

**Felipe José de Carvalho**

# **CIRCUITO EQUIVALENTE DE LEACH: ESTUDO DE CASOS**

São Carlos  
2014



**Felipe José de Carvalho**

# **CIRCUITO EQUIVALENTE DE LEACH: ESTUDO DE CASOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Sistemas de Energia e Automação apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo

Orientador: Ruy Alberto Corrêa Altafim

São Carlos  
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C331c      Carvalho, Felipe José de  
                  Circuito equivalente de leach: estudo de casos /  
                  Felipe José de Carvalho; orientador Ruy Alberto Corrêa  
                  Altafim. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,  
2014.

1. Modelagem de transdutores. 2. Modelo de leach.  
3. Cerâmica de PZT-4. 4. Software PSPICE. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Felipe José de Carvalho

Título: "Círculo equivalente de Leach: estudo de casos"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 30/06/2014,

com NOTA 9,5 (nove e meio), pela Comissão Julgadora:

*Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim - (Orientador -  
SEL/EESC/USP)*

*Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes - (DEE/CCET/UFSCar)*

*Mestre Wellington Maycon Santos Bernardes - (Doutorando -  
SEL/EESC/USP)*

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Associado Homero Schiabel



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a meus pais, Roberto e Silvia, e a meus irmãos, Diego e Gabriel, por todo apoio, dedicação e companheirismo.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Ruy Alberto Corrêa Altafim pelos ensinamentos ao longo destes cinco anos de curso de graduação e pela oportunidade de ser seu orientado neste trabalho de conclusão de curso.

Ao professor Ricardo Augusto Souza Fernandes e ao mestre Wellington Maycon Santos Bernardes por aceitarem participar da banca de avaliação deste trabalho.

À minha namorada Larissa, que desde o início me apoiou incondicionalmente em todas as etapas deste trabalho.

Ao engenheiro Cezar pela ajuda nos experimentos em laboratório.

Ao mestre Leandro José Medeiros, pela oportunidade única em poder ajudá-lo nos experimentos de seu trabalho de mestrado, e pela amizade.

Ao mestre Yuri Andrey Olivato Assagra pelos ensinamentos na elaboração dos ensaios e da monografia e pela amizade.

Ao pessoal do Grupo de Alta Tensão e Materiais: mestre Daniel Falconi, mestre Daniel Ferreira, Thamyres e Felipe pelas opiniões e amizades.

À bibliotecária Elena Luzia Palloni Gonçalves pela revisão deste trabalho.

Às amizades que fiz em São Carlos, em especial ao Léo, Granada e Bonato, por fazer estes cinco anos inesquecíveis.



## RESUMO

CARVALHO, F. J. **Círcuito equivalente de Leach: estudo de casos.** 82f. Monografia (Trabalho de Conclusão de curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Nos últimos anos, o Grupo de Alta Tensão e Materiais vem desenvolvendo uma nova tecnologia de transdutores piezoelétricos denominados piezoeletretos termo-formados. O avanço nas pesquisas com esses novos materiais evidenciou a necessidade do desenvolvimento de um modelo elétrico equivalente, o qual viabilizasse as simulações com os piezoeletretos. Por meio da modelagem do transdutor é possível prever as consequências que as modificações na espessura do sensor piezoelétrico, a escolha do material de reaguarda, definição das camadas de casamento de impedância acústica, elaboração dos circuitos de sintonia, entre outros parâmetros, causarão no desempenho do piezoeletreto. Na literatura, há vários trabalhos disponíveis sobre modelos elétricos para transdutores piezoelétricos, entretanto, a maioria dos modelos foram desenvolvidos para sensores cerâmicos. Após um estudo sobre os modelos já desenvolvidos, optou-se por utilizar o modelo de Leach para esse trabalho. Assim, o objetivo deste trabalho foi realizar um estudo de caso baseado no modelo de Leach, cujo desempenho foi verificado por meio de um experimento para determinação da resposta transitória de uma cerâmica piezoelétrica de PZT-4. No circuito elétrico de ensaio foram aplicados pulsos de tensão senoidais com frequências variando de 700 kHz a 2,5 MHz. Além dos experimentos realizados em laboratório, foi elaborado um circuito para simulação no software PSPICE. Também foi analisado o desempenho da resposta transitória para dois meios adjacentes à cerâmica, com impedâncias acústicas diferentes: ar e água. Por fim, os resultados das simulações e dos ensaios foram comparados graficamente e estatisticamente, evidenciando a precisão do modelo frente aos ensaios laboratoriais. A partir dos resultados obtidos neste trabalho, pretende-se futuramente adaptar o circuito equivalente de Leach na modelagem dos piezoeletretos termo-formados.

Palavras-chave: Modelagem de transdutores. Modelo de Leach. Cerâmica de PZT-4. Software PSPICE.



## ABSTRACT

CARVALHO, F. J. **Leach's equivalent circuit: cases study.** 82f. Monografia (Trabalho de Conclusão de curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

In the last years, the High-Voltage Group and Materials has been developing a new technology of piezoelectric transducers denominated thermo-formed piezoelectrets. The advances in research with these new materials showed the need to develop an equivalent electric model, which allowed simulations with piezoelectrets. By transducers modeling is possible to predict the effects that changes in the thickness of the piezoelectric sensor, the back material, the definition of matching layers of acoustic impedance, the design of tuning circuits and other parameters, will cause in piezoelectret performance. In literature there are several studies available about electric models for piezoelectric transducers. However, the majority of the models were developed for ceramic sensors. After a study of the models already developed, the Leach's model was chosen for this work. The objective of this study was to make a case study based on the Leach's model, whose performance was verified by an experiment to determine the transient response of the piezoelectric ceramic PZT-4. Pulses of sinusoidal voltage with frequency varying from 700 kHz to 2,5 MHz were applied in the test circuit. In addition to the experiments performed in the laboratory, a circuit was designed to perform simulations in the PSPICE software. It was also analyzed the performance of the transient response for two adjacent ceramic media with different acoustic impedances: air and water. Finally, the results of simulations and tests were compared graphically and statistically, showing good agreement. From the results obtained in this work, it is intended to adapt Leach's equivalent circuit for modeling of thermo-formed piezoelectrets.

Keywords: Transducers modeling. Leach's model. Ceramic PZT-4. Software PSPICE.



