



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

**Cerâmica Piezoelétrica PZT-5A:
Propriedades e Aplicação**

Acadêmico: Alexandro Lopes de Sousa Freitas

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá, 06 de novembro de 2018



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

Cerâmica Piezoelétrica PZT-5A: Propriedades e Aplicação

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do professor Dr. José Roberto Dias Pereira, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Física.

Acadêmico: Alexandro Lopes de Sousa Freitas

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá, 06 de novembro de 2018

Sumário

Agradecimentos.....	1
Resumo	2
Introdução.....	3
Capítulo 1 - Piezoeletricidade	4
1.1 Efeito piezoelétrico direto	5
1.2 Efeito piezoelétrico inverso	6
1.3 Estrutura Perovskita.....	7
1.4 Constantes piezoelétricas	8
1.5 Principais cerâmicas piezoelétricas e suas constantes	10
Capítulo 2 – Modos de vibração de cerâmicas piezoelétricas.....	11
2.1 Velocidade de propagação do som na cerâmica.....	13
Capítulo 3 – Frequências de ressonância e antirressonância.....	18
3.1 Condutância e Susceptância	20
3.2 Espectroscopia de impedância	21
Capítulo 4 – Aplicações.....	24
4.1 Transdutores piezoelétricos	24
4.2 Sensores piezoelétricos	26
4.3 Atuadores piezoelétricos.....	26
4.4 Geradores piezoelétricos	29
4.5 Vantagens e desvantagens.....	30
Capítulo 5 – Análises e medidas experimentais	32
5.1 Circuito multiplicador de tensão usando PZT-5A.....	35
5.2 Procedimento experimental	38
Conclusões	46
Referências Bibliográficas	47

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me fortalecido ao ponto de superar as dificuldades e também por toda saúde que me deu e que permitiu alcançar esta etapa tão importante da minha vida.

Aos meus pais, irmãos e demais familiares, por todo apoio, educação, carinho, e pelas lições valiosas que recebi ao longo de minha vida.

Ao meu orientador José Roberto Dias Pereira, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

A todos aqueles que me acompanharam nesta jornada. Meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Cerâmicas piezoelétricas são corpos maciços constituídos de inúmeros cristais ferroelétricos microscópicos. Particularmente nas cerâmicas do tipo PZT, estes pequenos cristais possuem estrutura cristalina tipo Perovskita, que apresenta simetria tetragonal, romboédrica ou cúbica simples, dependendo da temperatura em que o material se encontra. Estando abaixo de uma determinada temperatura crítica, conhecida como temperatura de Curie, a estrutura Perovskita apresenta a simetria tetragonal em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um dipolo elétrico. A existência deste dipolo elétrico faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico e quando submetida a uma deformação mecânica, gera um campo elétrico interno, o que caracteriza o efeito piezoelétrico inverso e direto, respectivamente [12]. Usando o PZT-5A, foi construído um circuito multiplicador de tensão de oito estágios onde teve como objetivo captar a vibração de uma ventoinha de ar condicionado para armazenamento de energia elétrica utilizável. Algumas das principais aplicações das cerâmicas piezoelétricas são: Equipamentos médicos de imagem por ultrassonografia, transdutores ultra-sônicos para ensaios não destrutivos, atuadores piezoelétricos, motores piezoelétricos, etc.

Palavras-chaves: cerâmicas, piezoelétricas, PZT.

Introdução

A tecnologia tem avançado diariamente, gerando assim a necessidade de se criar e descobrir novas formas de geração de energia limpa. Denominamos de energia limpa “aquela que não libera, durante seu processo de produção ou consumo, resíduos ou gases poluentes geradores do efeito estufa e do aquecimento global” [9]. Nesse contexto, como forma alternativa de se gerar uma energia limpa, renovável e agredindo menos possível o meio ambiente surgem as cerâmicas piezoelétricas.

O efeito piezoeétrico foi descoberto pelos irmãos Pierre e Jacques Curie, em 1880, constatando que uma corrente elétrica surgia em certos cristais quando submetidos à pressão. Da mesma forma, também acontecia para o efeito reverso. Ao serem submetidos a uma diferença de potencial elétrico, tais materiais geravam vibrações. A esse fenômeno foi dado o nome de piezoeletricidade (eletricidade por pressão), piezo vem do grego “*piezein*” que significa pressionar [7]. “Tal propriedade é característica de materiais que possuem estruturas cristalinas complexas e com baixo grau de simetria” [1]. São exemplos o quartzo, óxido de zinco, titanato de bário, titanato de chumbo, zirconato de chumbo, titanato zirconato de chumbo (PZT's) entre outros [1]. Desta forma, o estudo de tal propriedade se torna muito importante para o desenvolvimento não somente de materiais, e sim de um novo método de geração de energia limpa.

Capítulo 1

Piezoelasticidade

A Piezoelasticidade foi descoberta pelos irmãos Curie: Pierre e Jacques. Em 1880 eles descobriram que alguns cristais quando comprimidos em certas direções apresentavam cargas positivas e negativas em algumas partes da superfície do cristal. Essas cargas eram proporcionais a pressão aplicada e desapareciam quando não havia mais pressão.

A descoberta não foi ao acaso, tinha sido influenciada por estudos que Pierre Curie havia desenvolvido em piroelectricidade e simetria de cristais. Ele descobriu que pólos são produzidos apenas em algumas direções dependendo da simetria particular do cristal. Um pouco antes outra descoberta tinha sido feita a piroelectricidade, uma variação de temperatura pode ocasionar uma série de efeitos elétricos no cristal conhecida como piroelectricidade. O efeito piezoelétrico está relacionado muito perto do efeito piroelétrico. A conexão entre piroelectricidade e piezoelasticidade é fundamental. Todos os materiais piroelétricos são intrinsecamente piezoelétricos [3].

A aplicação feita por Paul Langevin foi o desenvolvimento de sonares na primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (inventado o transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de kHz. A utilização da piezoelasticidade 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. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos EUA [4]. O PZT, ou titanato de zirconato de chumbo ($\text{Pb} [\text{Zr} (x) \text{Ti} (1-x)] \text{O}_3$), é um dos materiais cerâmicos

piezoelétricos mais usados do mundo. Materiais PZT e materiais piezoelétricos em geral, apresentam uma gama única de propriedades. No sentido básico, se um material piezoelétrico é deformado, é gerada uma carga elétrica no que é conhecido como efeito piezoelétrico. O oposto desse fenômeno também é válido: se um campo elétrico for aplicado a um material piezoelétrico, a deformação ocorre no que é conhecido como efeito piezoelétrico inverso.

O PZT é um material piezoelétrico à base de óxido metálico desenvolvido por cientistas no Instituto de Tecnologia de Tóquio em torno de 1952. Em comparação com o material piezoelétrico à base de óxido metálico descoberto, o Titanato de Bário (BaTiO_3), os materiais PZT apresentam maior sensibilidade e têm uma temperatura operacional mais alta.

1.1 Efeito piezoelétrico direto

O efeito piezoelétrico direto pode ser definido como a mudança de polaridade de acordo com a deformação aplicada. Um material é dito piezoelétrico se ao aplicar uma força externa obtém-se uma polarização elétrica interna, com intensidade diretamente relacionada a simetria do material [3].

$$P_p = dT \quad (1.1)$$

P_p é o vetor de polarização piezoelétrica, d é o coeficiente de pressão piezoelétrica e T é a tensão mecânica a que o material piezoelétrico está submetida.

Na figura 1.1 vemos a representação do efeito piezoelétrico direto.



Figura 1.1 - Efeito Piezoelétrico Direto

1.2 Efeito piezoelétrico inverso

Na forma reversa tem-se o efeito piezoelétrico inverso que, ao se aplicar um campo elétrico externo, o cristal se deforma.

$$S_p = dE \quad (1.2)$$

S_p é a tensão produzida pelo efeito piezoelétrico, e E é a magnitude do campo elétrico aplicado. Na Figura 1.2 ao aplicar uma diferença de potencial na superfície do material piezoelétrico tem-se uma contração/expansão.

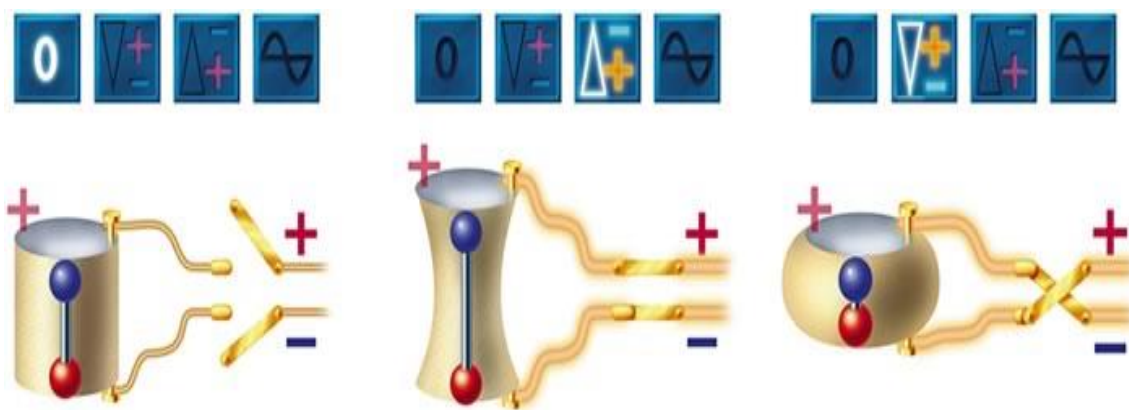


Figura 1.2 - Efeito Piezoelétrico Inverso

Fonte: (CeramTec) <http://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/piezoceramicos/basicos/>

A figura 1.3 mostra os efeitos da polarização de uma cerâmica em uma determinada direção.

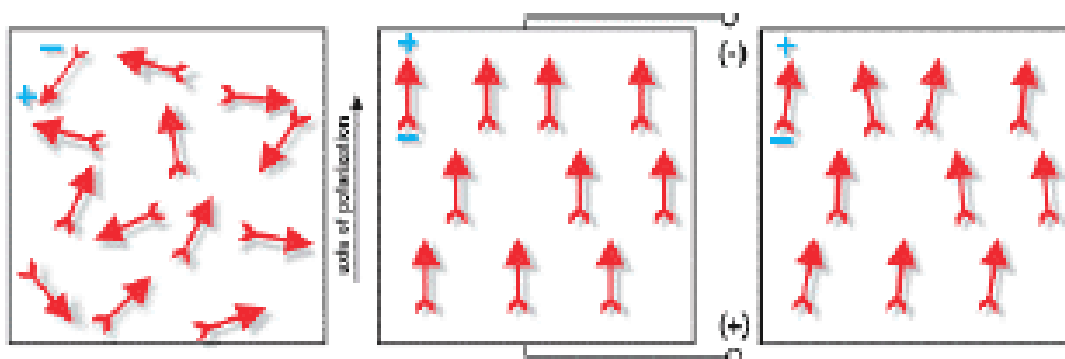


Figura 1.3 - Polarização de um elemento cerâmico piezoelétrico.

Fonte: <https://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>

Em relação à figura 1.3, temos que:

- (a) Orientação aleatória dos domínios polares antes da polarização;
- (b) Aplicação do campo elétrico DC de polarização;
- (c) Orientação dos domínios após a polarização e retirada do campo elétrico.

