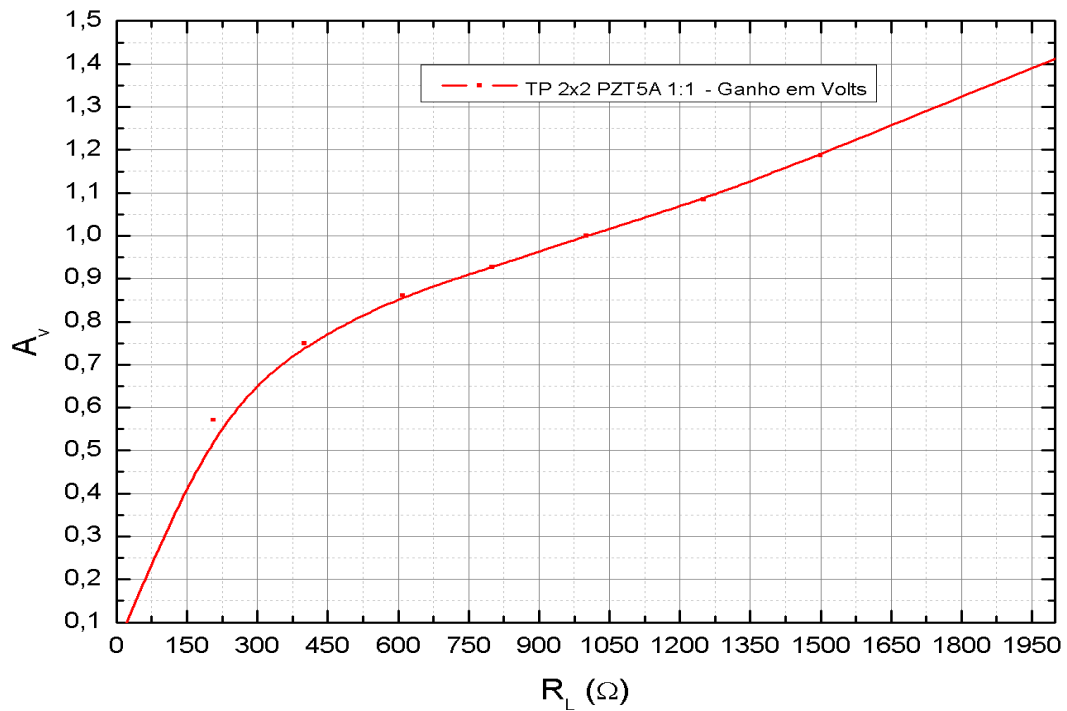


Figura 5. 20: Curva do ganho de tensão versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A - 20 mm x 20 mm com uma única camada cada lado (1:1).

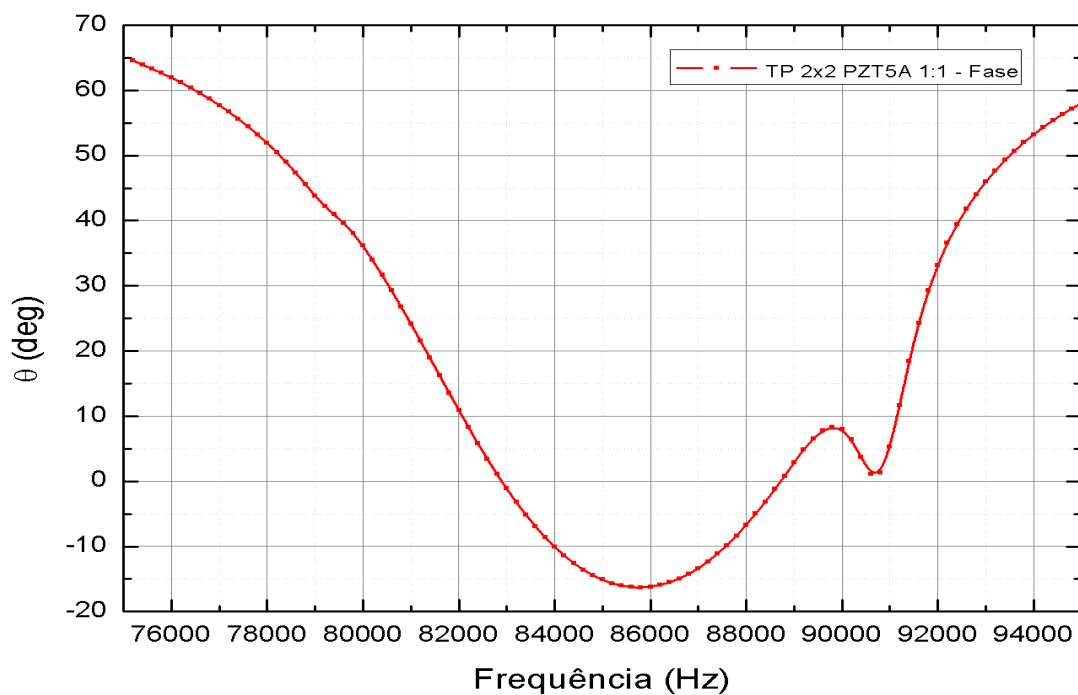


Figura 5. 21: Curva da fase (em deg) versus frequência para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A - 20 mm x 20 mm com uma única camada cada lado (1:1).

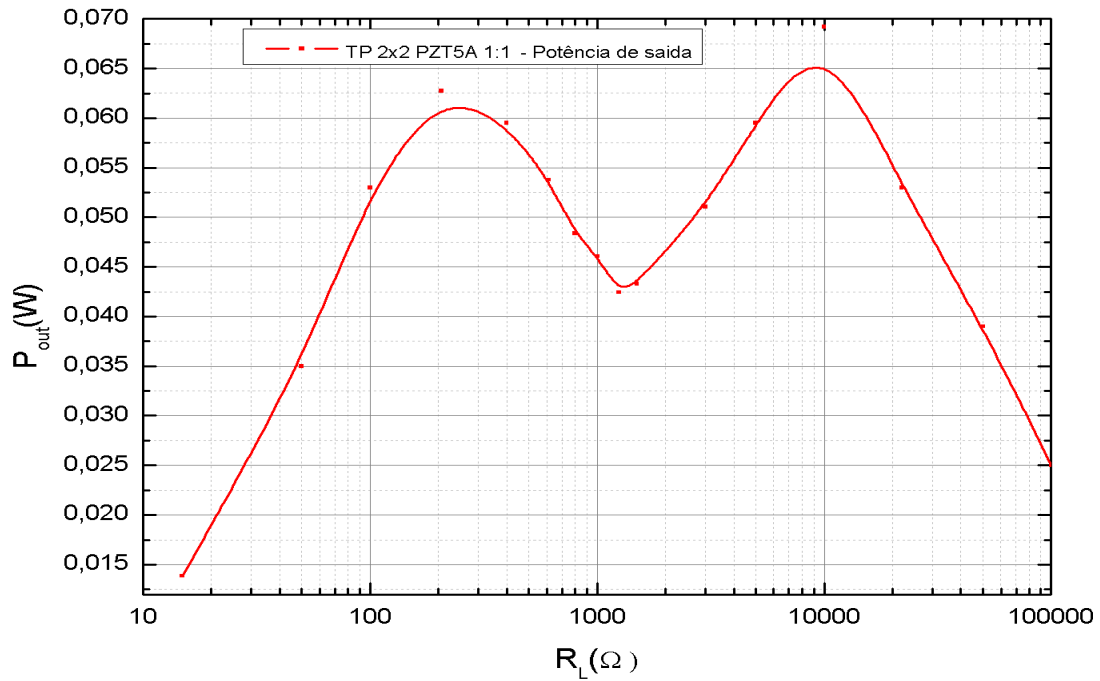


Figura 5. 22: Curva da Potência de saída versus carga para o Transformador Piezoelétrico (TP) PZT5A 20 mm x 20 mm com uma única camada cada lado (1:1).

5.6 - Curvas de caracterização para o TP PZT4 – Tipo Disco com furo no centro.

Para os Transformadores de PZT4 temos as seguintes Figuras:

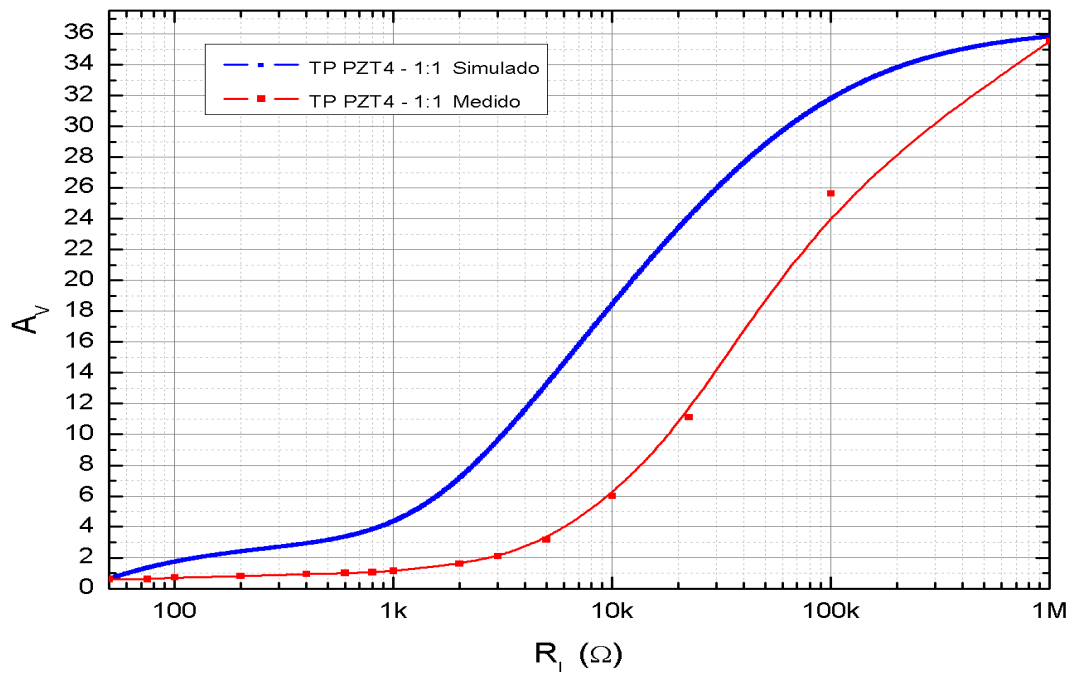


Figura 5. 23: Curvas confrontando o ganho de tensão versus carga, simulado e medido, para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:1).