## Lista de figuras

Figura 2.1 - Sonar de Langenvin .....	23
Figura 2.2 - Sistema de coordenadas para orientação da polarização e da excitação mecânica em material piezoelétrico .....	24
Figura 2.3 - Representação da célula unitária de uma estrutura perovskita, sem e com dipolo elétrico, respectivamente.....	25
Figura 2.4 – Representação dos dipolos elétricos em uma cerâmica despolarizada, durante e após o processo de polarização, respectivamente.....	25
Figura 2.5 - Primeiros piezoeletretos desenvolvidos no GATM com camadas empilhadas de filmes de Teflon®-FEP e alumínio.....	26
Figura 2.6 - Dispositivo utilizado para formação de amostras de piezoeletretos com distribuições homogêneas de bolhas de ar.....	27
Figura 2.7 - Procedimento de fabricação em laboratório de piezoeletretos com estruturas padronizadas em canaletas seguida da micrografia ótica da seção transversal dessa estrutura.....	27
Figura 2.8 - Modelo do transdutor com dois terminais .....	28
Figura 2.9 - Transdutor piezoelétrico do tipo espessura conectado a um terminal elétrico .....	30
Figura 2.10 – Representação de uma linha de transmissão .....	31
Figura 2.11 - Modelo de Leach para transdutores piezoelétricos do tipo espessura. Em: (a) parte mecânica; (b) parte elétrica .....	31
Figura 3.1 - Cerâmica piezoelétrica de PZT-4 .....	33
Figura 3.2 - Representação do ensaio da resposta transiente da cerâmica .....	34
Figura 3.3 – Detalhe da resposta transitória da cerâmica obtida por meio do osciloscópio.....	35
Figura 3.4 - Três configurações de ensaio. Em (a): cerâmica solta no ar; (b): cerâmica flutuando na água; (c): cerâmica submersa na água .....	36
Figura 3.5 - Circuito equivalente do gerador de pulso senoidal .....	37
Figura 3.6 - Circuito elétrico de ensaio .....	37
Figura 3.7 - Parte elétrica do modelo de Leach .....	38
Figura 3.8 - Parte mecânica do modelo de Leach sem a linha de transmissão .....	38
Figura 3.9 - Linha de transmissão mecânica, seguida de seus parâmetros de simulação .....	39

Figura 3.10 - Linhas de transmissão mecânicas com as resistências representando os diferentes meios. Em (a): Ensaio com a cerâmica flutuando na água; (b): cerâmica solta no ar; (c): cerâmica submersa na água.....	40
Figura 3.11 - Circuito final para simulação do ensaio transiente com a cerâmica .....	41
Figura 4.1 - Variação dos meios adjacentes para 2,5 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	44
Figura 4.2 - Variação dos meios adjacentes para 2 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	45
Figura 4.3 - Variação dos meios adjacentes para 1,5 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	46
Figura 4.4 - Variação dos meios adjacentes para 1 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	47
Figura 4.5 - Variação dos meios adjacentes para 950 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	48
Figura 4.6 - Variação dos meios adjacentes para 900 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	49
Figura 4.7 - Variação dos meios adjacentes para 850 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	50
Figura 4.8 - Variação dos meios adjacentes para 800 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	51
Figura 4.9 - Variação dos meios adjacentes para 750 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	52
Figura 4.10 - Variação dos meios adjacentes para 700 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação .....	53
Figura 4.11 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (2,5 MHz) .....	54
Figura 4.12 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (2,5 MHz) .....	54
Figura 4.13 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (2,5 MHz) .....	55
Figura 4.14 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (2 MHz) .....	55
Figura 4.15 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (2 MHz) .....	56
Figura 4.16 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (2 MHz) .....	56
Figura 4.17 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (1,5 MHz) .....	57
Figura 4.18 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (1,5 MHz) .....	57
Figura 4.19 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (1,5 MHz) .....	58
Figura 4.20 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (1 MHz) .....	58
Figura 4.21 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (1 MHz) .....	59
Figura 4.22 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (1 MHz) .....	59

Figura 4.23 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (950 kHz) .....	60
Figura 4.24 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (950 kHz) .....	60
Figura 4.25 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (950 kHz) .....	61
Figura 4.26 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (900 kHz) .....	61
Figura 4.27 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (900 kHz) .....	62
Figura 4.28 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (900 kHz) .....	62
Figura 4.29 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (850 kHz) .....	63
Figura 4.30 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (850 kHz) .....	63
Figura 4.31 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (850 kHz) .....	64
Figura 4.32 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (800 kHz) .....	64
Figura 4.33 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (800 kHz) .....	65
Figura 4.34 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (800 kHz) .....	65
Figura 4.35 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (750 kHz) .....	66
Figura 4.36 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (750 kHz) .....	66
Figura 4.37 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (750 kHz) .....	67
Figura 4.38 - Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (700 kHz) .....	67
Figura 4.39 - Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (700 kHz) .....	68
Figura 4.40 - Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (700 kHz) .....	68



## **Lista de tabelas**

Tabela 4.1 - Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica solta no ar .....	70
Tabela 4.2 - Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica flutuando sobre a água .....	70
Tabela 4.3 - Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica submersa na água .....	71
Tabela 4.4 - Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica solta no ar considerando primeira metade dos valores de tensão.....	72
Tabela 4.5 - Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica flutuando sobre a água considerando primeira metade dos valores de tensão .....	72
Tabela 4.6 - Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica submersa na água considerando primeira metade dos valores de tensão).....	73



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1 Fundamentos de piezoelectricidade e materiais piezoelétricos .....	23
2.2 Circuitos elétricos análogos.....	27
2.3 Modelo de Leach.....	29
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
3.1 Cerâmica piezoelétrica .....	33
3.2 Ensaios experimentais .....	34
3.3 Implementação do circuito de simulação via PSPICE.....	36
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>43</b>
4.1 Variação dos meios adjacentes à cerâmica.....	43
4.2 Comparação entre ensaio e simulação .....	54
4.3 Erros estatísticos .....	69
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>79</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, o Grupo de Alta Tensão e Materiais (GATM) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) vem desenvolvendo uma nova tecnologia de sensores a base de polímeros piezoeletretos denominados de piezoeletretos termo-formados. Neste contexto, o GATM tem pesquisado a aplicação dos piezoeletretos em meio líquido, tal como o hidrofone ultrassônico. Com o desenvolvimento do sensor, surgiu a necessidade do desenvolvimento de um modelo elétrico para sua simulação. Por meio da modelagem é possível predizer detalhes construtivos do sistema. Parâmetros como o material de retaguarda, espessura do elemento transdutor, camadas de casamento de impedância acústica, circuitos de sintonia, entre outros, podem ser determinados por meio de simulações, a fim de se obter um melhor desempenho do dispositivo.

Diferente dos polímeros, tal como os piezoeletretos acima mencionados, os dispositivos piezoeletretos a base de materiais cerâmicos vêm sendo amplamente pesquisados desde o início da década de 50. Deste modo, grande parte dos modelos existentes é baseada na estrutura física e nas equações que regem a piezoelectricidade nestes materiais.

Deste modo, o objetivo desta pesquisa é realizar um estudo introdutório sobre os principais modelos de simulação por meio de circuitos elétricos análogos, sendo estes baseados nas estruturas de transdutores com poucas perdas, tais como os cristais e as cerâmicas. Pela simplicidade e flexibilidade, características que o torna aplicável em softwares de análise de circuitos elétricos como o PSPICE, a pesquisa foi fundamentada no modelo de Leach.

A metodologia da pesquisa, por sua vez, baseou-se no ensaio transitente de uma cerâmica piezoelettrica de PZT-4. O ensaio consistiu na aplicação de pulsos de tensão senoidais de um ciclo em um circuito de ensaio, e posterior verificação da resposta elétrica da cerâmica. Os pulsos aplicados variaram de 700 kHz a 2,5 MHz. O mesmo ensaio foi reproduzido para dois meios adjacentes à cerâmica com impedâncias acústicas diferentes: ar e água. Em seguida, buscou-se implementar tal ensaio no software PSPICE, no qual o transdutor cerâmico é modelado por meio do circuito elétrico análogo de Leach

Por fim, os resultados foram apresentados em três etapas. Primeiramente foi analisado o efeito da variação dos meios adjacentes (ar e água) na resposta transitente da cerâmica, tanto para as simulações quanto para os ensaios. Feito isso, os sinais resultantes da simulação foram comparados em um mesmo gráfico com os sinais medidos através do osciloscópio, para todos os ensaios realizados. Finalmente, foi realizada uma análise numérica entre os dados simulados e medidos por meio de três expressões estatísticas.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O objetivo deste capítulo é apresentar uma revisão sobre os principais conceitos teóricos que embasam este trabalho, revisão esta que se fundamenta em relevante bibliografia. Os conceitos de piezoelectricidade e o desenvolvimento dos materiais piezoelétricos foram abordados na seção 2.1. Na seção 2.2, realizou-se minuciosa pesquisa a respeito dos principais circuitos elétricos análogos utilizados na simulação de transdutores piezoelétricos. Na seção 2.3, foi detalhado o modelo elaborado por Leach (1994) e utilizado nas simulações desta pesquisa.