1.3 Estrutura Perovskita

A estrutura perovskita é conhecida e estudada a mais de um século, desde a descoberta do mineral CaTiO_3 por Gustav Rouse em 1839. A estrutura foi batizada com esse nome em homenagem ao mineralogista russo Count Lev Alexevich von Perovski. Desde então, o nome perovskita é usado para nomear uma classe de materiais que têm fórmula química do tipo ABC_3 , na qual os íons do sítio B são coordenados (rodeados) por um octaedro de íons do sítio C . Uma subclasse bastante conhecida da família das perovskitas, nos dias atuais, são os compostos com a fórmula química ABO_3 , em que os cátions do sítio B são metais de transição e os íons do sítio C são oxigênios [11].

A estrutura perovskita pode ser encontrada com algumas simetrias de rede, tais como cúbica, tetragonal, ortorrômbica, romboédrica ou monoclínica. A estabilidade simétrica dessa estrutura é bastante frágil e depende de uma série de fatores. As forças físicas que atuam nos íons da estrutura perovskita, e que são responsáveis pela estabilidade estrutural, não são claramente conhecidas. No entanto, um fato conhecido nesse processo é que os octaedros de oxigênio que existem na estrutura perovskita se “inclinam ou giram” para reduzir a energia total do sistema. O entendimento exato de como isso ocorre não é de fácil compreensão e pode variar de caso a caso. As forças que atuam nesse sistema são muitas e na maioria das vezes competem entre si para estabilizar uma dada simetria. Assim, um delicado balanço entre essas forças determina a simetria de menor energia. A energia relacionada com uma mudança de simetria é bastante baixa (para alguns casos da ordem de alguns décimos de eV) e o balanço de forças pode ser mudado simplesmente com a variação de alguns poucos graus de temperatura. Várias abordagens são utilizadas para tentar entender esses fenômenos, como exemplo: correlações empíricas focando os tamanhos de íons, o número de coordenação e várias

considerações geométricas; cálculos de energia total de rede por modelos empíricos; cálculos da energia de banda usando várias aproximações [11].

A cerâmica que possui propriedades piezoelétricas pertencem ao grupo de materiais ferroelétricos. Os sistemas atuais são quase que exclusivamente baseados em titanato zirconato de chumbo (PZT); isto é, eles consistem em cristais mistos de zirconato de chumbo (PbZrO_3) e titanato de chumbo (PbTiO_3). Os componentes de piezocerâmica possuem uma estrutura policristalina contendo vários cristaltos (domínios) e cada um é composto de uma pluralidade de células elementares. As células elementares dessas cerâmicas ferroelétricas exibem a estrutura de cristal perovskite, a qual pode geralmente ser descrita pela fórmula $\text{A}^{2+}\text{B}^{4+}\text{O}_3^{2-}$.

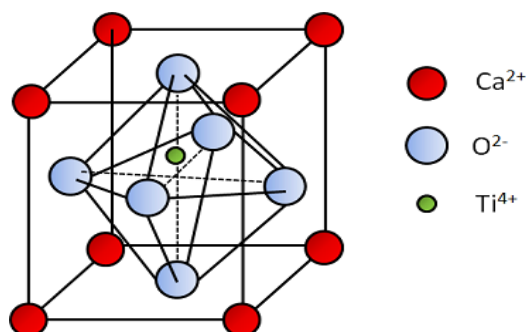


Figura 1.4 – Célula unitária de perovskita (CaTiO_3).
Fonte: <http://engenheirodemateriais.com.br/>

1.4 Constantes piezoelétricas

Segundo E. M. Syed, ANALYSIS AND MODELING OF PIEZOELECTRIC TRANSFORMERS (2001, p. 8), as principais propriedades dos materiais piezoelétricos do ponto de vista aplicado são:

Tensão mecânica (T): É a força aplicada por unidade de área transversal.

Deformação (S): É a pressão, 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 proporção que relaciona o deslocamento elétrico (D) a um campo elétrico (E) sob uma tensão mecânica (T). Este deslocamento pode ser dado por:

$$D = \epsilon^T E \quad (1.3)$$

Constante de Elasticidade Piezoelétrica (s^E): Relaciona a tensão aplicado devido a um esforço mecânico (T), na presença de um campo elétrico (E) constante. A constante de elasticidade é dada por:

$$S = s^E T \quad (1.4)$$

Coefficiente de Acoplamento Eletromecânico (k): Consiste na capacidade de um material piezoelétrico transformar a energia elétrica em energia mecânica e vice-versa. Pode se referir também como a eficiência piezoelétrica de cerâmica piezoelétrica.

$$k = \sqrt{\frac{\text{Energia Elétrica Armazenada}}{\text{Energia Mecânica Entrada}}} \quad (1.5)$$

O valor do coeficiente de acoplamento é único para cada modo de vibração. Sendo assim, ele pode também estar relacionado com outros coeficientes piezoelétricos, podendo ser escrita da forma:

$$k = \frac{d}{\sqrt{s^E \cdot \epsilon^T}} \quad (1.6)$$

Densidade: Razão entre a massa e o volume de um material piezoelétrico.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.7)$$

Fator de Qualidade Mecânica (Q): É a medida das perdas mecânicas do material. Permite analisar a nitidez do pico de ressonância.

Temperatura de Curie - TC (°C): É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas.

1.5 Principais cerâmicas piezoelétricas e suas constantes

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
k_p	0,60	0,50	0,61	0,60	0,63
k_{33}	0,68	0,63	0,70	0,71	0,73
d_{33} (10^{-12} C/N)	300	215	400	460	550
d_{31} (10^{-12} C/N)	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
g_{33} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	26	25	25	22	19
g_{31} ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	-11	-11	-11	-9	-9
K^T_3 (baixo sinal) C. dielétrica relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan \delta$ (baixo campo)	0,004	0,004	0,020	0,020	0,020
Densidade (kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temp. de Curie ($^{\circ}\text{C}$)	325	330	360	260	190
Fator de qualidade Q_m	500	1000	75	70	65
s^E_{11} ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	12	11	19	23	21
s^E_{33} ($\times 10^{-12}$ m^2/N)	16	14	16	16	15
N_p (Hz-m) (modo planar)	2200	2270	1950	2000	1950
N_t (Hz-m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

Tabela 1.1 – Principais materiais piezoelétricos comerciais e as respectivas constantes.

Fonte (ATCP Engenharia Física): Cerâmicas piezoelétricas: propriedades e funcionamento.

Capítulo 2

Modos de vibração de cerâmicas piezoelétricas

A cerâmica piezoelétrica 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 pode ser 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 [10].

1 – Modo de Vibração Transversal (Comprimento)

Neste modo de vibração, a direção de vibração é ortogonal à direção de polarização. A figura 2.1 mostra uma forma de placa retangular vibrando neste modo. P é a direção de polarização e E é a direção do campo elétrico.



Figura 2.1 – 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 e, 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 [10].

2 – Modo espessura

Neste modo, a vibração é orientada ao longo da direção de polarização. A figura 2.2 mostra que as formas em disco e placa retangular são utilizadas nesta modalidade, onde a espessura é muito menor que o comprimento, largura ou diâmetro.

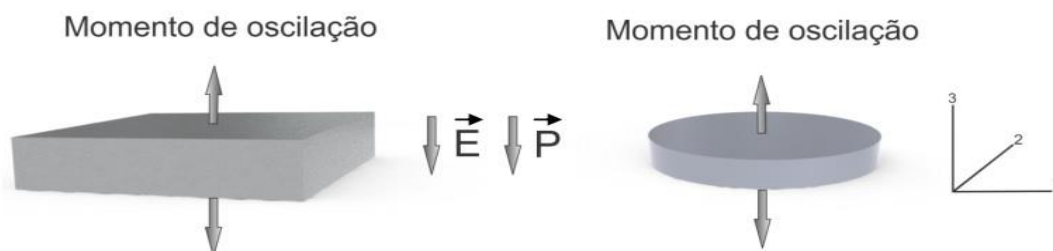


Figura 2.2 – Vibração modo espessura.

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 [10].

3 – Modo espessura (cisalhamento)

Neste modo, a cerâmica piezoelétrica expande na espessura, bem como na diagonalidade. A Figura 2.3 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.

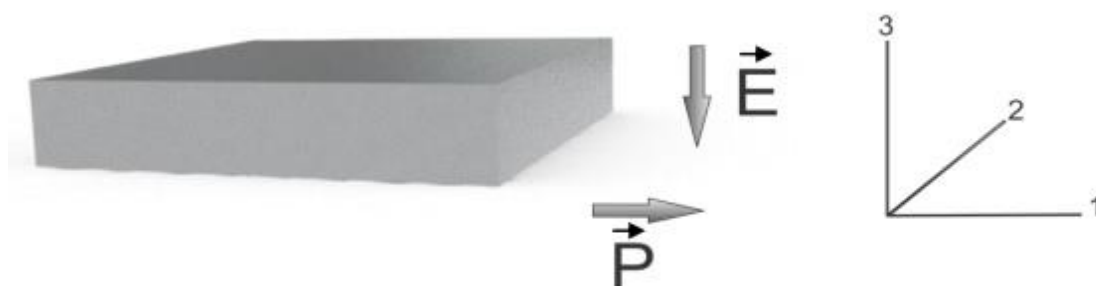


Figura 2.3 – Modo de vibração por espessura.

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 [10].

2.1 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:

$$\frac{\lambda}{2} = \ell \quad (2.1)$$

A velocidade do som será:

$$v = f_r \lambda \quad (2.2)$$

Onde f_r é a frequência de ressonância. Sendo assim, temos que:

$$f_r = \frac{v}{2\ell} \quad (2.3)$$

ou

$$f_r \ell = \frac{v}{2} = N \quad (2.4)$$

Onde N é a constante de frequência

N_{31}	Constante de frequência para quando o eixo de polarização é perpendicular ao da tensão.
N_{33}	Constante de frequência para quando o eixo de polarização é na mesma direção da tensão.

N_{15}	Constante de frequência para quando o eixo de polarização é perpendicular à tensão e campo elétrico.
N_p	Constante de frequência para quando a polarização assim como a tensão são todos na mesma direção.
k_{31}	Coeficiente de acoplamento eletromecânico indica que a polarização está na direção do eixo 3, e a tensão ou a deformação é ao longo do eixo 1.
k_p	Coeficiente de acoplamento planar eletromecânico planar indica que a polarização, assim como a tensão é tudo na direção do eixo 3 (modo planar).
k_t	Coeficiente 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 (modo espessura).

Tabela 2.1 – Definição de algumas constantes desse capítulo

As frequências para os modos específicos estão listados abaixo:

$$\text{Modo Transversal: } f_r = \frac{N_{33}}{l} \quad (2.5)$$

Onde l é o comprimento do ressonador.

$$\text{Modo Espessura: } f_r = \frac{N_{31}}{t} \quad (2.6)$$

Onde t é a espessura do ressonador.

$$\text{Modo Corte: } f_r = \frac{N_{15}}{t} \quad (2.7)$$

Onde t é a espessura do ressonador.

$$\text{Modo Radial: } f_r = \frac{N_p}{d} \quad (2.8)$$

Onde d é o diâmetro do ressonador.