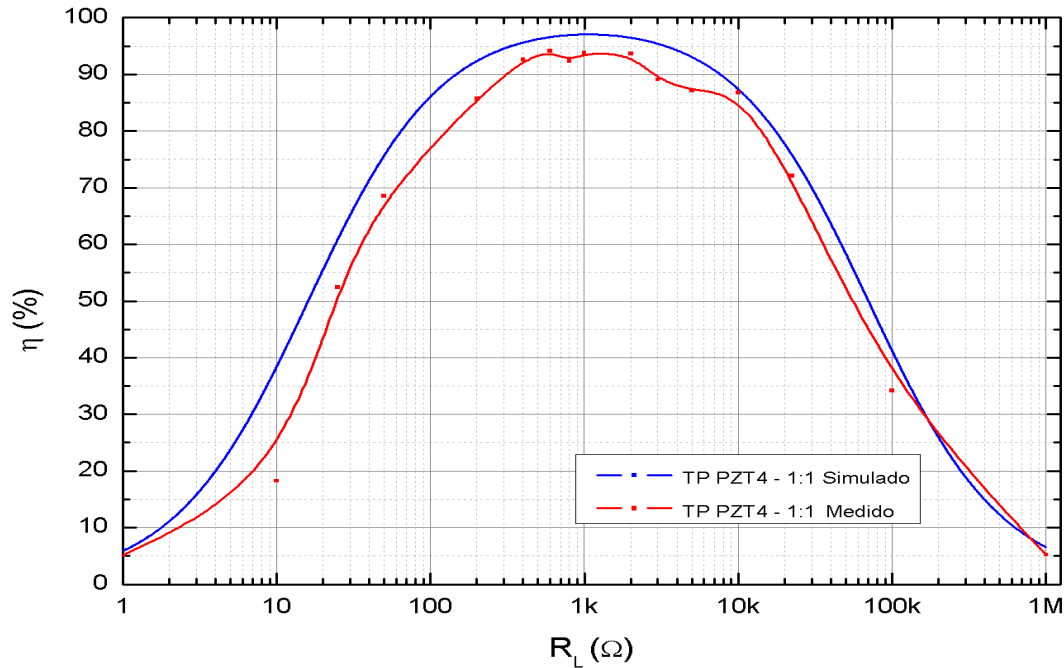


Figura 5. 24: Curvas confrontando a eficiência versus carga, simulado e medido, para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:1).

No gráfico de eficiência versus carga para o TP PZT4 1:1 apresentado na Figura 5.24, podemos observar que a eficiência medida chega a 94,13% para uma carga R_L de 600 Ω , valor este, que se aproxima muito bem do valor simulado que para esta mesma carga é de 96,64%.

A seguir podemos ver na Figura 5.24 um gráfico muito interessante comparando o dados medidos e simulados (com os parâmetros meramente físicos) do TP PZT4 1:1 (monocamada), potência de saída por carga, que vai de aproximadamente 60mW (na carga de máxima transferência de potência) até 150 mW para cargas próximas.

Mas nenhum outro é mais interessante que os gráficos das figuras 6.26 e 6.27 que confronta de ganho de tensão entre o TP PZT4 1:1 (monocamadas) e o TP PZT4 1:2 (duas camadas no atuador).

Já a Figura 5.28, mostra o comportamento da fase para este tipo de cerâmica (disco, sem modos espúrios) em função da frequência. A fase comparada à frequência nos dá uma ideia de como deve trabalhar o TP, ou seja, puramente resistivo, indutivo ou capacitivo.

Além disso, nas Figuras 5.29 e 5.30 podemos ver como a impedância aumenta quando inserimos mais uma camada no atuador, uma vez que ao adicionar mais camadas teremos novas impedâncias em paralelo.

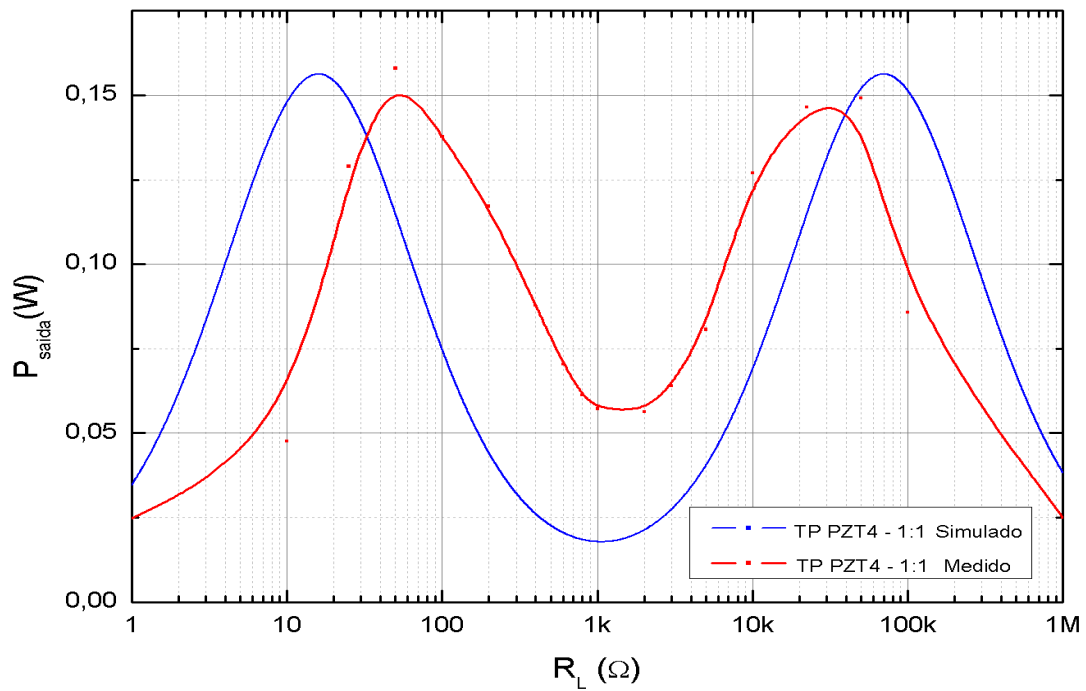


Figura 5. 25: Curvas confrontando a potência de saída versus carga, simulado e medido, para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:1).

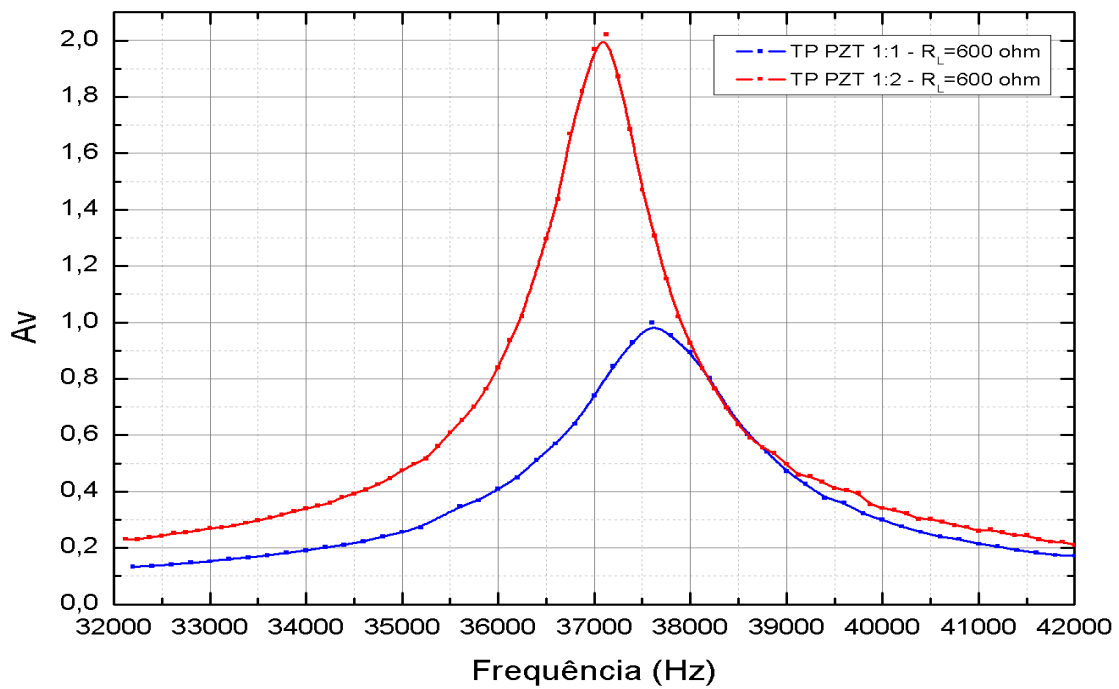


Figura 5. 26: Curvas confrontando o ganho de tensão versus frequência para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:1) e para um TP PZT4 com duas camadas como atuador (1:2) e resistência de carga fixa 600 Ω .