### 2.1 Fundamentos de piezoelectricidade e materiais piezoelétricos

A piezoelectricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880 em estudos realizados com cristais de quartzo. Foi observado o aparecimento de dipolos elétricos nas superfícies opostas de alguns materiais cristalinos quando estes eram sujeitos a pressões mecânicas, fato denominado de piezoelectricidade direta. A palavra piezoelectricidade foi sugerida inicialmente por Hermann Hankel em 1881, termo derivado do grego “piezen”, que significa pressionar. No mesmo ano, Gabriel Lipmann sugeriu a existência do efeito piezoelétrico inverso: a aplicação de uma tensão elétrica nas superfícies opostas do cristal induz a deformação mecânica deste. Fato confirmado experimentalmente pelos irmãos Curie em 1882 (TRAINER, 2003). A primeira aplicação relevante da piezoelectricidade ocorreu durante a Primeira Guerra Mundial, quando Paul Langenvin desenvolveu um sonar para detectar submarinos. O dispositivo era formado por cristais de quartzo empilhados, envoltos por placas de aço (SHERMAN; BUTLER, 2007).

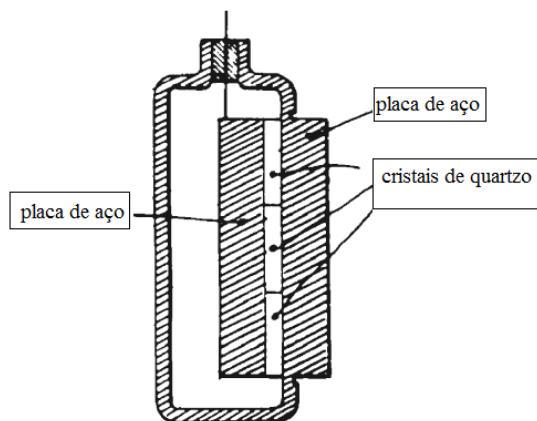


Figura 2.1: Sonar de Langenvin

Basicamente, o efeito piezoelétrico de um material é regido por duas equações fundamentais que relacionam parâmetros elétricos e mecânicos. A densidade de fluxo elétrico (D) e o campo elétrico (E) representam as grandezas elétricas, enquanto que a tensão mecânica (X) e a deformação (x) se referem às grandezas mecânicas (MEDEIROS, 2014):

$$D = \epsilon E + dX \quad [C/m^2], \quad (2.1)$$

$$x = sX + dE \quad [m], \quad (2.2)$$

onde  $\epsilon$  representa a permissividade dielétrica,  $s$  a constante elástica e  $d$  é a constante piezoelétrica do material. A primeira equação representa o efeito piezoelétrico direto e a segunda, o inverso.

A constante piezoelétrica é representada com dois subscritos ( $d_{ij}$ ) que servem como orientação eletromecânica, sendo que o subscrito  $i$  indica a direção da polarização do material quando este não está submetido a um campo elétrico externo e  $j$  indica o sentido da excitação externa aplicada. A Figura 2.2 mostra o sistema de coordenadas associado a essas direções. Os números 1, 2 e 3 indicam as direções normais ao material, enquanto que os números 4, 5 e 6 se referem às direções de cisalhamento. Em transdutores piezoelétricos do tipo espessura (do inglês, *thickness mode*), a polarização é feita de modo a coincidir com o eixo Z do sistema de coordenadas e o seu coeficiente piezoelétrico é caracterizado por  $d_{33}$  (ALTAFIM, 2010).

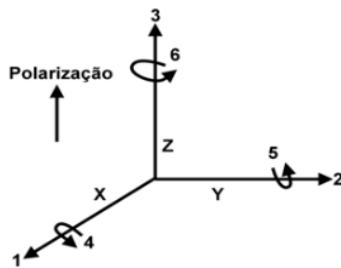


Figura 2.2: Sistema de coordenadas para orientação da polarização e da excitação mecânica em material piezoelétrico

Devido à escassez de fontes naturais de cristais de quartzo, as propriedades piezoelétricas dos materiais cerâmicos começaram a ser pesquisadas durante a Segunda Guerra Mundial. Na década de 1950, o titanato de bário ( $BaTiO_3$ ) foi a primeira cerâmica a ser utilizada como transdutor piezoelétrico. Em 1954, foi desenvolvida a cerâmica titano-zirconato de chumbo ( $PbZrTiO_3$  -

$\text{PbTiO}_3$ ), ou cerâmica de PZT. Rapidamente, as variações do PZT tornaram-se as cerâmicas mais utilizadas em aplicações piezoelétricas (TRAINER, 2003).

As cerâmicas de PZT pertencem à família das perovskitas, cuja estrutura geral é mostrada na Figura 2.3. Os cátions  $\text{Zr}^{4+}$  e  $\text{Ti}^{4+}$  são distribuídos de forma aleatória no centro da estrutura. Quando comparadas ao titanato de bário, as composições de PZT apresentam maiores coeficientes eletromecânicos, maior temperatura de Curie<sup>1</sup>, processos de polarização mais simples e a possibilidade de introdução de materiais dopantes em suas estruturas, permitindo alterar de forma controlada muitas de suas propriedades eletromecânicas. Dos estudos com a introdução de materiais dopantes, surgiram as cerâmicas de PZT-4, -5, -6, -7 e -8 (HAERTLING, 1999).

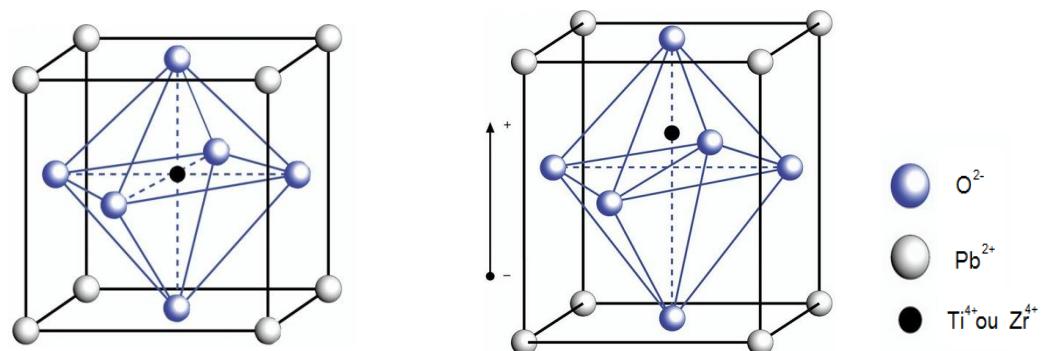


Figura 2.3: Representação da célula unitária de uma estrutura perovskita, sem e com dipolo elétrico, respectivamente

Os processos de fabricação das cerâmicas piezoelétricas envolvem uma etapa fundamental chamada de polarização. Tal etapa tem por objetivo o alinhamento dos dipolos da estrutura interna da cerâmica tal como mostrado na Figura 2.4. Além desta etapa, o processo compreende a preparação das amostras, adição de dopantes, secagem, resfriamento, aquecimento, adição de eletrodos, enfim, outras fases que dependem da aplicação final do transdutor (HAERTLING, 1999).