A tabela a seguir tem como principal objetivo relacionar as constantes de frequência com seus respectivos tipos:

Constantes de Frequência									
Número de referência da Channel Industries, Inc. U.S.Navy	Titanato de Bário			Titanato Zirconato de Chumbo – PZT					
	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. 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 norma que 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”): Conhecido comercialmente como PZT-5A, possui alta sensibilidade, sendo 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). Suas principais aplicações estão em: dispositivos para NDT, hidrofones e acelerômetros.

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”): Utilizado 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. Conhecido comercialmente como PZT-5J.

Navy Tipo VI (“Soft”): Usado 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 [10].

Capítulo 3

Frequências de ressonância e anti-ressonância

O estado de ressonância de uma cerâmica piezoelétrica depende das características intrínseca do material, das condições de contorno mecânica e elétrica a que a estrutura esteja submetida. Considerando um disco de cerâmica vibrando livre (sem restrições de movimento) e no ar (sem amortecimento), as condições de contorno mecânicas são nulas.

Dependendo das condições de contorno elétricas a que o disco esteja submetido, ocorrem dois tipos de fenômeno:

- 1) Frequências de ressonância, são aquelas associadas aos valores mínimos de impedância da cerâmica sob condição de curto-circuito;
- 2) Frequências de anti-ressonância, são aquelas associadas aos valores máximos de impedância da cerâmica sob condição de circuito-aberto.

Os modos de vibração representam os modos ativos piezoelétricos, isto é, os modos que podem ser excitados por um campo elétrico aplicado através dos eletrodos da cerâmica. Cada modo tem frequências de ressonância e anti-ressonância associadas e a separação entre essas frequências é proporcional ao valor do acoplamento eletromecânico do modo. O coeficiente de acoplamento eletromecânico, k , é um número adimensional que relaciona a energia convertida de saída com a energia total de entrada, ou seja, é uma indicação direta da intensidade do efeito eletromecânico. Seu valor depende do grau de polarização da cerâmica.

Para o efeito piezoelétrico direto:

$$k = \sqrt{\frac{EE_{EM}}{EM_{EE}}} \quad (3.1)$$

Para o efeito piezoelétrico inverso:

$$k = \sqrt{\frac{EM_{EE}}{EE_{EM}}} \quad (3.2)$$

Onde:

EE_{EM} = Energia Elétrica convertida em Energia Mecânica;

EM_{EE} = Energia Mecânica convertida em Energia Elétrica.

A diferença entre as energias de entrada e de saída é armazenada dielétrica ou elasticamente, ou dissipada termicamente.

Como a conversão de energia é sempre incompleta, $k < 1$, o coeficiente efetivo de acoplamento eletromecânico (Kunkel et al., 1990) de um dado modo de vibração pode ser determinado por:

$$k_{ef} = \sqrt{\frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_{ar}^2}}, \quad f_{ar} > f_r \quad (3.3)$$

Onde:

f_r = freqüência de ressonância;

f_{ar} = freqüência de anti-ressonância.

A maioria dos modos piezoelétricos possui acoplamento fraco ($k_{ef} < 0,2$). Um modo fraco situado entre as freqüências de um modo forte, apresentam f_r e f_{ar} trocados, isto é, $f_r > f_{ar}$ dificultando a identificação dos pares de freqüências. Já os modos mecânicos que eventualmente resultem de uma análise modal da cerâmica, podem ser facilmente identificados, pois sendo desacoplados das condições de contorno elétricas, apresentam modos de vibração idênticos.

A ressonância (figura 3.1) está associada à freqüência em que o valor da impedância é mínimo (ou da admitância máximo) e a anti-ressonância ao próximo valor de freqüência em que a impedância é máxima (ou em que a admitância é mínima).

Os modos fortemente acoplados ($k_{ef} > 0,5$) possuem f_r e f_{ar} bastante separadas. Quanto maior o coeficiente de acoplamento de um dado modo

vibracional, mais significativa é a participação desse modo, comparada à participação dos outros modos, na maneira do disco piezoelétrico vibrar.

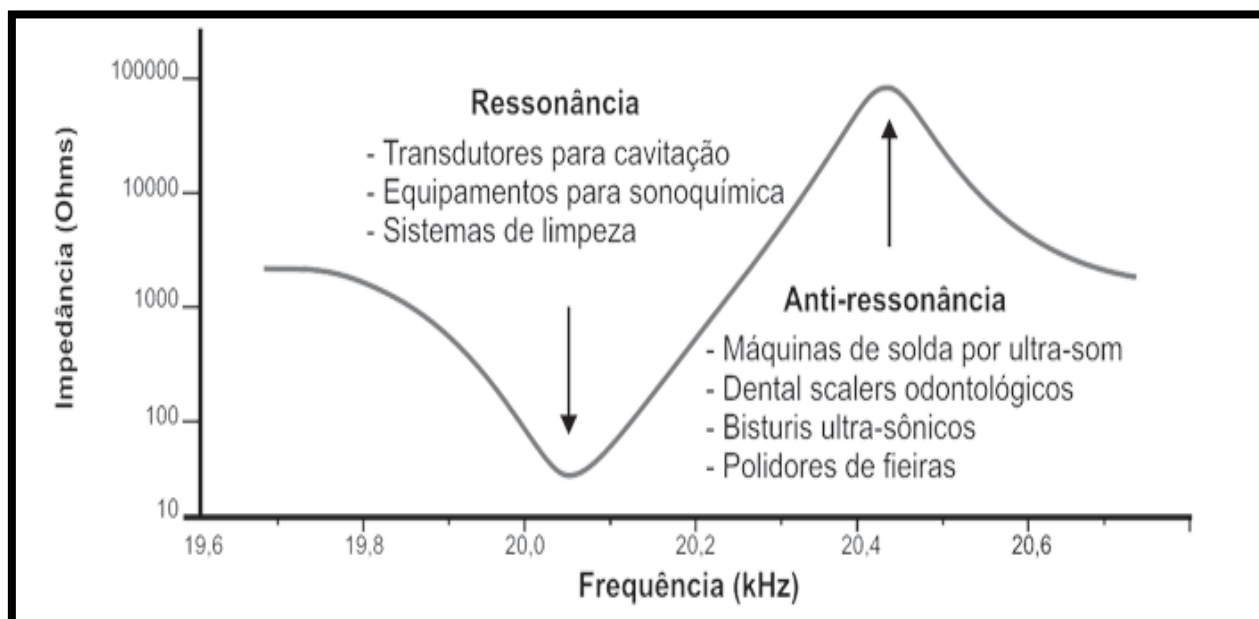


Figura 3.1 – Curva de impedância em função da frequência de um transdutor.

Fonte (ATCP Engenharia Física): <http://www.atcp.com.br/pt/>

3.1 Condutância e Susceptância

Em um circuito de corrente elétrica alternada senoidal, no caso geral (em que estão presentes todos os elementos passivos clássicos, resistor, indutor e capacitor), a susceptância é o quociente da corrente com a tensão pela tensão aplicada. Equivalentemente, ela é medida também pelo quociente da reatância do circuito pelo quadrado do módulo da impedância [17].

No caso particular (e ideal) de um circuito passivo apenas reativo (indutivo e/ou capacitivo), a susceptância será precisamente igual ao inverso multiplicativo da reatância resultante. Em análise fasorial, diz-se corretamente que susceptância é a parte imaginária da admitância, enquanto a parte real é representada pela condutância. No Sistema Internacional de Unidades (SI), susceptância, assim como condutância e admitância, em circuitos elétricos, é medida em siemens (S) [17].

Definição: A admitância, dado por Y é definida como o inverso multiplicativo da impedância:

$$Y = \frac{1}{Z} \quad (3.4)$$

Por outro lado, temos que:

$$Y = G + jB \quad (3.5)$$

na qual

Y é a admitância, medida em siemens (o inverso do ohm).

G é a condutância, medida em siemens.

j é a unidade imaginária, e B é a susceptância, medida em siemens.

Visto que impedância é definida binomialmente por:

$$Z = R + jX \quad (3.6)$$

Tem-se que:

$$Y = G + jB = \frac{1}{R + jX} \quad (3.7)$$

3.2 Espectroscopia de impedância

Quando um sólido dielétrico é submetido a um campo elétrico, dois efeitos podem ser observados: polarização e/ou condução elétrica. Contudo, se o campo aplicado para polarizar o material for aplicado em modo alternado, os dipolos elétricos não são capazes de responder instantaneamente às oscilações do campo elétrico. O campo oscilante aplicado sobre a amostra e a reorientação dos dipolos elétricos do material ficam desta forma defasados, originando uma dissipação de energia. Este efeito é conhecido como relaxação dielétrica, e a grandeza que quantifica este fenômeno é a permissividade dielétrica complexa dada por

$$\varepsilon^* = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega) \quad (3.8)$$

Sendo que a parte real ε' é a permissividade relativa, e a parte imaginária ε'' é o fator de dissipação dielétrica do material. A dissipação de energia, sob a forma de calor, pode ser descrita pela expressão:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.9)$$

A técnica utilizada para estudar o comportamento da permissividade complexa, bem como a dissipação de energia é a espectroscopia de impedância. Na técnica de espectroscopia de impedância a amostra é submetida a um potencial elétrico externo alternado $V(t) = V_0 e^{-i\omega t}$, que responderá a excitação com uma corrente $I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = i\omega CV$, sendo C a capacitância da amostra dada por:

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (3.10)$$

Com A e d sendo a área e a espessura da amostra, respectivamente.

É possível então determinar ε' e ε'' ao considerar a amostra como um circuito RC paralelo, para o qual a admitância complexa pode ser expressa como:

$$Y = G + iB \quad (3.11)$$

Sendo G a condutância e B a susceptância. Assim, a parte real e imaginária da constante dielétrica podem ser expressas por:

$$k' = \frac{Gd}{\omega A \varepsilon_0} \quad (3.12)$$

$$k'' = \frac{Bd}{\omega A \varepsilon_0} \quad (3.13)$$

A técnica de espectroscopia de impedância consiste em submeter a amostra a ser analisada a um campo elétrico alternado $V(t) = V_0 e^{-i\omega t}$ com frequência variável, $\omega = 2\pi f$, e pequena amplitude. A amostra por sua vez,

responde com uma corrente alternada $I(t) = I_0 e^{-i(\omega t + \theta)}$. Registra-se, então, um espectro de impedância em função da frequência f ou da frequência angular ω . Vários fatores intrínsecos, como a composição química, estrutura molecular ou cristalina, homogeneidade, presença e tipo de portadores de cargas, afetam o espectro obtido. Outras variáveis extrínsecas, como temperatura e pressão, podem ser controladas e seus efeitos sobre a amostra são estudados através dessa técnica.

Capítulo 4

Aplicações

As cerâmicas piezoelétricas possuem diversas aplicações na indústria, onde se encaixam em quatro categorias gerais: transdutores, sensores, atuadores piezoelétricos e geradores piezoelétricos.