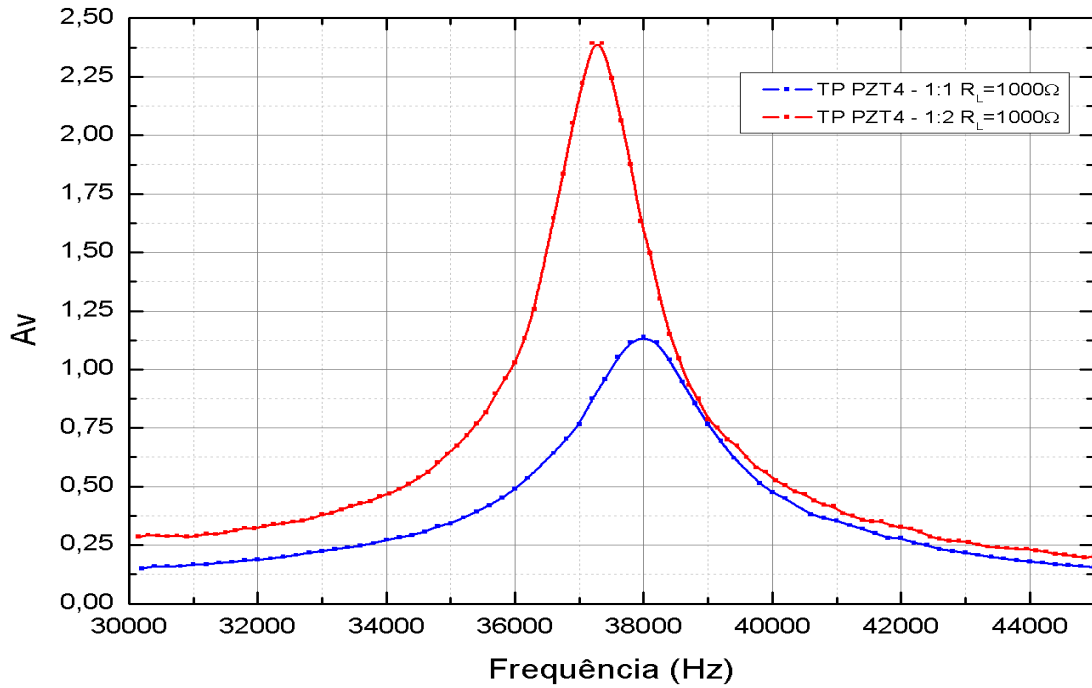


Figura 5. 27: Curvas confrontando o ganho de tensão medido versus frequência para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:1) e para um TP PZT4 com duas camadas como atuador (1:2) e resistência de carga fixa 1000Ω .

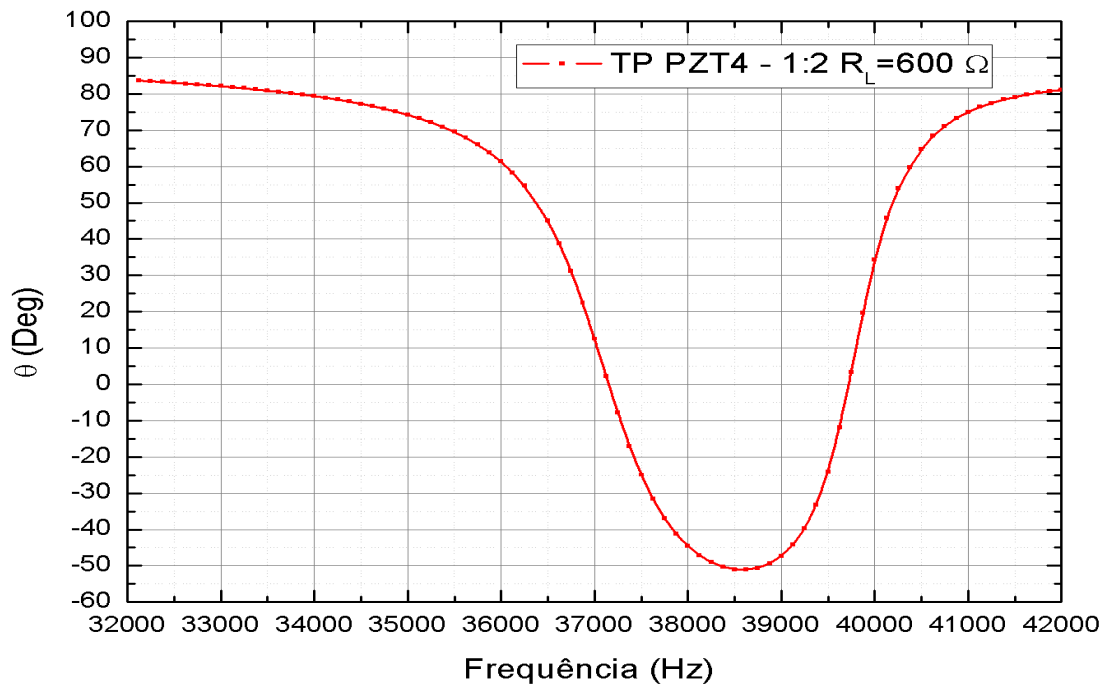


Figura 5. 28: Curva da fase medida (em deg) versus frequência para o TP PZT4 1:2.

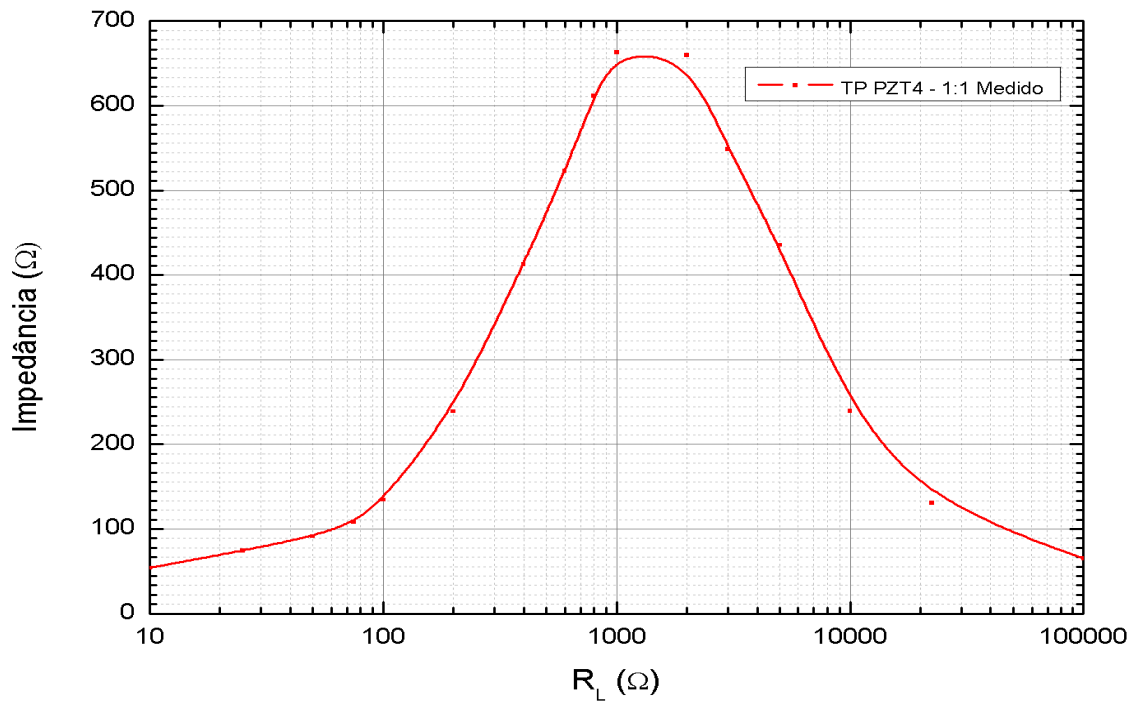


Figura 5. 29: Curva da impedância versus carga para o TP PZT4 1:1.

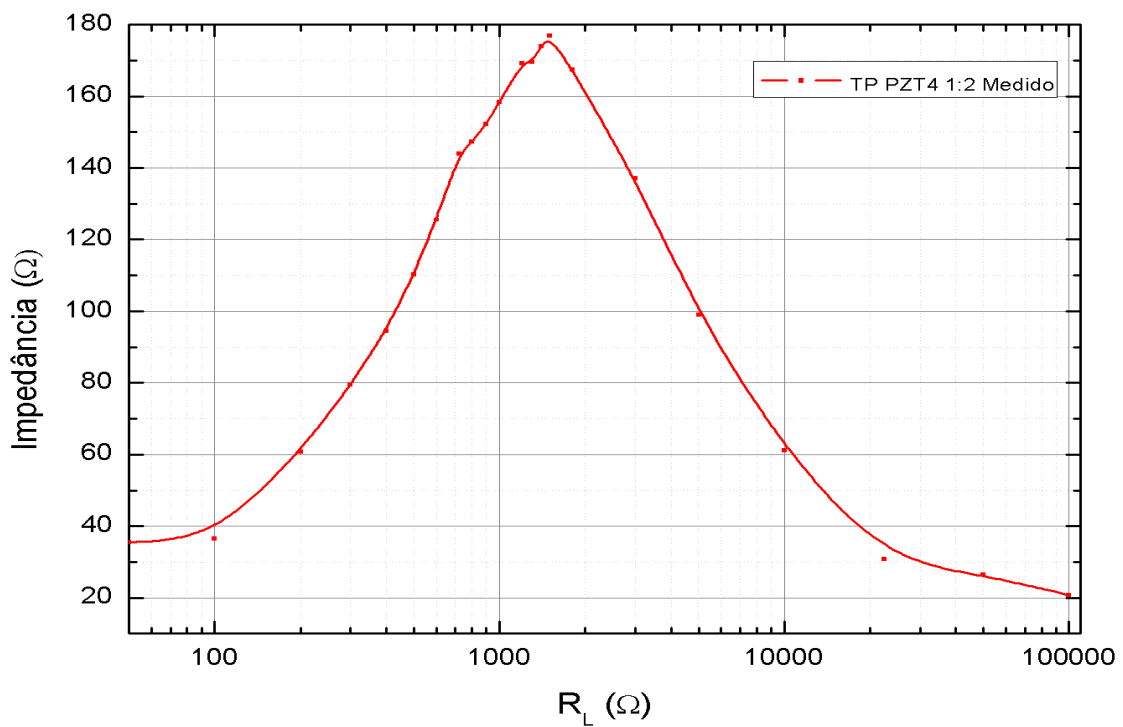


Figura 5. 30: Curva da impedância medida versus carga para o TP PZT4 1:2.