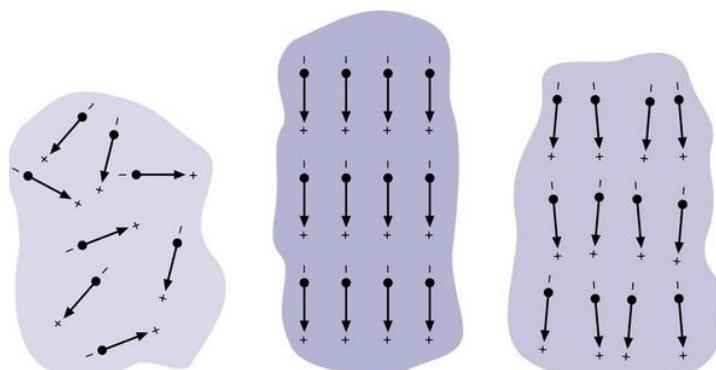


Figura 2.4: Representação dos dipolos elétricos em uma cerâmica despolarizada, durante e após o processo de polarização, respectivamente

<sup>1</sup> Temperatura na qual a estrutura do material se modifica e deixa de apresentar propriedades piezoelétricas.

O estudo da piezoelectricidade em polímeros teve início com as pesquisas de Henji Kawai do *Kobayashi Institute of Physical Research* de Tóquio, quando este realizou um estudo sobre a polarização remanescente em filmes orientados de polivinilideno (PVDF). Algumas características como a baixa densidade e maior flexibilidade motivaram as pesquisas sobre a piezoelectricidade nos materiais poliméricos (KAWAI, 1969).

Nos anos 80, foi observado que polímeros porosos de polipropileno (PP) quando eletricamente carregados passaram a apresentar altos coeficientes piezoeletétricos, similares ou superiores aos das cerâmicas (GERHARD-MULTHAUPT, 2002).

Seguindo a linha de pesquisa em polímeros porosos, foram desenvolvidos no GATM/EESC/USP, sob coordenação do professor titular Ruy Alberto Corrêa Altafim, os piezoeletretos termo-formados. Tais materiais são similares aos piezoeletretos porosos por apresentarem cavidades internas eletricamente carregadas, que se refletem no elevado coeficiente piezoeletétrico. A diferença se encontra na sua fabricação, processo que permite o controle das cavidades em formas geométricas desejadas de acordo com a aplicação. Nas Figuras de 2.5 a 2.7 são encontrados alguns dos piezoeletretos desenvolvidos no GATM, onde é possível observar as suas diferentes geometrias e processos de fabricação.

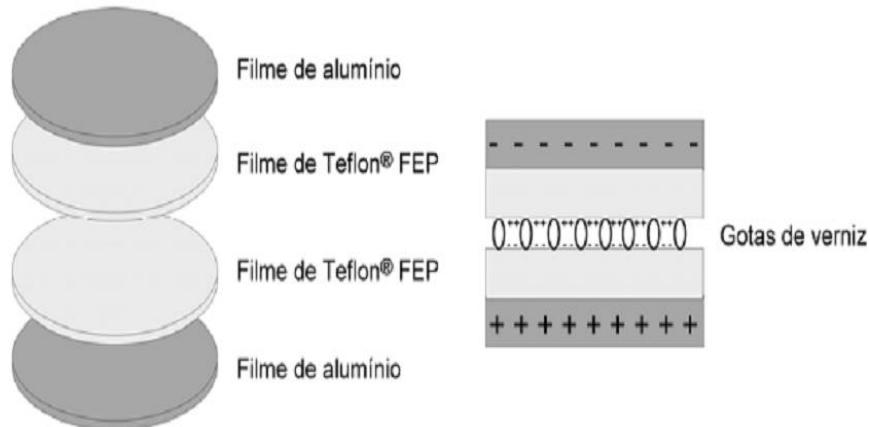


Figura 2.5: Primeiros piezoeletretos desenvolvidos no GATM com camadas empilhadas de filmes de Teflon®-FEP e alumínio

Fonte: Altafim et al. (2003)

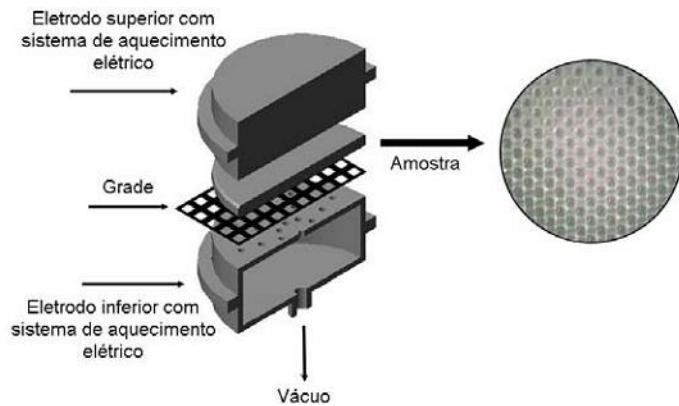


Figura 2.6: Dispositivo utilizado para formação de amostras de piezoeletretos com distribuições homogêneas de bolhas de ar

Fonte: Altafim et al. (2006)

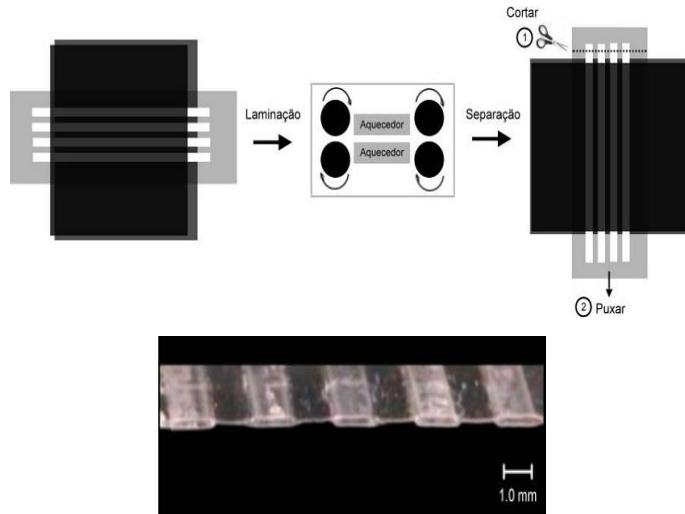


Figura 2.7: Procedimento de fabricação em laboratório de piezoeletretos com estruturas padronizadas em canaletas seguida da micrografia ótica da seção transversal dessa estrutura

Fonte: Altafim (2010)

## 2.2 Circuitos elétricos análogos

A analogia entre grandezas elétricas e mecânicas tornou possível a modelagem de transdutores por meio de circuitos elétricos. Basicamente, um transdutor eletromecânico pode ser representado por um sistema com dois terminais: um terminal elétrico e outro mecânico. Neste modelo, a força mecânica  $F$  (N) é análoga à tensão elétrica  $v$  (V), e a corrente elétrica  $i$  (A) é análoga à velocidade de deslocamento  $u$  (m/s) das partículas do transdutor (SHERMAN; BUTLER,

2007). Esta analogia é chamada de analogia de impedância (LEACH, 1994). Todos os circuitos equivalentes citados neste trabalho apresentam esta analogia.