4.1 Transdutores piezoelétricos

Um transdutor piezoelétrico é um dispositivo que converte uma forma de energia em outra forma de energia. Na maioria dos casos, consiste em converter energia elétrica num deslocamento mecânico ou converter alguma grandeza física não elétrica tal como som, temperatura, pressão, velocidade ou luz, numa grandeza elétrica. Com o recurso a transdutores podemos utilizar instrumentação eletrônica para medir, modificar e melhorar o atual estado tecnológico das aplicações industriais. Por exemplo, hoje em dia existem já transdutores integrados de temperatura com sensibilidades da ordem dos 10 a 200 mV por grau centígrado, extremamente lineares. Existem também transistores de efeito de campo sensíveis a diferentes íons, utilizados na medida de potenciais bioeletrônicos. As funções de um transdutor são: ser sensível à presença, magnitude e variação de um dado medido e proporcionar a saída de um sinal elétrico a ser lido por um leitor.

Originalmente, os cristais feitos de quartzo eram usados como material para transdutores de cristal piezoelétrico. No início da década de 1950, os cristais de quartzo começaram a dar lugar à cerâmica piezoelétrica como material transdutor primário. As vantagens oferecidas por um transdutor de cerâmica em comparação com outros materiais incluem a capacidade de cerâmica de ser fabricada em uma ampla variedade de formas e tamanhos, sua capacidade de operar de forma eficiente em baixa tensão e sua capacidade de funcionar a temperaturas até 300°C. Devido à capacidade de produzir um transdutor cerâmico em vários tamanhos e formas, os transdutores

cerâmicos podem ser facilmente adaptados a uma grande variedade de aplicações industriais.

Conseqüentemente, eles permitem uma personalização completa para satisfazer as necessidades específicas de um cliente. Hoje, os materiais de fabricação de transdutores de cerâmica mais utilizados são composições de titanato de zirconato de chumbo, uma tendência que traça suas origens para a década de 1960. Na medida em que a tecnologia do transdutor de cerâmica continuou a evoluir, o uso de piezo-polímeros e compósitos também ganhou aceitação.



Figura 4.1 – Transdutor Piezoelétrico.
Fonte: <https://www.americanpiezo.com/>

Transdutor ultra-sônico piezoelétrico: Um transdutor de ultra-som piezoelétrico gera atividade ultra-sônica, onde produz ondas sonoras acima das frequências que podem ser ouvidas pelo ser humano. Usado tipicamente em sistemas de limpeza, a expansão e a contração fazem com que o diafragma ultra-sônico, que serve como elemento de sensor de pressão do transdutor, vibre, introduzindo atividade ultra-sônica no tanque de limpeza no processo. O transdutor de ultra-som piezoelétrico também oferece as vantagens de alta eficiência eletroacústica e minimiza a geração de calor.

Os transdutores piezoelétricos podem ser utilizados para inúmeras aplicações para uso industrial, ambiental e pessoal. Os transdutores de ar, por exemplo, são frequentemente usados em sensores automotivos, de proximidade e de nível. Eles são comumente usados em produtos residenciais,

como detectores de movimento e objetos, dissuasores de pestes e alarmes de segurança doméstica. Eles também são usados em dispositivos eletrônicos, como brinquedos, jogos e unidades de controle remoto [13].

4.2 Sensores piezoelétricos

Um sensor piezoelétrico converte um parâmetro físico, como aceleração ou pressão, em um sinal elétrico. Este sinal do sensor por sua vez, resulta em uma resposta do sistema. Um exemplo de um sensor piezoelétrico é um acelerômetro. Os sensores do acelerador geralmente medem a vibração ou a aceleração de vários dispositivos, como motores, bombas, etc. Um sensor piezoelétrico deste tipo é freqüentemente usado para medir a vibração dos rolamentos do motor, ou outro dispositivo, para determinar o desgaste do rolamento para que a manutenção possa ser realizado antes que haja uma falha catastrófica no rolamento. Um sensor de batimento automotivo é outro exemplo de um sensor de acelerômetro que é usado para medir a vibração do motor para ajustar a relação combustível / ar para reduzir a vibração do motor, resultando em um desempenho melhorado do motor.

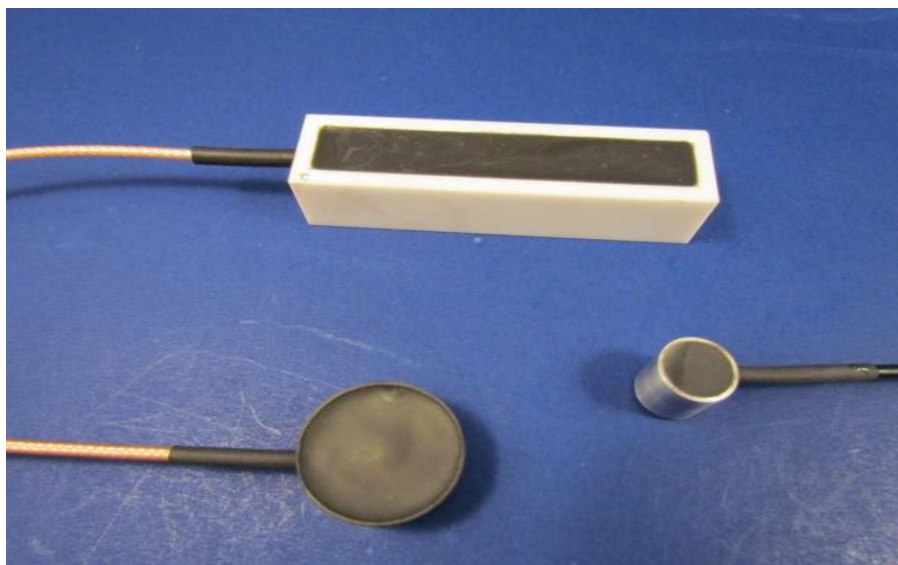


Figura 4.2 – Sensor Piezoelétrico.
Fonte: <https://www.americanpiezo.com/>

Outro grupo de sensores piezo operam no princípio de medir a distância em um fluido, principalmente através do uso de medidas de tempo de trânsito e um sistema de processamento de dados correspondente. Este sistema pode

produzir uma resposta pré-programada que irá controlar algum aspecto do processo, mantendo a operação dentro dos parâmetros de operação desejados. Um exemplo deste sistema de sensores seria a aceleração de uma válvula nas seguintes aplicações para sensores de fluxo e piezo fluxo.

Sensores de fluxo de líquido piezoelétrico: Os sensores de fluxo de líquido piezoelétrico são usados em pares e operam utilizando a diferença de tempo de trânsito para um sinal que viaja na direção do fluxo de fluido em comparação com o tempo de trânsito para um sinal que viaja contra o fluxo de fluido. Esta diferença de tempo de trânsito está relacionada à velocidade do fluxo no vaso e, portanto, o fluxo ou o volume/segundo podem ser determinados com a configuração do recipiente e as características do líquido.

Sensores de nível: Os sensores de nível piezo podem determinar a quantidade de material restante em um compartimento e podem ser usados para controlar o conteúdo do compartimento. Esses sensores funcionam disparando intermitentemente um feixe de som no nível da superfície do material no compartimento e recebendo de volta o reflexo desse feixe de som à medida que reflete fora da superfície. Conhecendo a velocidade da onda sonora no ar e o tempo de trânsito para esta onda sonora para viajar para a superfície do material e de volta ao sensor, pode-se determinar a distância da superfície do material do sensor. Esta informação, juntamente com a informação da geometria do navio e a posição do sensor e as características do material na bandeja, permitem o cálculo preciso da quantidade de material na lixeira. Uma vantagem adicional de um sensor piezo na aplicação é que o feixe de sensor piezoelétrico não é afetado pelo pó no compartimento que pode resultar durante a operação de carregamento do material [13].

4.3 Atuadores piezoelétricos

Um atuador piezoelétrico converte um sinal elétrico em um deslocamento físico controlado com precisão. Se o deslocamento for impedido, uma força utilizável (força de bloqueio) se desenvolverá. O controle preciso do movimento realizado por atuadores piezoelétricos é usado para ajustar

ferramentas de usinagem, lentes, espelhos ou outros equipamentos. Um atuador piezo pode ser usado para controlar válvulas hidráulicas, atuar como uma bomba de pequeno volume ou motor de propósito especial e em outras aplicações que requerem movimento ou força. Um atuador é essencialmente um motor, ou um gerador de movimento, geralmente linear e de alcance limitado que quando um campo elétrico é aplicado, o atuador é capaz de realizar o trabalho. A quantidade de força que pode ser aplicada depende da área de seção transversal do atuador.

Existem atuadores de baixa tensão, geralmente operando em até 200 volts, e atuadores de alta tensão operando em até 1000 volts. Os atuadores de baixa tensão são atuadores multicamadas co-cozidos. Estes possuem camadas de cerâmica muito finas que são fabricadas por fundição de uma pasta de cerâmica ou orgânica para formar uma fita, seca, com um eletrodo fino de metal precioso, geralmente um eletrodo de paládio de prata.

Os atuadores de alta tensão são construídos com discos cerâmicos, ou anéis, com eletrodos finos de folha de metal entrelaçados entre as cerâmicas. O dispositivo é combinado com um adesivo de alta qualidade. Esses atuadores de pilha são muitas vezes fechados em invólucro de metal com um pré-esforço apropriado aplicado. Outras opções para esses atuadores podem ser embalagens especialmente projetadas para gerenciar o calor gerado durante a operação ou incluir a possibilidade de detecção de posição para o atuador de pilha piezoelétrica.



Figura 4.3 – Atuador Piezoelétrico Linear.

Fonte: <http://www.directindustry.com/pt/>

Dois tipos diferentes de atuadores piezo são atuadores de pilha e atuadores de listra.

Atuadores de pilha: As pilhas discretas (atuadores de pilha de alta tensão) são estruturas compostas feitas por empilhamento de discos ou anéis de cerâmica piezoelétricos terminados separadamente e folhas de eletrodo de metal com um adesivo. As tensões podem variar de 500 V a 1.000 V.

Atuador de listra: Um atuador de listra, também chamado de atuador de dobra, é projetado para produzir uma deflexão mecânica relativamente grande em resposta a um sinal elétrico. Esta deflexão oferece um grande golpe e uma força de bloqueio muito limitada quando comparado com um atuador de pilha.

As aplicações para atuadores piezo incluem modulação de fibra para comunicações, dispositivos de posicionamento precisos, válvulas de dosagem, interruptores elétricos, micro bombas, impressoras a jato de tinta e dispositivos anti-vibração [13].

4.4 Geradores piezoelétricos

Duas aplicações comuns de geradores piezo estão nos isqueiros de botão e churrasqueiras a gás. Nessas aplicações, pressionar um botão faz com que um martelo carregado por mola aplique uma força mecânica a uma cerâmica piezoelétrica de uma única camada em forma de haste. Como resultado do efeito piezoelétrico, o elemento cerâmico produz uma tensão que passa através de uma pequena faísca causando a ignição da fonte de combustível. A energia elétrica em um gerador piezoelétrico de uma camada em forma de haste é liberada muito rapidamente, é uma tensão muito alta e uma corrente muito baixa. Os sistemas de ignição piezoelétrica são pequenos e simples, de longa duração e requer pouca manutenção.

Dos geradores piezoelétricos existentes, temos os geradores de piezo multicamada, que consiste em uma pilha de cerâmica piezoelétrica muito fina alternada com eletrodos. A energia elétrica produzida por um gerador piezoelétrico multicamada é de uma tensão muito menor que a gerada por um gerador piezoelétrico de camada única. Por outro lado, a corrente produzida por um gerador multicamada é significativamente maior do que a corrente

gerada por um gerador piezoelétrico de uma camada. Como eles não criam interferências eletromagnéticas, os geradores de piezo multicamadas são excelentes baterias de estado sólido para circuitos eletrônicos.