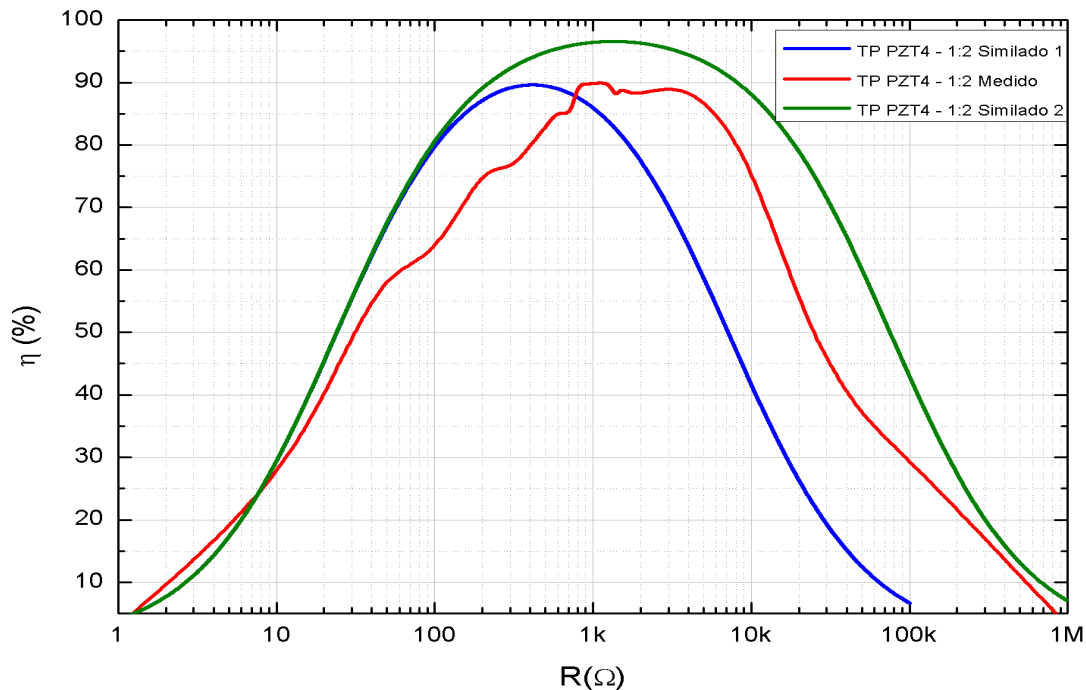


Figura 5. 31: Curvas confrontando a eficiência versus carga, simulado e medido, para o TP PZT4 com duas cerâmicas atuadoras e uma transdutora (1:2).

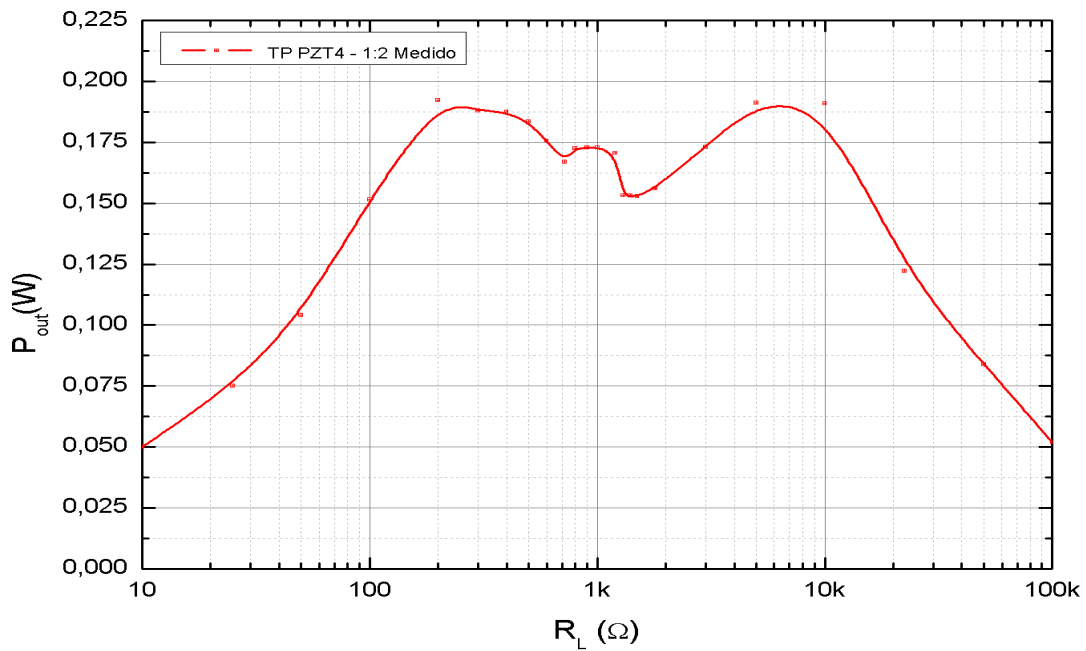
No gráfico de eficiência versus carga para o TP PZT4 1:2 apresentado na Figura 5.31, podemos observar três curvas de eficiência. A curva em azul (TP PZT -1:2 Simulado 1) apresenta uma eficiência de 0.9 (90%), simulada quando consideramos duas cerâmicas de 5 mm de espessura cada uma unidas para formar o lado primário do TP. A curva em verde (TP PZT -1:2 Simulado 2) apresenta uma eficiência de 0.96 (96%), simulada quando consideramos uma única cerâmica de 10 mm de espessura. Por fim, a curva em vermelho (TP PZT -1:2 Medido) apresenta uma eficiência próxima de 0.9 (90%), através de dados medidos para uma carga $R_L \cong 1200 \Omega$, valor este, que se aproxima muito bem do valor simulado 1, como era de se esperar.

O fato de trabalhar com cerâmicas únicas e espessas (simulação 2) minimizam as perdas mecânicas, melhorando alguns aspectos, como por exemplo, a eficiência, mas por outro lado, o elemento é mais difícil de ser excitado e diminui o ganho de tensão com relação o modelo de multicamadas (Simulação 1).

Já na Figura 5.32 a potência de saída pode ser analisada, para o TP PZT4 1:1 (monocamada) era de 70,4mW (para uma carga de 600 Ω) e para o TP PZT4 1:2 a potência vai a 170,60 mW (para uma carga igual a 1200 Ω).

A grande vantagem deste projeto multicamadas está no ganho de tensão, que por sua vez, dobra a cada camada (igual à primeira) que inserimos no atuador, como

podemos ver na Figura 5.33. Devemos ainda ressaltar que com a inserção de uma nova camada, a carga onde ocorre a máxima transferência de potência também muda devido à impedância de entrada ter sido alterada, ver Figuras 5.26 e 5.27.



Fig

ura 5. 32: Curvas confrontando a potência de saída versus carga, simulado e medido, para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:2).

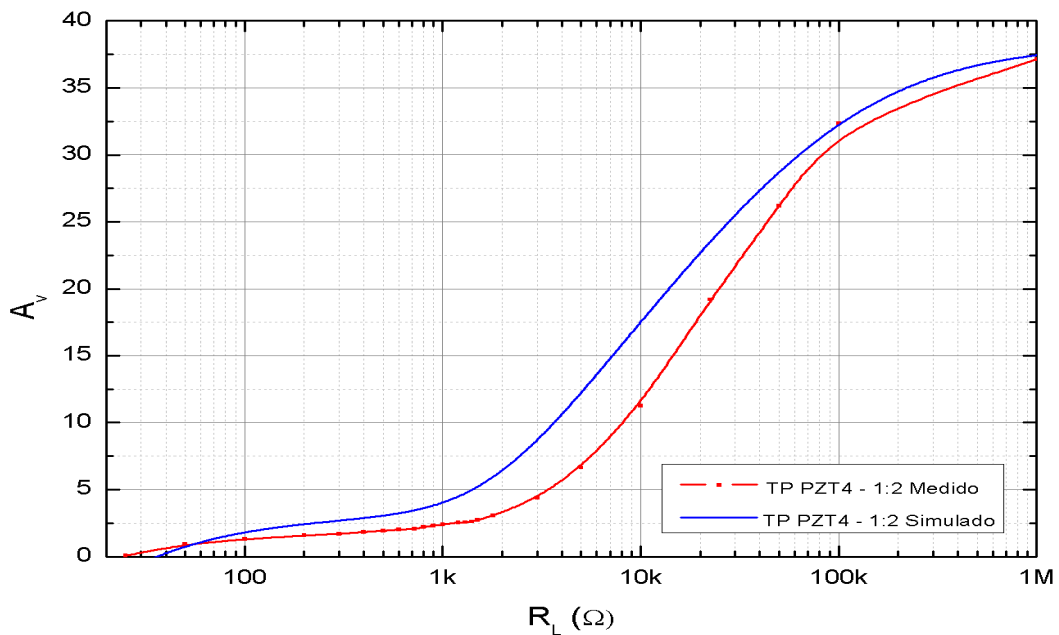


Figura 5. 33: Curvas confrontando o ganho de tensão versus carga, simulado e medido, para o TP PZT4 com uma única camada cada lado (1:2).

Gráficos como 5.23, 5.26, 5.27 e 5.33 nos faz pensar, até quantas camadas eu posso colocar? Depende, responderíamos, qual a tensão que necessita? Em que frequência deseja trabalhar? Qual a tensão de entrada? E etc. Cada vez que adicionamos uma camada, ganha-se tensão, porém esse aumento de camadas acarreta perdas de energia transferida de uma camada para outra, diminuindo a eficiência como aconteceu no TP PZT4 1:2.

De modo geral, os resultados obtidos para o modelo teórico por meio da caracterização física, apresentaram algumas discordâncias com relação os valores medidos. Em parte, essas discrepâncias podem ser compreendidas observando que o fabricante da cerâmica especifica uma variação de até $\pm 20\%$ para os parâmetros de suas cerâmicas de PZT. Além disso, deve ser observado que o modelo empregado admite algumas simplificações, sendo que a mais importante refere-se ao método de colagem e o isolamento entre os elementos piezoelétricos que não foram levados em conta. Por outro lado o objetivo deste trabalho é trabalhar sempre com cerâmicas disponíveis no mercado, obedecendo os padrões de seus fabricantes.

5.7 - Análises do ganho dos TPs para cargas resistivas

O circuito básico da Figura 5.34, descreve o circuito do TP com tensão elétrica aplicada na entrada do Transformador Piezoelétrico protótipo (TP PZT4 1:2). Nas Figuras 5.34A, 5.34B e 5.34C podemos também observar algumas simulações realizadas em ambiente pspice (simuladores de circuitos), de um inversor de alta frequência, chaveado em ponte completa, aplicando uma tensão quadrada, simétrica no circuito do TP, conforme Figura 5.34.