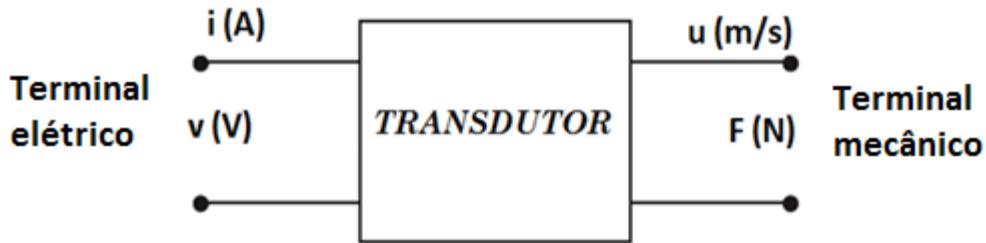


Figura 2.8: Modelo do transdutor com dois terminais

Mason<sup>2</sup> (1948 apud Kossof 1966) desenvolve um modelo com dois terminais mecânicos e um elétrico. Os terminais mecânicos simulam as superfícies do transdutor em contato com os meios adjacentes: retaguarda (*backing*) e a parte frontal. O modelo apresenta um transformador interligando os terminais, além de duas capacitâncias, sendo uma delas, negativa.

Kossof (1966) faz uma análise detalhada dos efeitos dos materiais de retaguarda (*backing*) no desempenho de transdutores cerâmicos de PZT, utilizando como modelo o circuito análogo de Mason.

Redwood (1961) utiliza de forma pioneira os conceitos da teoria de linhas de transmissão e cria um circuito análogo adaptado do modelo de Mason. O autor utiliza de analogias entre as equações fundamentais da piezoelectricidade e das linhas de transmissão para representar as reflexões de transientes mecânicos nas extremidades de um transdutor piezoelétrico quando submetido a excitações.

Leedom, Krimholtz, e Matthaei (1971) propõem um circuito análogo útil na simulação de dispositivos formados por transdutores piezoelétricos interligados em cascata. O modelo é constituído de um transformador ideal interligando o centro de uma linha de transmissão acústica (parte mecânica) a uma reatância (parte elétrica). O transformador apresenta uma relação de transformação dependente da frequência.

Já Morris e Hutchens (1986) sugerem pela primeira vez a utilização de fontes controladas de tensão e de corrente na modelagem de transdutores piezoelétricos. Os autores fazem uma adaptação do modelo sugerido por Redwood (1961), substituindo a capacitância negativa e o

<sup>2</sup> MASON, W. P. *Electromechanical Transducers and Wave Filters*. Princeton, NJ: Van Nostrand, 1948.

transformador ideal por fontes controladas de tensão e de corrente. No estudo também foi realizada a simulação pelo software SPICE de um transdutor cerâmico.

Adaptando as equações presentes no estudo de Redwood (1961) para as equações da linha de transmissão, Leach (1994) cria outro modelo para transdutores do tipo espessura utilizando duas fontes controladas de tensão, um capacitor e uma linha de transmissão sem perdas. Ele propõe modelos de circuitos para simulação no PSPICE.

Püttmer et al. (1997) propõe modificações ao modelo de Leach (1994), mais precisamente acrescentando parâmetros à linha de transmissão mecânica, a fim de que transdutores cerâmicos com acentuados níveis de perdas mecânicas pudessem ser implementados pelo modelo.

Van Deenter et al. (2000) realiza um estudo comparativo sobre a influência da temperatura e da frequência no modelo de Leach (1994), simulando com o PSPICE ensaios de pulso-eco em diferentes meios de propagação do som.

Por fim, Dahiya, Valle e Lorenzelli (2009) desenvolvem um modelo similar ao de Leach (1994), considerando as perdas mecânicas, elétricas e piezoelétricas, por meio de constantes elásticas, dielétricas e piezoelétricas complexas. Simulando o desempenho do polímero PVDF através do SPICE, os resultados se mostraram mais precisos quando comparados às simulações realizadas com o modelo proposto por Püttmer et al. (1997).

### 2.3 Modelo de Leach

Leach (1994) desenvolveu um circuito análogo para transdutores do tipo espessura utilizando fontes controladas de tensão. O circuito é constituído basicamente por uma parte mecânica, representada por uma linha de transmissão e por uma fonte de tensão controlada, e por uma parte elétrica, composta da capacitância do transdutor e de outra fonte de tensão controlada.

O circuito análogo é originado a partir de três equações oriundas do estudo de Redwood (1961), responsáveis por governar a propagação da onda de pressão unidimensional ao longo do eixo z do transdutor da figura (2.9), quando excitado por uma força mecânica ou por um campo elétrico:

$$\frac{df}{dz} = -\rho Asu, \quad (2.3)$$

$$c \frac{d\zeta}{dz} = -\frac{1}{A} f + hD, \quad (2.4)$$

$$E = -h \frac{d\zeta}{dz} + \frac{1}{\epsilon} D, \quad (2.5)$$

sendo que  $f$  é a força mecânica,  $u$  é a velocidade das partículas na direção  $z$ ,  $s$  é a frequência complexa,  $\rho$  é a densidade do material,  $A$  é a área superficial perpendicular ao eixo  $z$  do transdutor,  $\varsigma$  é a posição de cada partícula no eixo  $z$ ,  $c$  é a constante elástica relativa,  $h$  é a constante piezoelétrica<sup>3</sup> (N/C),  $D$  é densidade de fluxo elétrico na direção  $z$ ,  $E$  é campo elétrico na direção  $z$  e  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica do material.

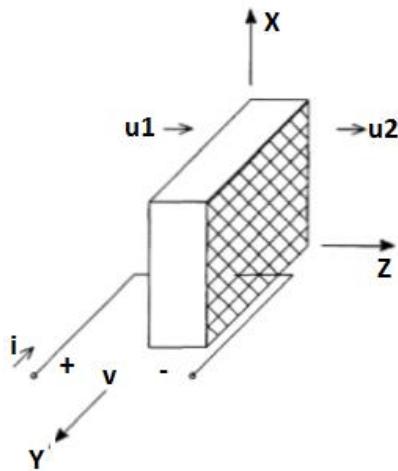


Figura 2.9: Transdutor piezoelétrico do tipo espessura conectado a um terminal elétrico

Leach (1994) propôs as seguintes equações, cujas deduções se encontram no anexo A:

$$\frac{d}{dz} \left[ f - \frac{h}{s} i \right] = -\rho A s u \quad (2.6)$$

$$\frac{du}{dz} = -\frac{s}{Ac} \left[ f - \frac{h}{s} i \right] \quad (2.7)$$

$$v = \frac{h}{s} [u_1 - u_2] + \frac{1}{C_0 s} i \quad (2.8)$$

<sup>3</sup> A constante  $h$  é a razão entre a constante piezoelétrica  $e$  ( $C/m^2$ ) e a permissividade  $\epsilon$  ( $C^2/N.m^2$ ) do material (VAN DEVENTER; LÖFQVIST; DELSING, 2000).