Devido aos avanços nos sistemas microeletrônicos, muitos dispositivos de consumo diminuíram de tamanho. Sistemas eletrônicos menores requerem menos energia para operar. Como resultado, os geradores piezoelétricos multicamadas de estado sólido tornaram-se uma fonte de energia viável para algumas aplicações. As aplicações atuais para geradores de piezo multicamadas são fontes de energia para munições e sensores sem fio, como sensores que monitoram a pressão dos pneus em automóveis.

Os geradores piezos de camada única e multicamada são usados em aplicações onde as baterias ou a corrente elétrica direta não estão disponíveis. Recentemente, a colheita de energia usando geração de energia piezoelétrica tornou-se o foco de muita pesquisa [13].

4.5 Vantagens e desvantagens

Como vantagens das cerâmicas piezoelétricas podemos destacar:

- Podem ser utilizadas para produção de energia a baixo custo, limpa e sustentável;
- É um campo vasto para pesquisas e conseqüente desenvolvimento de novos materiais;
- Podem ser implementados em diversas atividades mecânicas para a geração de energia;

Como desvantagens:

- Envelhecimento natural (e acelerado pelas condições de uso): com o passar do tempo, a polarização remanescente induzida durante o processo de fabricação das cerâmicas esvaece naturalmente, independentemente da ação de agentes externos ou do uso do material.

- Limites de excitação elétricos e mecânicos: as cerâmicas piezoelétricas são materiais frágeis poucos resistentes à tração, sendo importante observar os limites de cada material para evitar quebras.

Capítulo 5

Análises e medidas experimentais

Neste capítulo, foi utilizada uma cerâmica PZT-5A do tipo disco com 0,45mm de espessura e 26,9 mm de diâmetro para medição da frequência de ressonância e antirressonância.

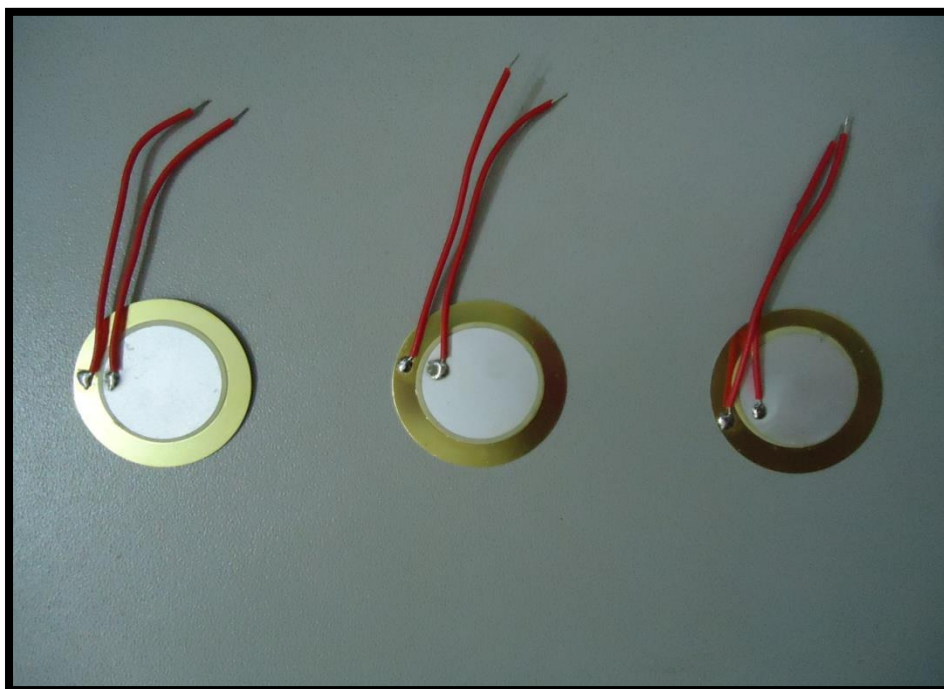


Figura 5.1 – Foto de cerâmica piezoelétrica PZT-5A

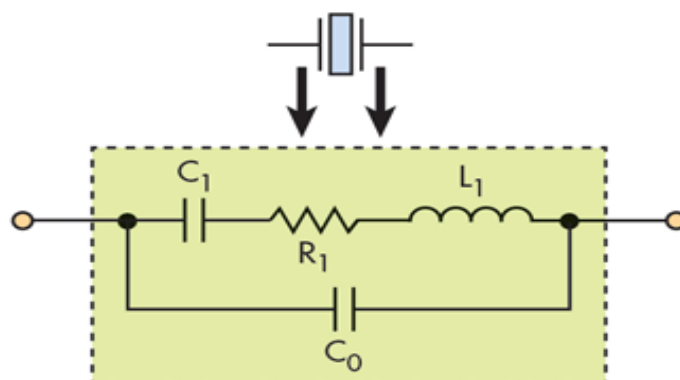


Figura 5.2 – Circuito equivalente de uma cerâmica PZT-5A

Onde:

L: A indutância surge da massa da cerâmica.

C₁: Esta capacitância surge do tipo da cerâmica.

R₁: Está relacionado com as perdas mecânicas no sistema. O maior deles surge das perdas por atrito da vibração mecânica da cerâmica.

C₀: Esta capacitância no circuito equivalente da cerâmica surge da capacitância entre os eletrodos do elemento. Isso é frequentemente chamado de capacitância shunt.

Usando o equipamento de medidas de impedância, foram realizadas as medidas das figuras 5.3 e 5.4. Na figura 5.3, para a impedância mínima, temos que a frequência de ressonância é $f_r = 97,5\text{kHz}$. Já na figura na figura 5.4, para a impedância máxima, temos que a frequência de antirressonância é $f_{ar} = 105,02\text{kHz}$.

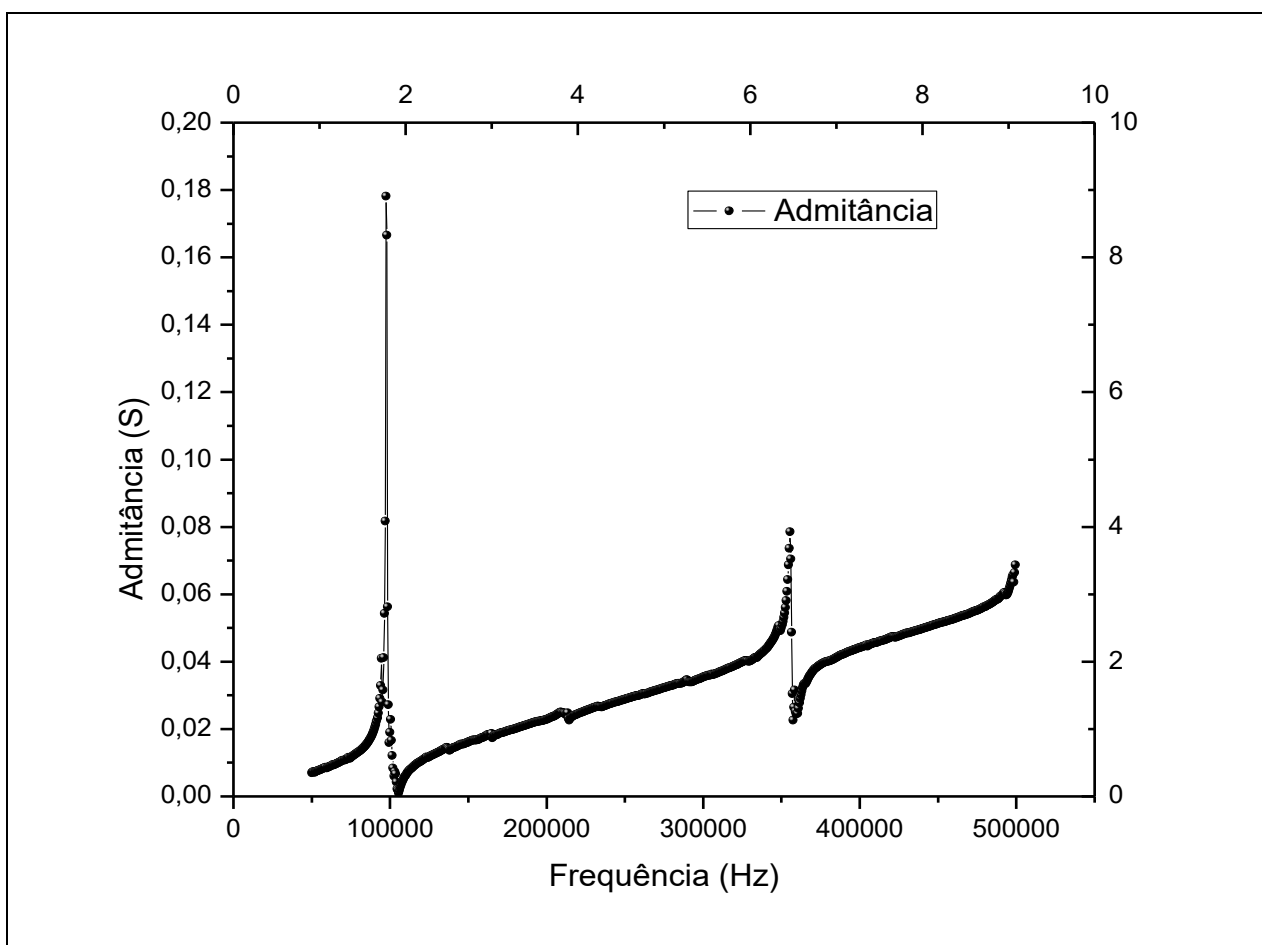


Figura 5.3 – Gráfico da admitância versus frequência para cerâmica PZT-5A tipo disco.