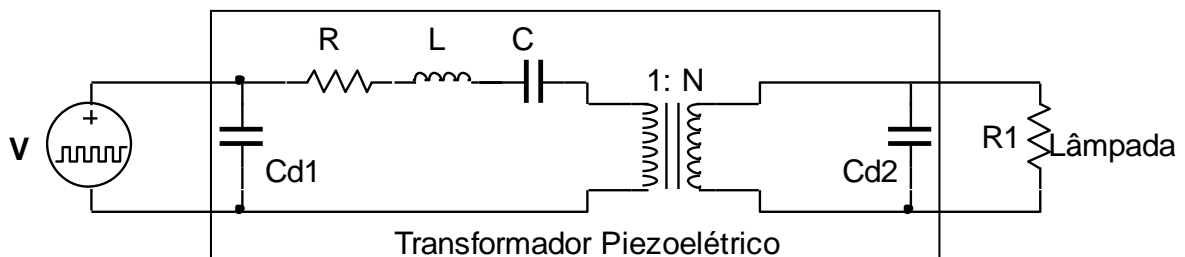


Figura 5. 34: Circuito simplificado do reator para a lâmpada fluorescente.

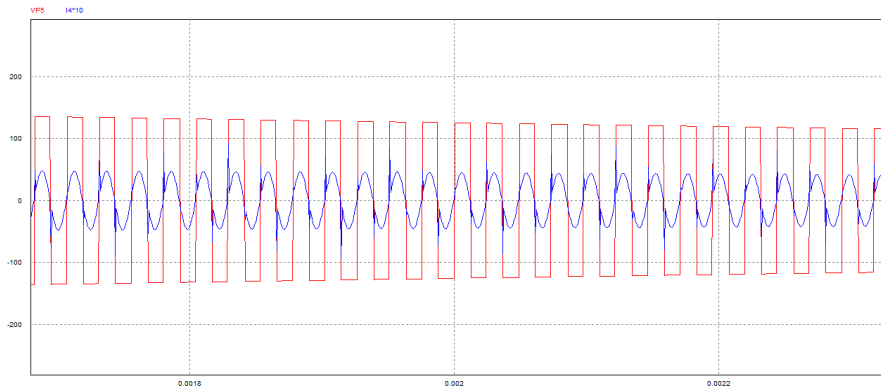


Figura 5. 35: Simulação para a tensão e corrente de saída do inversor DC/AC, de ponte completa, chaveado na frequência de ressonância, aplicado no TP com carga resistiva.

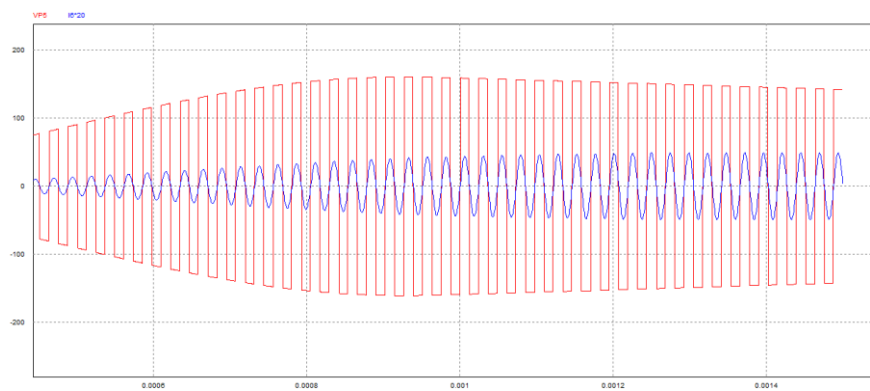


Figura 5. 36: Simulação para a tensão de entrada de um conversor DC/AC chaveado na frequência de ressonância do TP e corrente na carga resistiva de 100Ω na saída do TP em fase com a tensão.

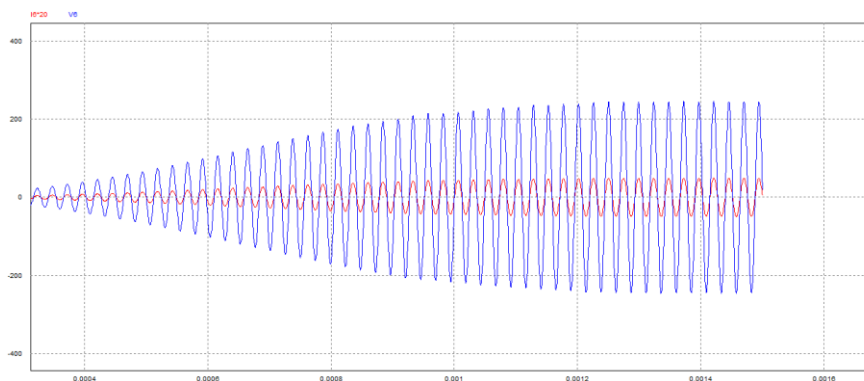


Figura 5. 37: Simulação para a tensão e corrente na carga resistiva de 100Ω em fase na saída do TP, chaveado por conversor DC/AC de ponte completa.

Podemos observar nas simulações, das figuras 5.34A, 5.34B, 5.34C, que a corrente e tensão estão em fase quando se aplica uma tensão quadrada, na frequência

próxima a frequência de ressonância do TP. Seguindo as simulações, montamos um inversor, chaveado em ponte completa, de modo a produzir uma tensão quadrada simétrica, de 110V, de alta frequência, onde fizemos testes com resistores de valor fixo como carga, simulando uma carga resistiva imposta por uma lâmpada fluorescente, modelando uma lâmpadas florescentes como carga. Aplicamos a tensão da rede de 110V para alimentação do circuito inversor chaveado em ponte completa, que após retificação DC e atuação de circuitos drives de comando de uma ponte completa, produziu uma tensão elétrica de onda quadrada, conforme se observa na figura 5.35. Consequentemente foi aplicada uma tensão elétrica eficaz de aproximadamente 104 Vrms, conforme Eq. 5.1. As medidas foram realizadas com pontas de provas de tensão e corrente, isoladas da marca Tektronix e osciloscópio Agilent HP DSO 3202A.

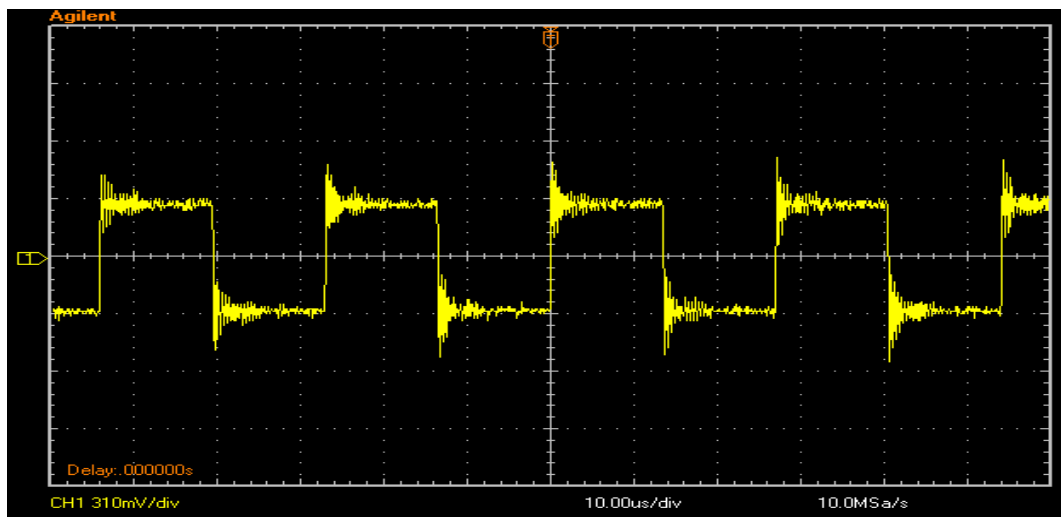


Figura 5. 38 – Tela do Osciloscópio registrando a tensão de entrada no TP.

$$V_{rms} = \frac{V_{p-p}}{\sqrt{2}} \quad (5.1)$$

1º Caso: Para $R = 180 \text{ k}\Omega$, obtivemos pela equação 5.1 uma tensão na saída do TP igual a 330 Vrms, ou seja, um pouco maior que 3,0 vezes o valor da entrada.

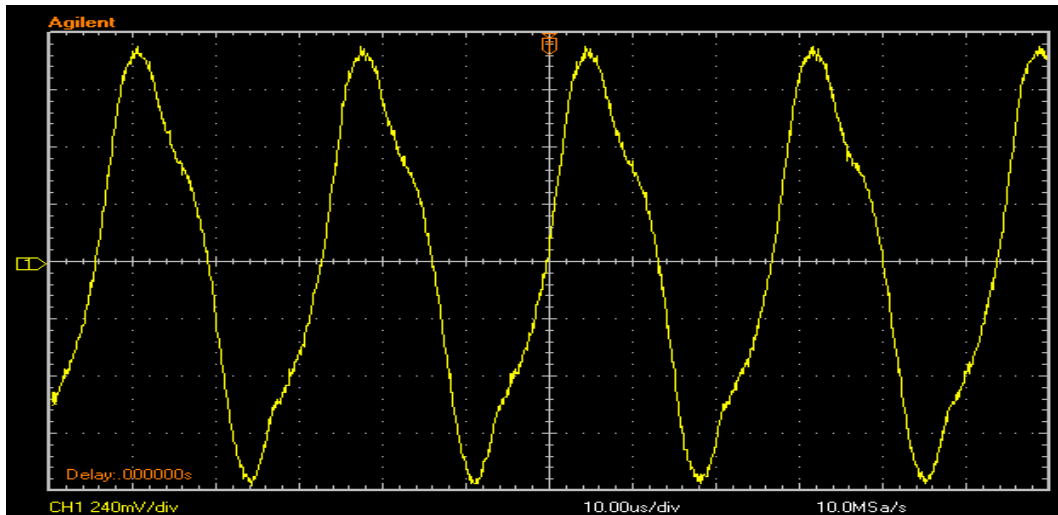


Figura 5. 39 - Tela do Osciloscópio registrando a tensão na carga ($R = 180 \text{ k}\Omega$).

2º Caso: Para $R = 1.1 \text{ k}\Omega$, obtivemos pela equação 5.1 uma tensão de saída igual a 301 Vrms, ou seja, quase 2,9 vezes o valor da entrada.