As equações (2.6) e (2.7) são semelhantes às equações da linha de transmissão sem perdas, cuja estrutura utilizada no trabalho de Leach (1994) é mostrada na Figura 2.10.

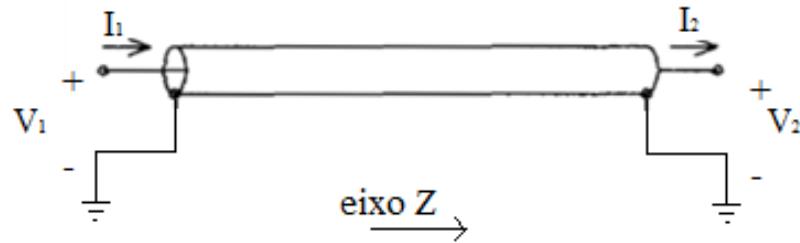


Figura 2.10: Representação de uma linha de transmissão.

Considerando a linha da Figura 2.10, com tensão  $V$  e corrente  $I$ . As equações da linha são:

$$\frac{dV}{dz} = -LsI, \quad (2.9)$$

$$\frac{dI}{dz} = -CsV, \quad (2.10)$$

sendo que  $L$  é a indutância por unidade de comprimento e  $C$  a capacitância por unidade de comprimento da linha. Comparando-se as equações 2.6, 2.7, 2.9 e 2.10, nota-se uma analogia entre  $V$  e  $[f - \frac{h}{s}i]$  e entre  $I$  e  $u$ . A partir das equações (2.6), (2.7) e (2.8) Leach (1994) sugere o seguinte modelo da Figura 2.10.

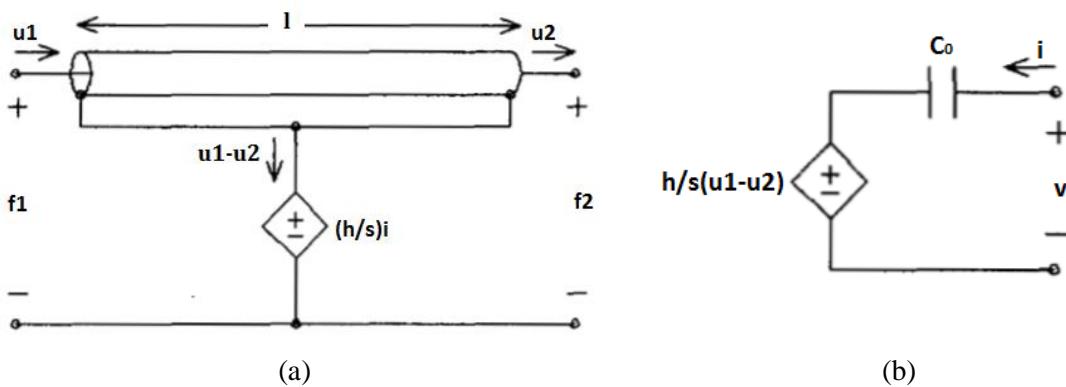


Figura 2.11: Modelo de Leach para transdutores piezoelétricos do tipo espessura. Em: (a) parte mecânica; (b) parte elétrica

No modelo da Figura 2.10, as fontes controladas de tensão são representadas pelos losangos. A conversão eletromecânica de energia é realizada por meio destas duas fontes de tensão:

a corrente da parte elétrica (i) controla a tensão da fonte da parte mecânica, enquanto que a corrente da parte mecânica ( $u_1-u_2$ ) controla a tensão da fonte da parte elétrica (LEACH, 1994).

Os parâmetros da linha de transmissão do modelo são calculados por meio das constantes mecânicas do material. A indutância por unidade de comprimento ( $L$ ), a capacidade por unidade de comprimento ( $C$ ), a velocidade de fase<sup>4</sup> ( $u_f$ ) e a impedância característica da linha ( $Z_0$ ) do modelo são (LEACH, 1994):

$$L = \rho A \quad [\text{kg/m}] \quad (2.11)$$

$$C = \frac{1}{Ac} = \frac{1}{A\rho u_f^2} \quad [s^2/\text{kg} \cdot \text{m}] \quad (2.12)$$

$$u_f = (c/\rho)^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (2.13)$$

$$Z_0 = \rho A u_f \quad [\text{kg/s}] \quad (2.14)$$

---

<sup>4</sup> A velocidade de fase do modelo refere-se à velocidade do som no material (VAN DEVENTER; LÖFQVIST; DELSING, 2000).

### 3 METODOLOGIA

O modelo proposto por Leach (1994) motivou os trabalhos de Püttmer et. al (1997), Van Deventer et. al (2000) e de Dahiya, Valle e Lorenzelli (2009), cujos resultados demonstraram a eficácia do circuito análogo em diferentes aplicações, além da flexibilidade com que este pode ser implementado no PSPICE. Tais resultados motivaram a utilização do modelo neste trabalho.

Este capítulo é dividido em três seções. A primeira descreve o transdutor piezoelétrico utilizado nos ensaios. A segunda detalha os ensaios realizados, enquanto que a terceira é focada na construção do circuito de simulação via software PSPICE.

#### 3.1 Cerâmica piezoelétrica

A parte experimental deste trabalho foi realizada com um disco de cerâmica piezoelétrica do tipo PZT-4 (Figura 3.1). As dimensões e as constantes físicas do PZT-4 utilizadas na simulação encontram-se na sequência.

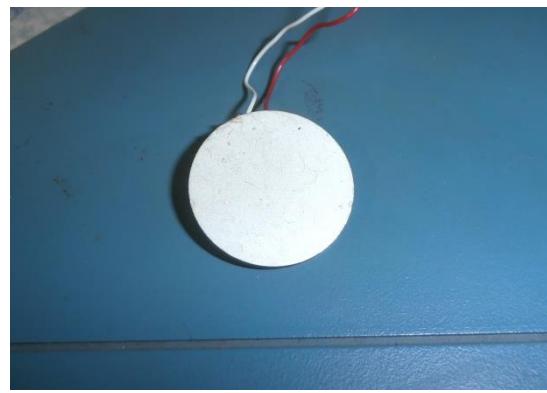


Figura 3.1: Cerâmica piezoelétrica de PZT-4

Dimensões da cerâmica:

- Espessura → 2 mm;
- Diâmetro da seção transversal → 25 mm;
- Área da seção transversal → 0,00049 m<sup>2</sup>.

Constantes físicas do PZT-4<sup>5</sup>:

- Constante dielétrica relativa  $\epsilon/\epsilon_0$  (amostra fixa<sup>6</sup>)  $\rightarrow 635$ ;
- Velocidade do som  $u_s \rightarrow 4600$  m/s;
- Constante piezoelétrica  $h \rightarrow 2,68 \cdot 10^9$  N/C;
- Densidade  $\rho \rightarrow 7500$  kg/m<sup>3</sup>.