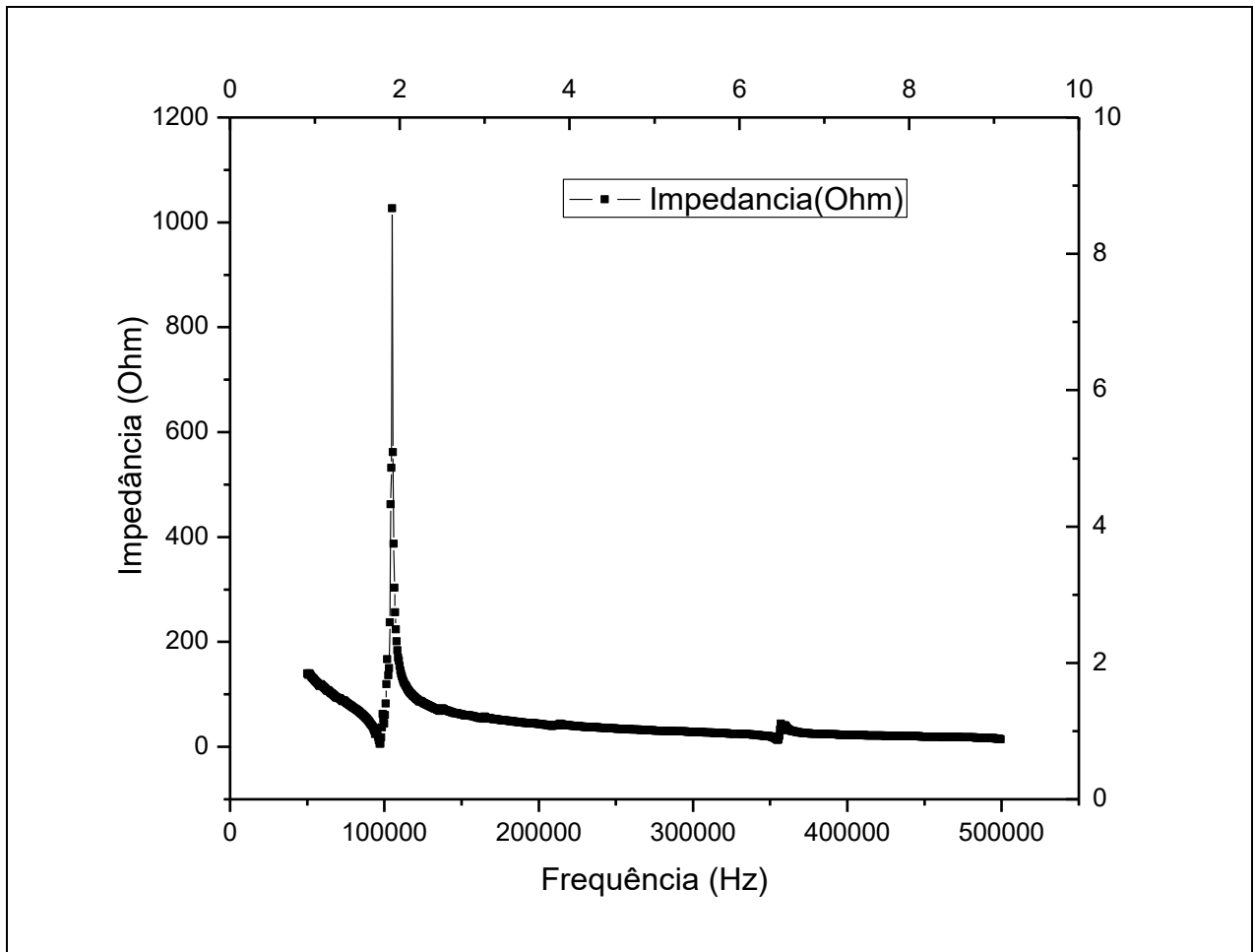


Figura 5.4 – Gráfico da impedância versus frequência para cerâmica PZT-5A tipo disco.

5.1 Circuito multiplicador de tensão usando PZT-5A

Os circuitos multiplicadores de tensão são basicamente constituídos por retificadores que, em função do número de estágios, conseguem retificar o valor da tensão de pico de entrada.

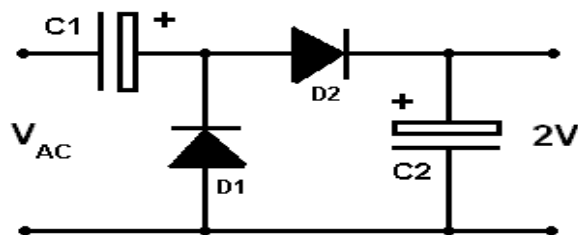


Figura 5.5 – Esquema de um circuito dobrador de tensão.

O circuito da figura abaixo foi feito utilizando o software NI Multisim 14.0, onde foram utilizadas duas cerâmicas PZT-5A, tipo disco, oito diodos 1N4007 e oito capacitores eletrolíticos de 100uF cada.

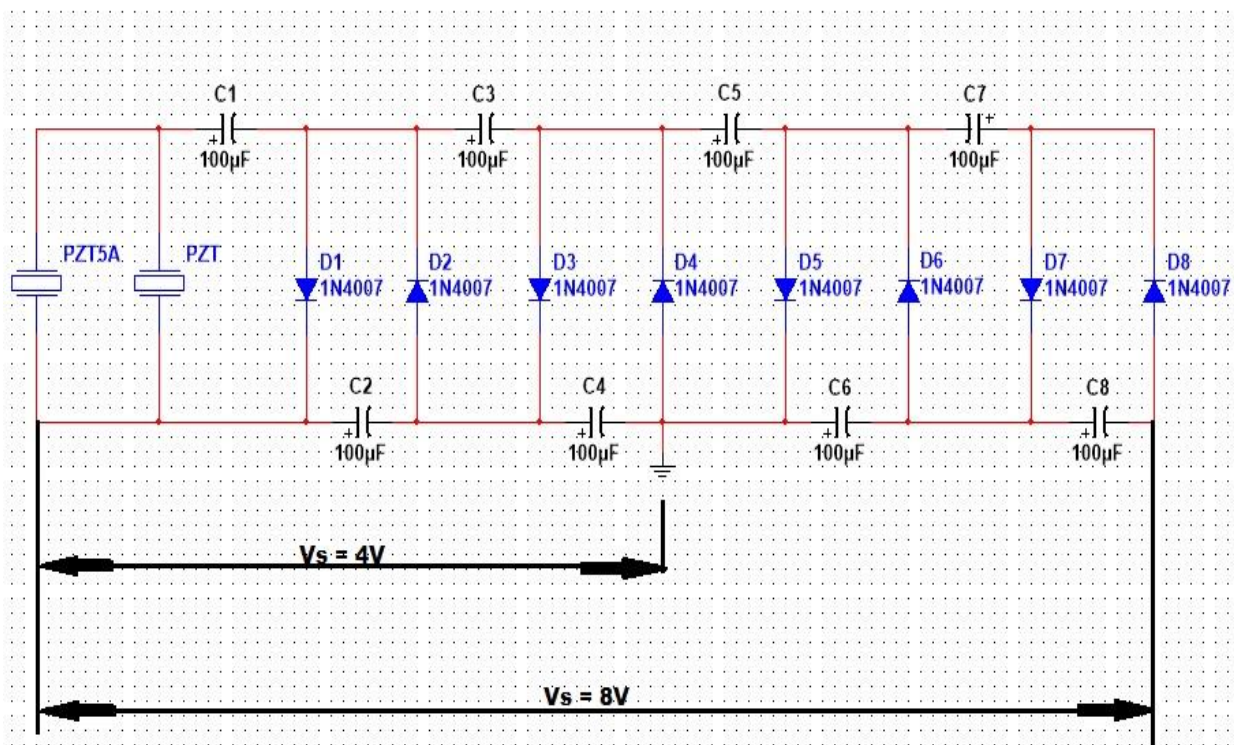


Figura 5.6 – Esquema do circuito multiplicador de tensão usando PZT-5A.

Um circuito multiplicador de tensão converte a voltagem AC (tensão alternada) mais baixa em uma voltagem DC (tensão contínua) mais alta. O número de estágios de diodo e do capacitor pode variar dependendo das necessidades do circuito. Na figura 5.7 é mostrado um circuito de oito estágios que multiplica a tensão AC de entrada e fornece uma tensão DC oito vezes maior que a amplitude da tensão AC de entrada. Como teste de simulação no software Multisim 14.0, suponhamos uma tensão de entrada com amplitude de 1Vpk (tensão de pico) na frequência de 0.5 Hz no lugar das cerâmicas.

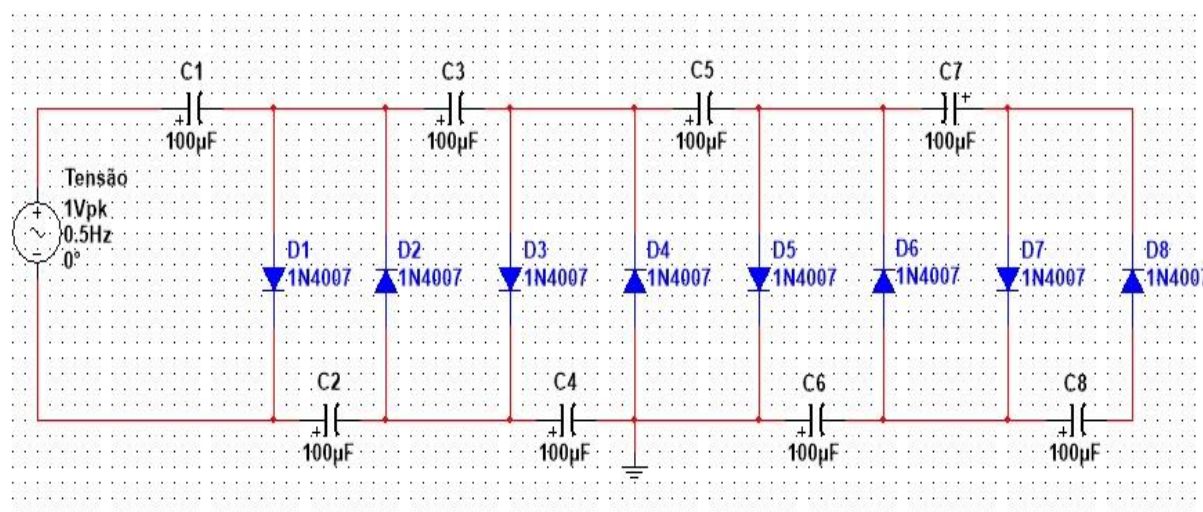


Figura 5.7 – Esquema do circuito multiplicador de tensão de oito estágios.

Quando a tensão da fonte de entrada V_{pk} é positiva, o diodo D1 está diretamente polarizado, carregando o capacitor C1 com 1Vpk. Nesta condição, o diodo D2 está reversamente polarizado, bloqueando a passagem de cargas para C2. Quando a tensão da fonte V_{pk} é negativa, o diodo D2 fica diretamente polarizado, transferindo cargas do capacitor C1 e da fonte V_{pk} para o capacitor C2. Nesta condição o diodo D1 está reversamente polarizado. O mesmo procedimento é aplicado para os outros capacitores e diodos. As formas de onda da tensão de saída do circuito são mostradas na figura 5.8.