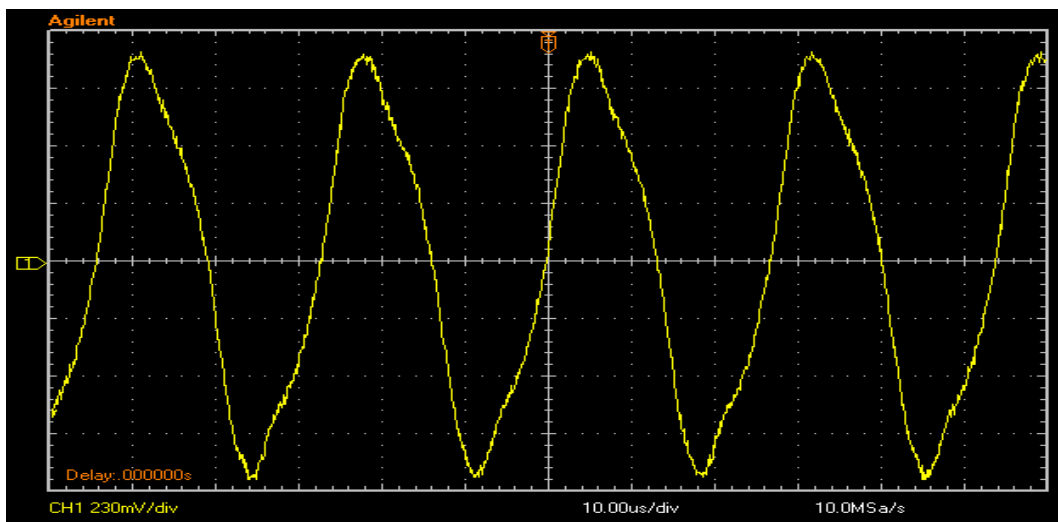


Figura 5. 40 - Tela do Osciloscópio registrando a tensão na carga ($R = 1,1 \text{ k}\Omega$).

3º Caso: Para $R = 220 \Omega$, obtemos pela equação 6.1 uma tensão de saída igual a 127 Vrms, ou seja, 1,2 vezes maior que a tensão de entrada.

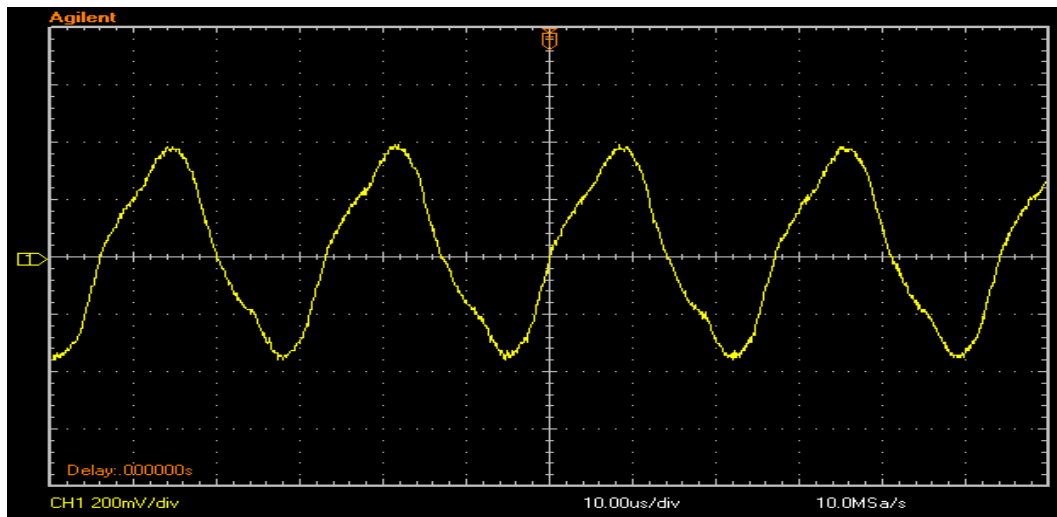


Figura 5. 41 – Tela do Osciloscópio registrando a tensão na carga ($R = 220 \Omega$).

Para fechar esta discussão podemos ainda, relacionar estes dados obtidos como os gráficos 5.36, 5.37 e 5.38, que apontam os ganhos de tensão para diferentes cargas, porém com uma tensão extremamente baixa (1 Vrms) comparada a esta última medida. De modo que na prática, para aplicação em alta potência, temos uma grande divergência dos valores medidos e simulados, uma vez que o TP está submetido a uma tensão maior e a exigência de corrente elétrica deixa sua eficiência menor, principalmente devido ao aquecimento do mesmo. O uso em altas potências aquece a cerâmica e este aquecimento diminui a eficiência das mesmas. Todavia, uso do TP apresenta ainda uma grande vantagem, por não ter um ganho de tensão fixo quando mudamos a carga. Esta é uma grande vantagem nas aplicações em reatores de lâmpadas fluorescentes, que apresentam resistência de plasma alta durante a ignição do plasma e baixa após estabelecimento do plasma no tubo da lâmpada.

5.8 - Aplicações de TP para reatores de Lâmpadas Fluorescentes

As lâmpadas fluorescentes funcionam de modo semelhante aos tubos de descarga de gás néon. E composta por um tubo de vidro coberto com um material à base de fósforo que emite luz visível quando é excitado pelo gás no interior do tubo. Além da cobertura de fósforo, existem eletrodos em forma de filamentos nas suas extremidades. Sua função é pré-aquecer seu interior para reduzir a tensão elétrica necessária à ionização, dando a partida no processo de bombardeamento por íons positivos dos gases no interior do tubo. Quando a composição interna for à base de vapor de mercúrio, portanto não condutiva, deve ser aplicado um gradiente de tensão de algumas centenas

de volts ao mesmo tempo em que as extremidades são aquecidas. Acontecendo a descarga iônica, portanto a emissão de luz U.V (choque dos elétrons com as moléculas de mercúrio), excitando o fósforo da parede do tubo de vidro, não mais necessitando de alta tensão entre os extremos do tubo, sendo reduzida para menos de 100 V (lâmpadas de baixa potência) e no máximo 175 V (lâmpadas de alta potência). A intensidade de corrente elétrica que passa através dos gases de baixa pressão emite grande quantidade de radiação UV no comprimento de onda de emissão do vapor de mercúrio. Esta é convertida em luz visível pela camada de fósforo que, dependendo da mistura aplicada, dará a tonalidade da coloração emitida.

O uso de um TP no reator da lâmpada fluorescente possui algumas vantagens. O ganho de tensão não constante do TP fornece o método de ignição da lâmpada, pois quando a mesma se encontra desligada sua carga é de aproximadamente $1M\Omega$, proporcionando um alto ganho para o TP [34]. Sendo o ganho de tensão substancialmente grande, o suficiente para abrir ignição do plasma e produzir luz visível. Logo após a ignição do plasma a sua resistência cai para aproximadamente $600\ \Omega$ [34], para uma lâmpada tipo tubo 40W, e assim, o ganho também cai, o suficiente para manter a lâmpada com brilho constante. Buscando essa aplicação, e com os dados fornecidos pela caracterização física dos dispositivos (medidos) e por meio de análises sobre a eficiência de cada tipo de protótipo construído, escolhemos o modelo TP PZT4 1:2 para realizarmos uma aplicação em um circuito reator.

Dados geométricos do protótipo:

$r = 22,5\ \text{mm}$ (raio);

$t_1 = t_2 = t_3 = 5\ \text{mm}$ (espessura dos elementos piezoelétricos)

Parâmetros da cerâmica (PZT4):

$d_{31} = -115 \cdot 10^{-12} \frac{V}{m}$ (fator de acoplamento eletromecânico)

$\sigma = -0,30$ (razão de Poisson)

$S_{11}^E = 12,4 \cdot 10^{-12} \frac{m^2}{N}$ (compliância mecânica em baixo campo elétrico)

$$\frac{\epsilon_{33}^E}{\epsilon_0} = 1250 \text{ (permeabilidade elétrica relativa)}$$

$$\rho = 7600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (densidade)}$$

$$Q_m = 500 \text{ (fator de qualidade mecânico em baixo campo elétrico)}$$

$$\tan \delta = 0,004 \text{ (perdas dielétricas em baixo campo elétrico)}$$

Escolhemos dois modelos diferentes de lâmpada, a compacta e a tubular, conforme mostra as Figuras 5.39 e 5.40, ambas de 20W. Seleccionamos a melhor frequência de operação F_S para essa carga e para as características do protótipo, a fim de maximizar a eficiência. Além disso, uma tensão (V_{TP}), modulada por uma determinada frequência, foi direcionada à entrada do transformador. Por se tratar de uma lâmpada fluorescente comum buscamos aplicar a tensão de 110V proveniente da rede elétrica, suficiente para o TP entregar uma tensão (V_L) a lâmpada capaz de acendê-la. Todos esses dados podem ser reunidos abaixo:

1º Caso: Lâmpada Fluorescente Compacta:

Para esta primeira aplicação tem:

$$F_S = 37,8 \text{ kHz};$$

$$V_{TP} = 123,74 \text{ V}_{\text{rms}};$$

$$V_L = 106 \text{ V}_{\text{rms}} \text{ (depois da ignição);}$$

$$P_L = \frac{V_{\text{rms}}^2}{R}$$

$$P_L \approx 30 \text{ W}_{\text{rms}}$$

$$R_L \approx 380 \Omega \text{ (resistência da lâmpada acesa);}$$

$$T \approx 59 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (15 min. de funcionamento)}$$



Figura 5. 42: TP PZT4 1:2 aplicado a um reator de uma lâmpada fluorescente de 20W – Tipo 1.



Figura 5. 43: Lâmpada fluorescente compacta de 20W acesa pelo TP PZT4 1:2 aplicado a um reator.