### 3.2 Ensaios experimentais

Os ensaios realizados neste trabalho basearam-se na análise transitória realizada por Püttmer et al (1997). O experimento consistiu na aplicação de um pulso de tensão senoidal de 20 Volts de pico a pico no circuito mostrado na Figura (3.2), por meio de um gerador de sinais do modelo AFG 3022C Tektronix com resistência de saída de  $50\ \Omega$  e configurado no modo “burst” com um ciclo de onda senoidal. O circuito elétrico é composto por dois diodos 1N4148 dispostos em anti-paralelo, cuja função é isolar a medição de qualquer ruído de baixa amplitude oriundo do gerador (SELFridge, 1985). Ademais, o circuito é composto por um resistor de  $47\ k\Omega$  em paralelo com a cerâmica. A tensão resultante da aplicação do pulso foi medida com um osciloscópio do modelo Agilent Infinivision DSO-X 3024A com resistência e capacitância de entrada de  $1\ M\Omega$  e  $14\ pF$ , respectivamente, tal como mostrado na figura 3.3.

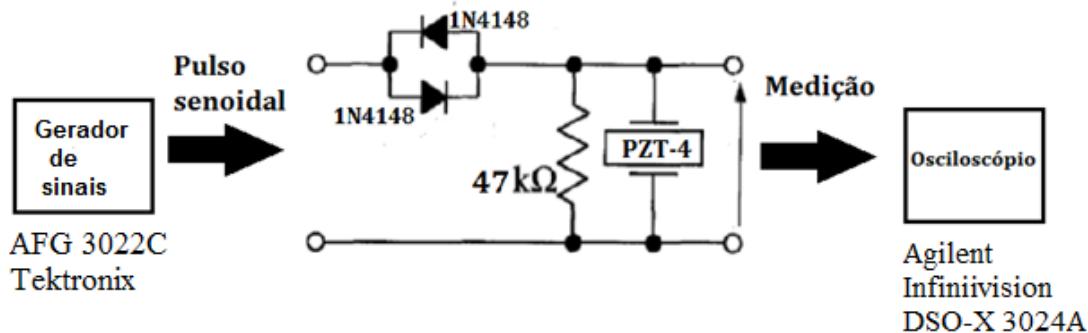


Figura 3.2: Representação do ensaio da resposta transiente da cerâmica

<sup>5</sup> Valores presentes na Tabela 1 de Kossos (1966).

<sup>6</sup> A permissividade utilizada no modelo deve ser da amostra fixa (VAN DEVENTER; LÖFQVIST; DELSING, 2000).

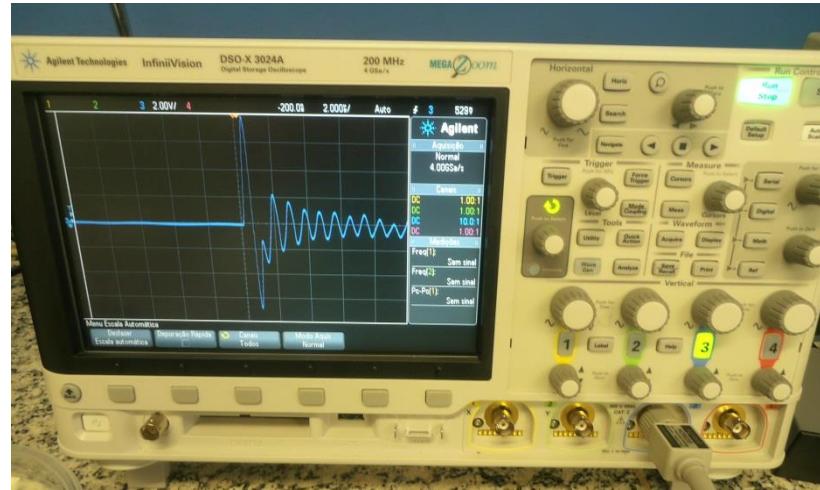


Figura 3.3: Detalhe da resposta transitória da cerâmica obtida por meio do osciloscópio.

Os ensaios foram realizados para três configurações: a primeira com a cerâmica livre no ar; a segunda, com a cerâmica flutuando sobre a água; e a terceira, com a cerâmica submersa no recipiente com água. Em cada configuração, as medidas foram feitas após a aplicação de pulsos senoidais de 700 kHz a 1 MHz, com intervalo de 50 kHz entre cada medida, e para 1,5; 2 e 2,5 MHz. Cada medida da tensão foi realizada num intervalo de 10  $\mu$ s após a aplicação do pulso.

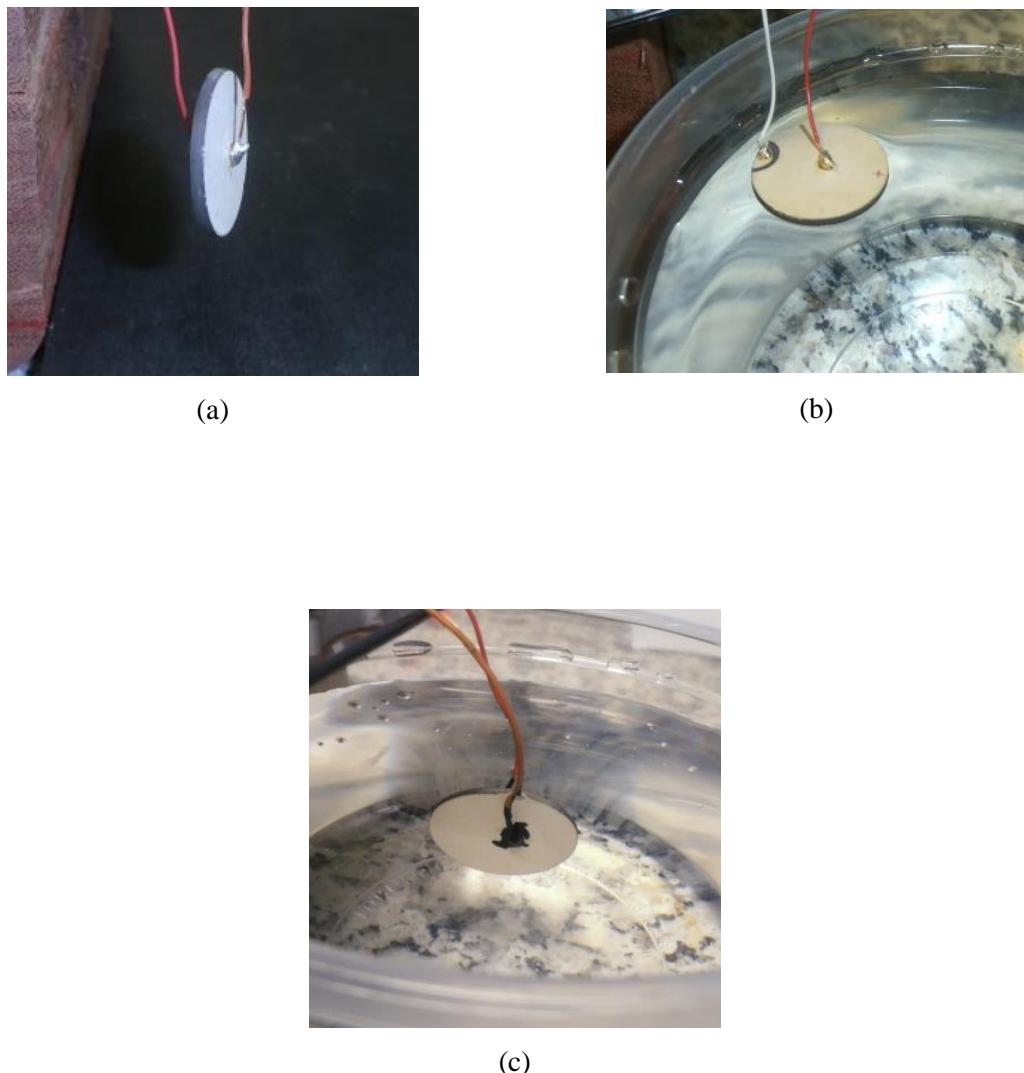


Figura 3.4: Três configurações de ensaio. Em (a): cerâmica solta no ar; (b): cerâmica flutuando na água; (c): cerâmica submersa na água