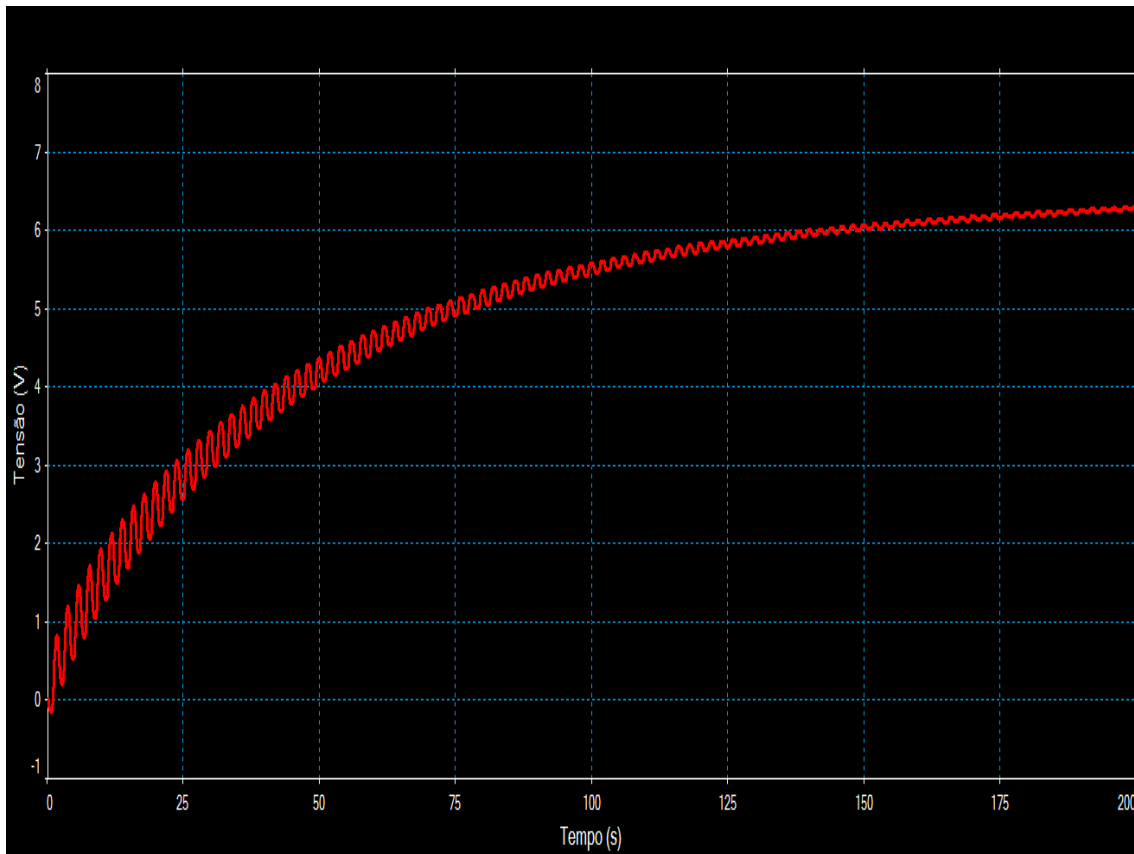


Figura 5.8 – Gráfico da tensão de saída em função do tempo.

Devido à resistência interna da fonte de entrada e aos diodos, o estado estacionário final só é atingido após vários períodos terem decorrido. O gráfico da figura 5.8 mostra que os capacitores não são carregados em seus valores finais durante esses ciclos, o que significa que há uma resposta transitória que se deve levar em conta.

5.2 Procedimento experimental

O experimento foi realizado na UEM, onde o circuito montado foi utilizado para captar a vibração da ventoinha de um ar condicionado para armazenamento de energia utilizável.

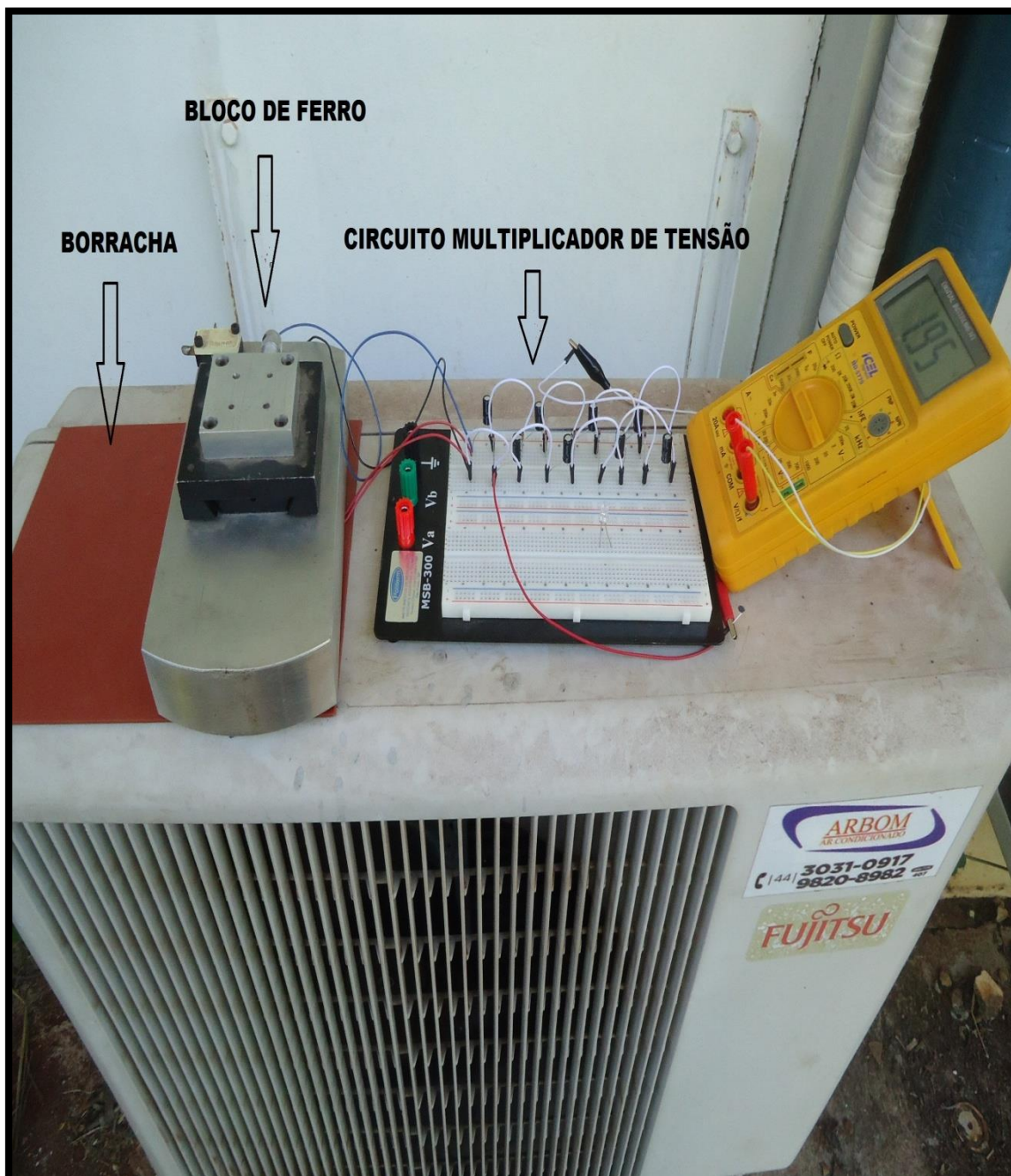


Figura 5.9 – Esquema do circuito multiplicador de tensão usando o PZT -5A com tensão de saída de 1,95V.

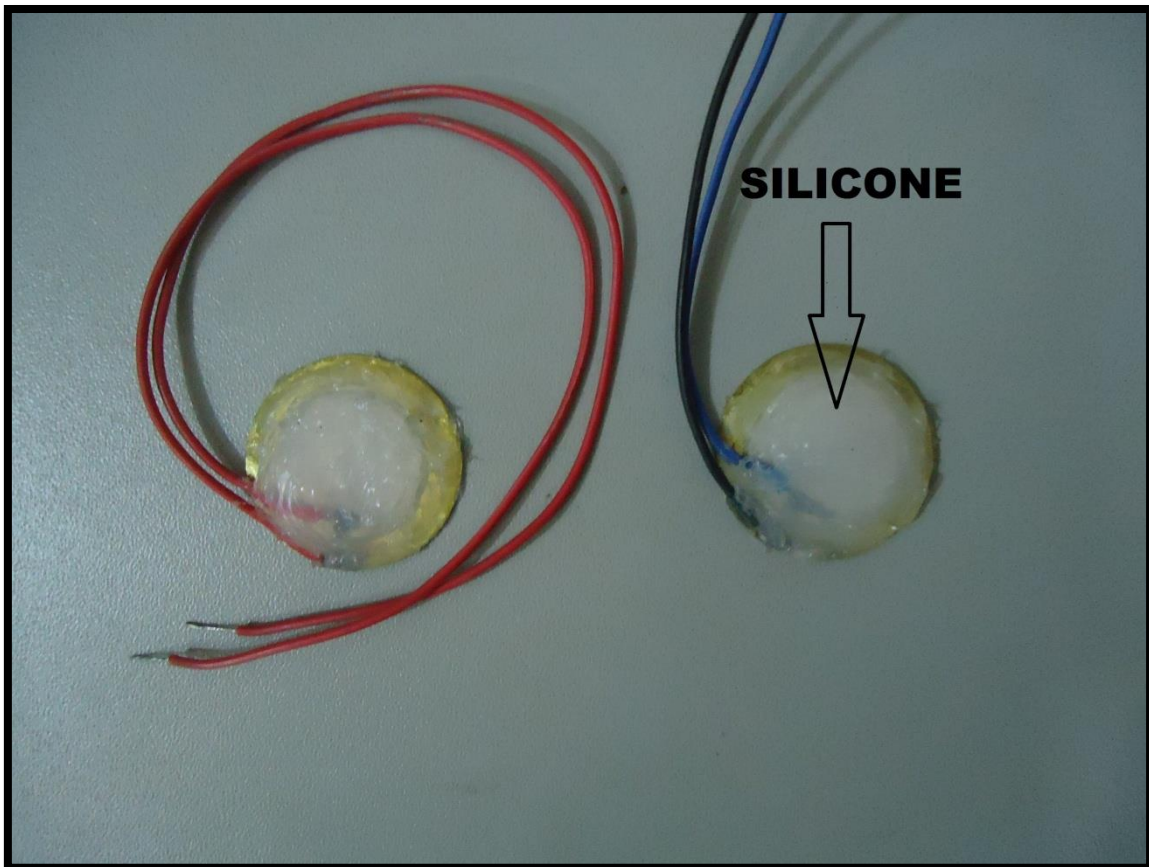


Figura 5.10 – Cerâmica PZT-5A revestida com silicone em sua superfície.

Na figura 5.9, a borracha foi utilizada como base. O bloco de ferro foi colocado sobre as cerâmicas PZT-5A como peso. Isso serviu para uma melhor captação da vibração mecânica da ventoinha. Para um melhor contato físico do bloco de ferro com as cerâmicas, as mesmas foram revestidas com silicone em sua superfície, onde é mostrado na figura 5.10. Com a vibração do bloco em contato com as duas cerâmicas foi possível armazenar energia elétrica utilizável. As figuras a seguir mostram as tensões de saídas que foi possível medir no processo.