A tensão (CH1) e a corrente (CH2) obtida no primário do dispositivo eram da forma:

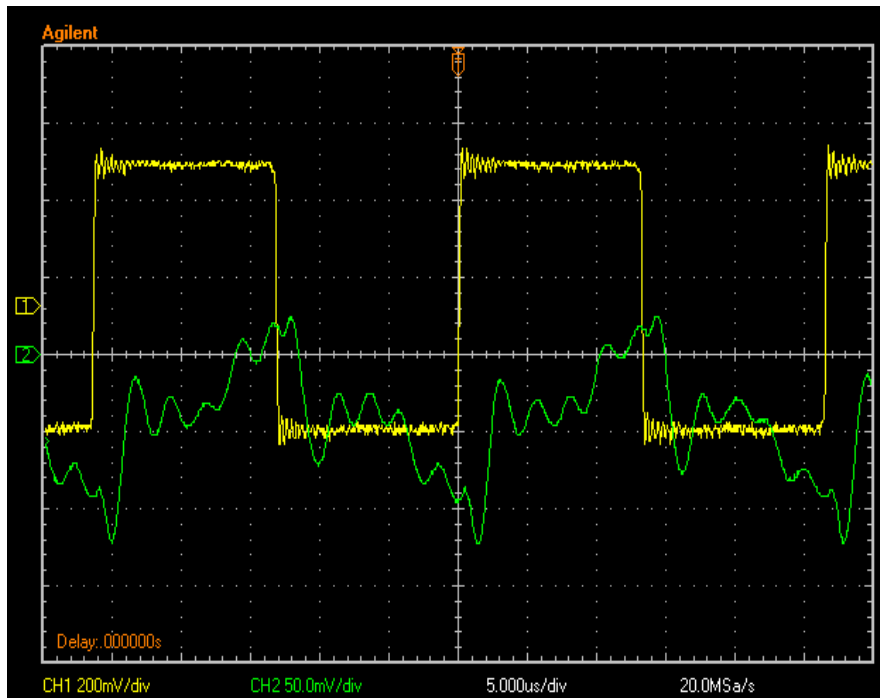


Figura 5. 44: Tela do Osciloscópio registra a tensão (CH1) e corrente (CH2) na entrada do TP, quando ligado a uma Lâmpada de 20W compacta.

Já a tensão (CH1) e corrente (CH2) obtida no secundário (entrada da Lâmpada) do dispositivo eram da forma:

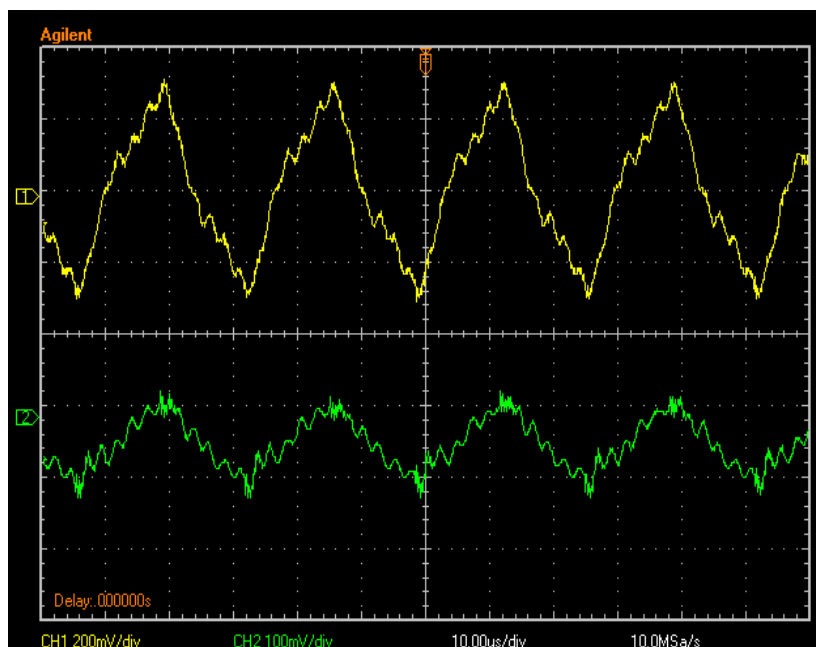


Figura 5. 45: Tela do Osciloscópio registrando a tensão (CH1) e corrente (CH2) na saída do TP, ou seja, entrada da Lâmpada de 20 W compacta.

Podemos observar nas figuras 5.44 e 5.45, o comportamento da tensão e da corrente de chaveamento, com componente fundamental senoidal, apresentando uma boa concordância com o valor teórico ou medido com resistores representando a Lâmpada, como pôde ser visto no gráfico 5.32, onde o mesmo, mostra que para esta carga ($\approx 300 \Omega$) a potência deverá ser de aproximadamente 190 mW para 1 Vrms de entrada, usando um resistor. Fazendo uma analogia com 123,74 Vrms na entrada, temos 23 W, o que não fica muito distante de 30W, obtidos com a Lâmpada. Todavia, estes cálculos ainda não foram conclusivos pelo fato de termos usado uma ponta de prova de alta corrente Tektronix A 622, indicada para correntes de até 100A. Desta forma quando se usa a mesma para medir correntes da faixa de 1A, ela deve apresentar erros na medida, quando comparada a correntes na faixa de 50A. Em função do aquecimento do transformador PZT, acreditamos ser a potência ligeiramente maior que a potência calculada em função do alto brilho da lâmpada quando acionada pelo circuito reator normal do fabricante da lâmpada.

2º Caso: Lâmpada Fluorescente de Tubo:

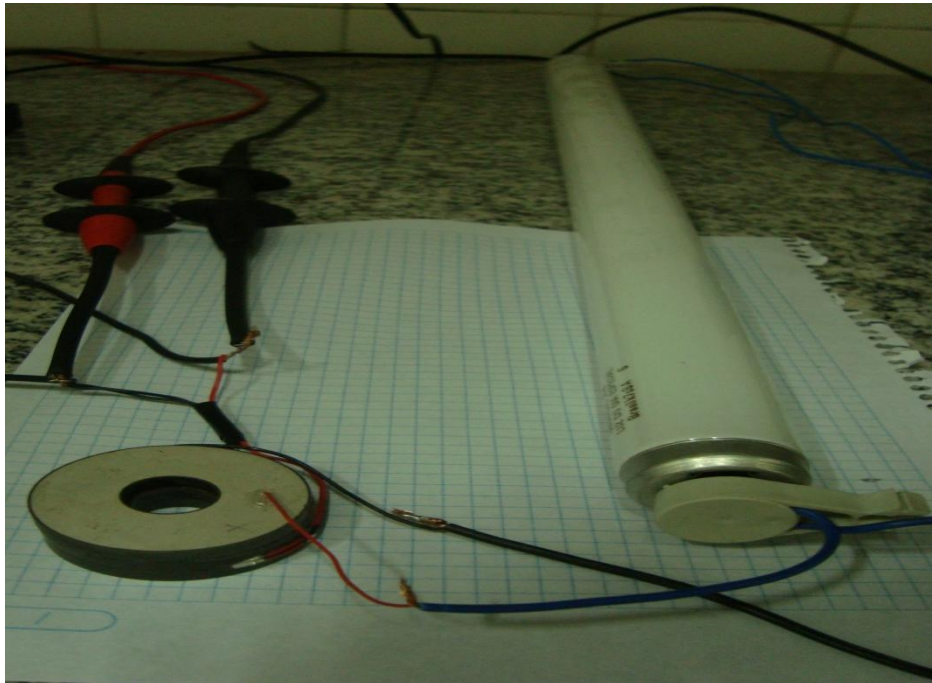


Figura 5. 46: TP PZT4 1:2 aplicado a um reator de uma lâmpada fluorescente tubular de 20W.

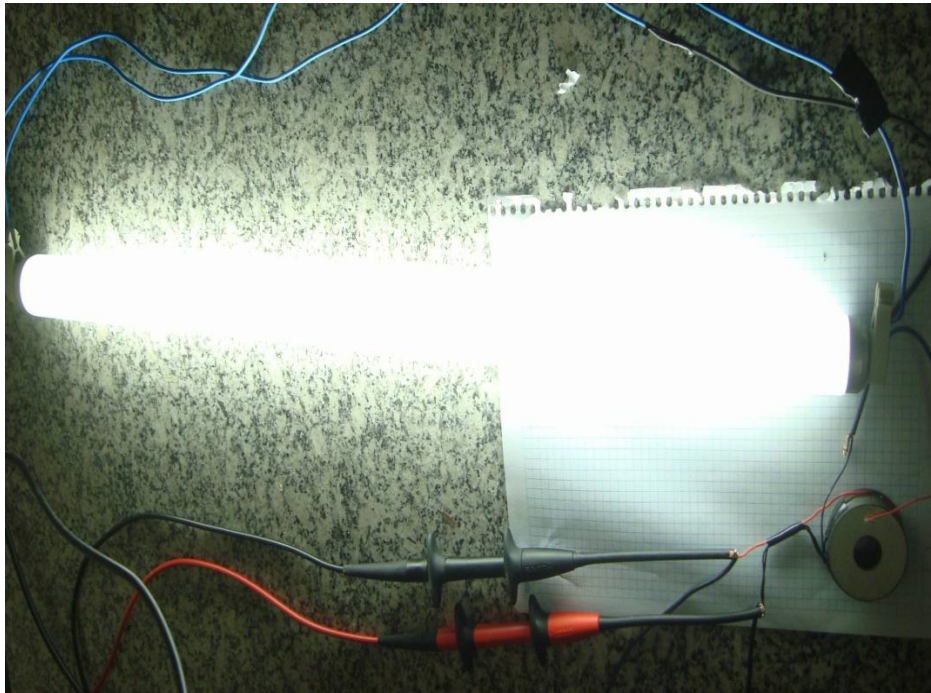


Figura 5. 47: Lâmpada fluorescente tubular de 20W acesa pelo TP PZT4 1:2 aplicado a um reator.

A temperatura durante o funcionamento pôde ser monitorada por uma câmera de infravermelho e assim registrada algumas imagens após aproximadamente 10 minutos de funcionamento (ver Figura 5.45 – (a) e (b)).

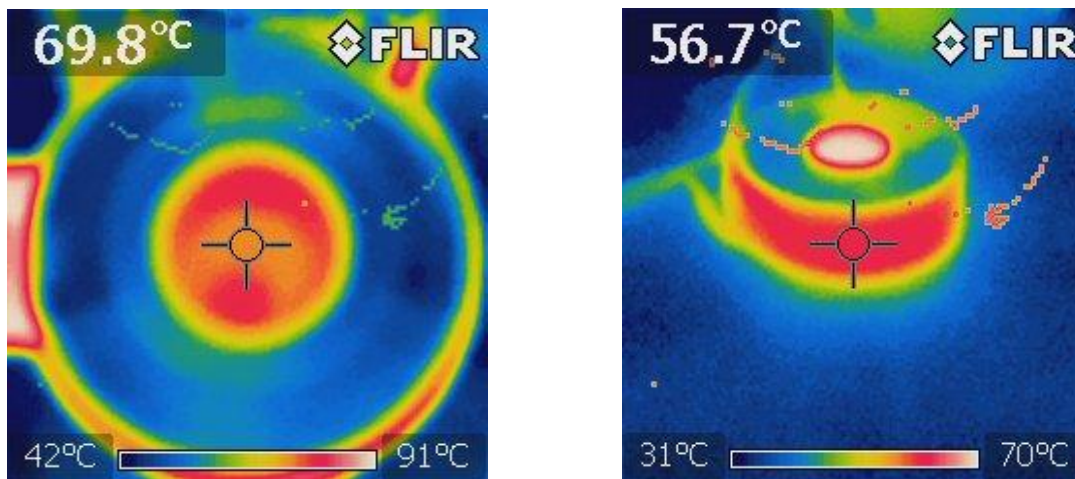


Figura 5. 48: (a) Temperatura no centro da cerâmica e (b) Temperatura na cerâmica.