Figura 5.11 – Foto tirada com tensão de saída de 2,0V

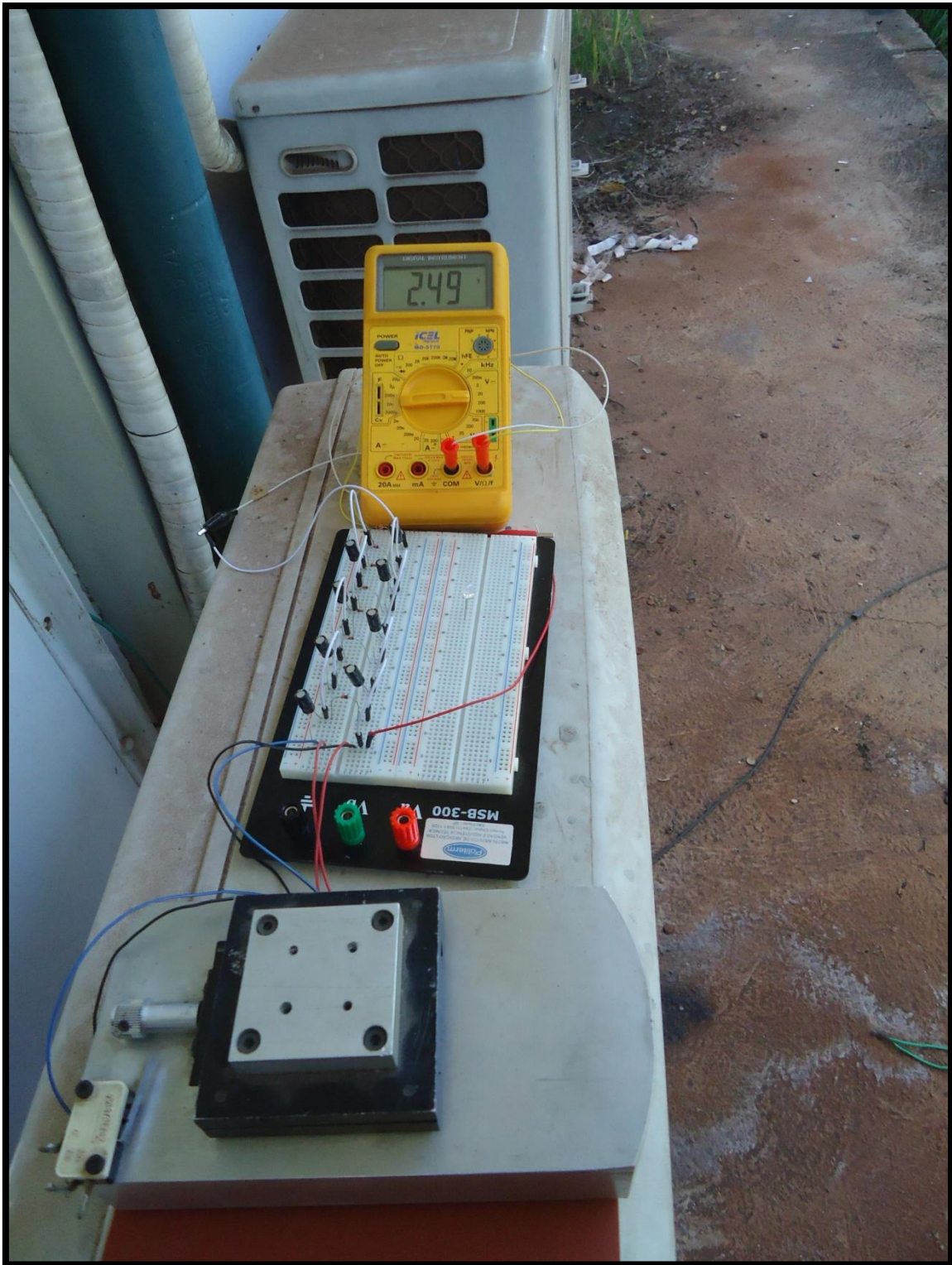


Figura 5.12 – Foto tirada com tensão de saída de 2,49V.



Figura 5.13 – Foto tirada com tensão de saída de 3,0V.

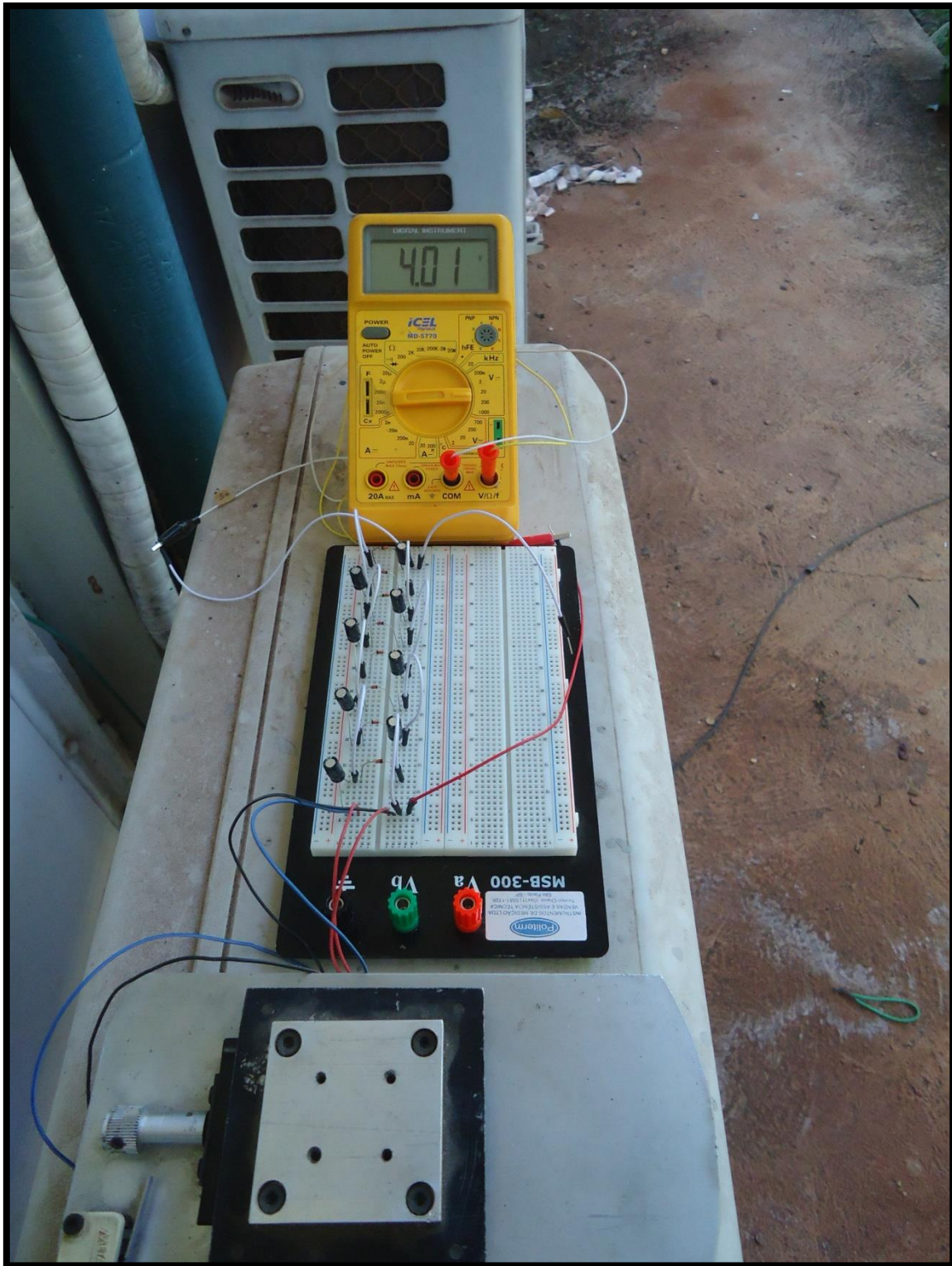


Figura 5.14 – Foto tirada com tensão de saída de 4,01V.



Figura 5.15 – Foto tirada com tensão de saída de 4,15V.



Figura 5.16 – Foto tirada com tensão de saída de 4,60V.

Conclusões

A cerâmica piezoelétrica PZT-5A demonstrou-se ser eficaz na geração de energia limpa, principalmente por necessitar apenas de uma deformação mecânica para gerar energia elétrica utilizável. O tipo de material piezoelétrico mais utilizado por converter vibrações mecânicas em forma de energia utilizável é o titanato zirconato de chumbo (PZT). No entanto, o PZT é um material frágil, apresentando, assim, limitações em sua deformação. Segundo o cientista Michael McAlpine, o PZT chega a ser 100 vezes mais eficiente do que o cristal de quartzo, além de ser um dos mais eficientes podendo converter até 80% da energia mecânica em elétrica [15]. Devido às saídas de energia relativamente baixas dos materiais PZT, a capacidade de gerar e armazenar energia suficiente usando esta tecnologia para alimentar uma máquina, um carro ou qualquer outro dispositivo grande que consome energia ainda está muito distante.

Usando o PZT-5A, foi montado um circuito multiplicador de tensão de oito estágios onde foi usado oito diodos 1N4007 e oito capacitores eletrolíticos de 100uF (micro Farad) para armazenamento de energia elétrica utilizável. Devido à resistência interna das cerâmicas como fonte de tensão de entrada e aos diodos, os capacitores não são carregados em seus valores finais, resultando assim em uma resposta transitória do circuito. A utilização da cerâmica PZT-5A para montagem do circuito foi motivada devido a sua ampla utilização para dispositivos e equipamentos comerciais, além de sua fácil obtenção no mercado e também por possuir como principal característica alto coeficiente piezoelétrico.

Embora as cerâmicas piezoelétricas nunca consigam gerar quantidades significativas de energia, a capacidade de transformar energia mecânica em energia elétrica continuará a expandir o recurso de materiais piezoelétricos. Assim, investimentos devem ser feitos, visando um conhecimento mais aprofundado da piezoeletricidade, para possíveis descobertas de novos materiais.

Referências Bibliográficas

[1] CALLISTER, William D. Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

[2] SUSLICK, K.S.; The Chemical Effects of Ultrasound, Scientific American February 1989.

[3] TICHÝ, Jan ; ERHART, Jirí ; KITTINGER, Erwin; Prívratská, Jana . Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials. Springer, 2010. Pg. 219

[4] CADY, W. G.; Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals, Dover Press, 1964.

[5] Droescher, R. E., Obtenção e caracterização microestrutural e elétrica de cerâmicas PZT-PMN. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais. UFRS, Porto Alegre, 2009.

[6] Piezoelectric Ceramic for Sonar Transducers (Hydrophones & Projectors) Military Standard US DOD MIL STD 1376 A (SH) (1984).

[7] PERREIRA, A. H. A. Cerâmicas Piezoelétricas: Funcionamento e Propriedades. São Carlos: ATCP Engenharia Física, 2010

[8] Inovação Tecnológica. Metal piezelétrico. Disponível em:

<<<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.phpartigo=0101600305>>> Consultado em 05/09/2016.

[9] PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: breves conceitos. Conjuntura e Planejamento, Salvador, n. 149, p.4-11, ago. 2006.

[10] Gaiotto, F.J. – Design de Transformadores Cerâmicos Piezoelétricos e Aplicações. Programa de Pós-Graduação em Física. UEM, Maringá, 2012.

[11] Site do grupo de Física aplicada em materiais – GFAMA Disponível em: << <https://sites.unicentro.br/wp/gfama/estruturas-perovskita/>>> Consultado em: 12/11/2017.

[12] Site da Wikipédia disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Cer%C3%A2mica_piezoel%C3%A9trica>> Consultado em: 18/09/2017.

[13] Site da APC International, Ltda. Disponível em: << <https://www.americanpiezo.com/>>> Consultado em: 12/11/2017.

[14] Site Direct Industry. Disponível em : << <http://www.directindustry.com/pt/>>> Consultado em: 12/11/2017.

[15] Inovação Tecnológica, 2010. Borracha que gera energia poderá alimentar marcapassos e celulares. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=borracha-gera-energia-podera-alimentar-marcapassos-celulares&id=010115100204#.V-11o_ArLIU>>. Consultado em 10/10/2018.

[16] E. M. Syed. Analysis and Modeling of Piezoelectric Transformers. Graduate Department of Electrical and Computer Engineering. University of Toronto. 2001.

[17] Site da Wikipédia disponível em: <<<https://pt.wikipedia.org/wiki/Suscept%C3%A2ncia>>> Consultado em 12/11/2017.

[18] Site da CeramTec disponível em: << <https://www.ceramtec.com.br> >> Consultado em 12/11/2017.