O valor medido para a temperatura na parte externa foi de 56.7°C e na parte interna 69,8 °C, por se tratar de uma região menos ventilada. Esta temperatura está de acordo com as recomendações do fabricante, que especifica um máximo de 90°C para as suas cerâmicas de PZT4.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

Os modelos e projetos apresentados neste trabalho possuem características de ganho de tensão, potência de saída, eficiência e etc., do TP em relação a uma carga variável, o que faz deste trabalho um diferencial em detalhes que contribuem para sua aplicação e uso.

Os TPs reduzem o número de componentes magnéticos diminuindo o custo de produção, porém são limitados por sua potência. Para reatores de baixa potência, a substituição direta dos componentes ressonantes pelo TP é possível. A capacidade de potência do TP desenvolvida neste trabalho ficou em torno de 20W a 30W, sendo suficiente para ignição de lâmpadas fluorescentes com grande eficiência. Todavia, este valor pode ser aumentado para valores bem maiores usando a estrutura de TP em multicamada. O modelo de circuito equivalente modificado para o TPs aplicado no projeto de reatores para lâmpadas fluorescentes correspondeu às expectativas teoricamente apresentadas.

Demonstrou-se ao longo deste trabalho que o dispositivo transformador Piezoelétrico de modo radial pode ser aplicado em conversão de potência com praticidade e que grandes melhorias no processo de montagem podem ser obtidas mediante os métodos aqui apresentados.

Os modelos de TP construídos com elementos de PZT4 apresentaram melhor eficiência em relação ao TP com elementos de PZT5A, como era de se esperar pela própria característica deste material já apresentado em outras literaturas e pelos próprios fabricantes. O PZT4 que tem como classificação Navy Type I (“Hard”) sendo mais indicado para aplicações de média e alta potência para condições de uso contínuo e repetitivo e o PZT 5A tem como classificação Navy Type II (“Soft”) Alta sensibilidade, ideal para dispositivos de transmissão e recepção de baixa potência.

Perspectivas Futuras

Este trabalho apresentou grande riqueza de detalhes na caracterização do comportamento do TP em diferentes valores de frequência e tensão aplicada. Estes dados foram importantes e podem abrir diversas possibilidades de pesquisa na área de materiais ou construção de cerâmicas com aplicações específicas em eletrônica de

potência. Do ponto de vista de circuitos elétricos, trabalhos de acionamentos de reatores de lâmpadas fluorescentes podem ser desenvolvidos, buscando a melhor forma de operação segura das chaves de comutação do circuito reator de potência usando transformadores TP multicamadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] D. Z. Montanher. Caracterização e Desempenho de Transformadores de Estado Sólido Radiais Multiferróicos. Maringá – Paraná, Out. de 2010.
- [2] E. M. Syed. Analysis and Modeling of Piezoelectric Transformers. Graduate Department of Electrical and Computer Engineering. University of Toronto. 2001.
- [3] G.E. Martin, On the Theory of Segmented Electromechanical System, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, No. 2, July 1964, pp. NIA
- [4] W. P. Mason, Electromechanical Transducers and Wave Filters, 2^a Edition, Toronto: D. Van Nostrand Company Inc, 1948.
- [5] G.E. Martin, Vibrations of Coaxially Segmented, Longitudinally Polarized Ferroelectric Tubes, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 36, No. 8, Aug. 1964, pp. 1496-1 506.
- [6] T. Tanaka, Piezoelectric Devices in Japan, Ferroelectrics, Vol. 40, 1982, pp. 167-187.
- [7] T. Zaitzu, T. Shigehisa, M. Shoyama, T. Ninomiya; Piezoelectric Transformer Converter with PWM Control; APEC796 Conference Proceedinns, Vol. 1, Mmh 1996, pp. 279-283
- [8] S. Kawashima, O. Ohinishi, H. Hakamata, S. Tagarni, A. Fukouka, T. Inuoue, S. Hirose; Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer and its Applications to High Voltage Power Inverter; IEEE Ultrasonics Symposium 1994 Proceedings, Volume: 1, 1994, pp. 525-530
- [9] C.A. Rosen, Ceramic Transformers and Filters, General Electric Company, Syracuse, N.Y. and Proceedings of the Electronic Components Society, 1956, pp. 205.
- [10] T. Zaitzu, T. Inuoue, O. Ohnishi, I. Iwarnoto, 2 MHz Power Converters with Piezocerarnic Transformer, IEEE MTELEC '92 Proceedings, 1992, pp. 430 – 437.
- [11] O. Ohnishi, H. Kishie, I. Iwarnoto, Y. Sasaki, T. Zaitzu, T. Inuoue, Piezoelectric Ceramic Transformers Operating in Thickness Extensional Vibration Mode for Power Supply, Ultasonic Symposium 1992 Proceedings, 1992, pp. 483-488
- [12] T. Inuoue, O. Ohnishi, N. Ohde, Thickness Mode Vibration Piezoelectric Transformer, US Patent 5 1 1 8982, 1992.

- [13] A.M. Flynn, S.R. Sanders, Fundamental Limits on Energy Transfer and Circuit Considerations for Piezoelectric Transformers, IEEE PESC 98 Record, Vol. 2, 1998, pp. 1463- 1471
- [14] S. Hallaret, E. Sarruete, B. LePloufie, Numerical and Analytical Modeling of a Piezoelectric Transformer and Experimental Verification, Laboratoire d'Electriciteq Signaux et Robotique, France and the University of Tokyo, Tokyo1181.
- [15] T. Zaitso, O. Ohnishi, T. Inuoue, T. Ninomiya, F.C. Lee, G.C. Hua; Piezoelectric Transformer Operating in Thickness Extensional Vibration and its Application to Switching Converter; IEEE PESC Record'94, Vol. 1, pp. 585 – 589.
- [16] G. Ivensky, M. Shvarstas, S.B. Yaakov; Analysis and Modeling of a Piezoelectric Transformer in High Output Voltage Applications; IEEE MEC 2000, Vo1.2, 2000, 1081 – 1087.
- [17] C.Y. Lin, F.C. Lee; Design of a Piezoelectric Transformer and its Matching Network; IEEE PESC '94 Record, Vol. 1, 1994, pp.607 – 612.
- [18] J.S. Lee, Y.H. Lee, H.I. Chai, M.S. Yoon, K. J. Lim, The Characteristics of New Piezoelectric Ballast for Fluorescent T8 Lamp, IEEE ISIE 2001 Proceedings, 2001, Vol. 2, pp. 947 – 951.
- [19] C. S. Moo, W. M. Chen and H. K. Hsieh, An Electronic Ballast With Piezoelectric Transformer for Cold Cathode Fluorescent Larnps, IEEE ISIE 2001, Vol. 1, 2001, pp. 36 – 41.
- [20] M. J. Prito, J. Diaz, and J.A. Martin, A Very Simple Dc/DC Converter Using Piezoelectric Transformer, IEEE PESC 2001 Record, Vo1.4, 2001, pp. 1755 – 1760.
- [21] S. Hamamura, D. Kurose, and T. Ninomiya; Piezoelectric Transformer AC/DC Converter Over a Worldwide range of Input Voltage by Combined PWM and PFM Control, IEEE PESC 2001 Record, Vol. 1, 2001, pp. 416 – 421.
- [22] J.A. Oliver, R. Prieto, J.A. Cobos, M. Sanz and J. Uceda, ID Modeling of Multi-Layer Piezoelectric Transformer, IEEE PESC 2001 Record, Vo1.4, 2001, pp. 2097 – 2102.
- [23] Murata Electronics, PZT Application Manual, June 1999. (<http://www.aurelienr.com/electronique/piezo/piezo.pdf>).
- [24] Channel Industries Inc., Piezoelectric Ceramics Catalogue, 2000.
- [25] Piezo Systems Inc, "Piezo Education", [Online document], [cited 1999-200 1 July 271, Available HTTP: <http://www.piezo.com>

- [26] Ray-Lee Lin, “Piezoelectric Transformer Characterization and Application of Electronic Ballast,” Ph.D. Dissertation, Virginia Tech, November 2001.
- [27] R. P. Bishop, .Multi-Layer Piezoelectric Transformer,. US Patent No. 5, 834, 882, Nov. 10, 1998.
- [28] Ray Lee. Lin, E.Baker, F.Lee, Characterization of Piezoelectric Transformers (Proc. of Power Electronics Seminar at Virginia Tech, Sep. 1999) pp. 219-225.
- [29] D. J. Powell, J. Mould, and G. L. Wojcik, “Dielectric and Mechanical Absorption Mechanisms for Time and Frequency Domain Transducer Modeling”, 1998 IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings.
- [30] J.L. San Emeterio Prieto, F. Montero De Espinosa, et al, “On the Measurement of the Mechanical Loss of Low Qm Piezoelectric Materials”, Ferroelectrics, 1988, Vol. 81, pp. 257 ~ 260.
- [31] Site ATCP do Brasil disponível em: <<<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/ultra-som/ceramicas-piezoelétricas.html>>>. Consultado em: 17/10/2011.
- [32] Piezoelectric Ceramic for Sonar Transducers (Hydrophones & Projectors) Military Standard US DOD MIL STD 1376 A (SH) (1984).
- [33] Site da Wikipédia disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A2mica_piezoel%C3%A9trica>> Consultado em: 17/10/2011.
- [34] Barros, Marcelo H. M.. Modelagem, Simulação e Otimização de Transformadores Piezoelétricos de Modo Radial para Aplicações em Conversões de Potência. São Carlos – SP. 2008.