### 3.3 Implementação do circuito de simulação via PSPICE

A opção escolhida para simular o gerador de pulsos senoidais foi a de duas fontes de tensão senoidal ligadas em série, com polaridades invertidas, com frequências e amplitudes de tensão idênticas, Figura 3.4. Porém, uma fonte foi ajustada para ter um atraso de tempo (referente ao início da simulação) coincidente com o período da onda senoidal, enquanto que a outra fonte não apresentava atraso. Deste modo, após o atraso determinado, as tensões das duas fontes eram

canceladas e apenas um pulso, com período igual ao inverso da frequência utilizada, alimentava o circuito. Foi utilizada também uma resistência de  $50\ \Omega$  em série com a fonte de tensão para simular a resistência interna do gerador.

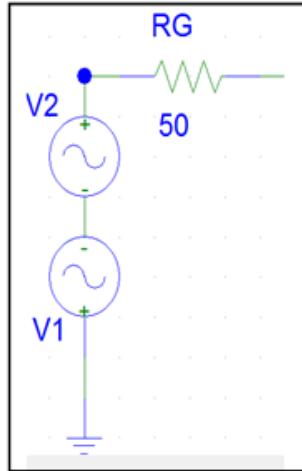


Figura 3.5: Circuito equivalente do gerador de pulso senoidal

Além da fonte de tensão, o circuito elétrico para a análise é composto de dois diodos do modelo 1N4148 e de uma resistência de  $47\ k\Omega$ , Figura 3.5, semelhante ao circuito de ensaio da Figura 3.2. Na figura abaixo, a corrente elétrica que alimenta o transdutor é indicada pela letra *i*.

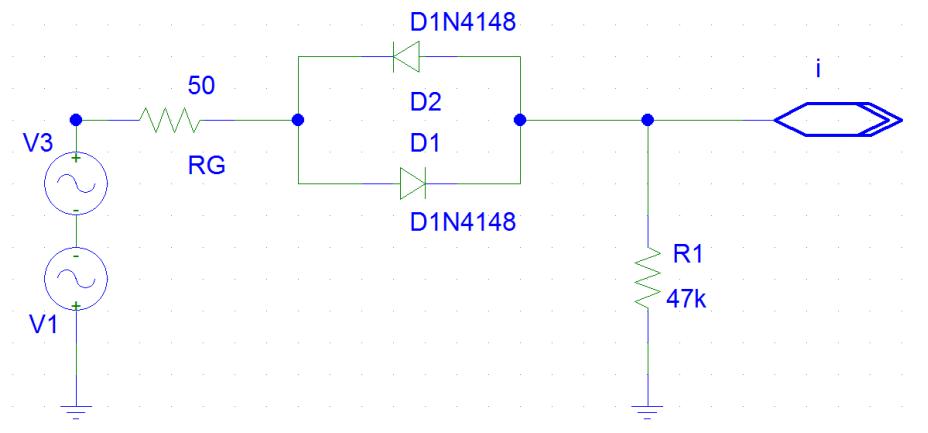


Figura 3.6: Circuito elétrico de ensaio

Leach (1994) sugeriu algumas modificações no modelo inicial (Figura 2.10) a fim de que este pudesse ser implementado no PSPICE. As mudanças foram propostas para que o termo  $1/s$  que

multiplica os ganhos de tensão das fontes controladas pudesse ser representado. Para a parte elétrica, Leach (1994) propôs a aplicação do circuito equivalente de Norton e como resultado, ocorre a substituição da fonte de tensão controlada por  $(h/s).(u_1 - u_2)$  em série com a capacitância  $C_0$ , por uma fonte de corrente controlada por  $h.C_0.(u_1 - u_2)$  em paralelo com a capacitância  $C_0$ . Para a parte mecânica, a fonte de tensão controlada por  $(h/s).i$  é representada por um circuito paralelo R-C ( $R=1 \text{ k}\Omega$ ,  $C=1 \text{ F}$ ), sendo este último alimentado por uma fonte de corrente de valor  $(h.i)$ . A tensão sobre o resistor de  $1 \text{ k}\Omega$  por sua vez representa a tensão controlada da parte mecânica. No anexo 2 estão detalhados as deduções destes circuitos.

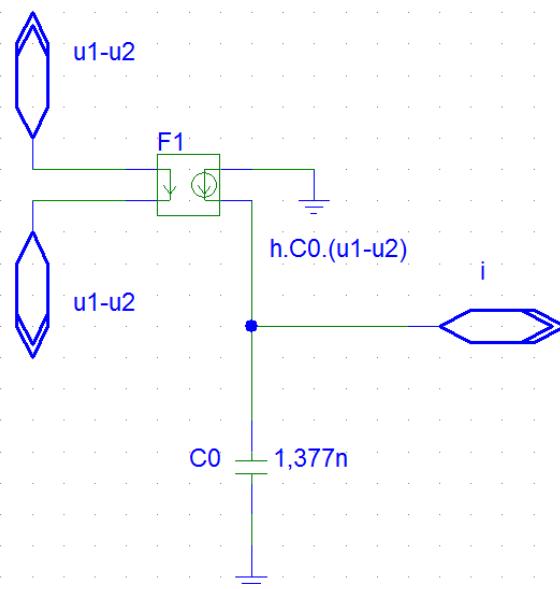


Figura 3.7: Parte elétrica do modelo de Leach

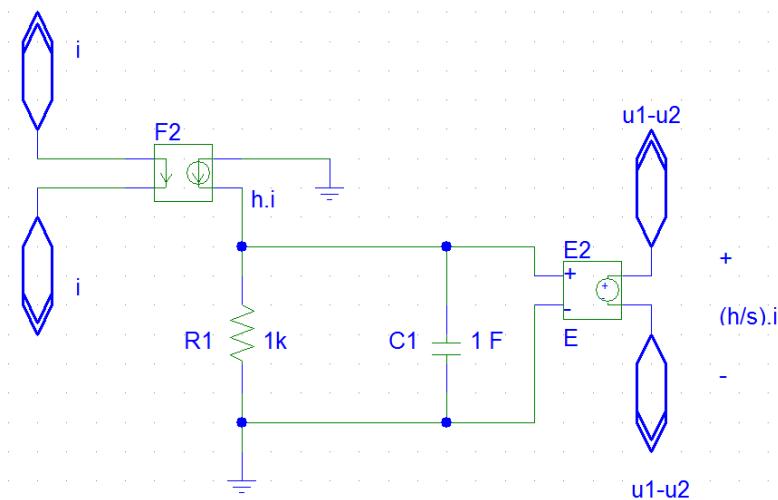


Figura 3.8: Parte mecânica do modelo de Leach sem a linha de transmissão

Nas fontes controladas F1, F2 e E2 das Figuras 3.6 e 3.7, o termo interior ao círculo representa a corrente (ou tensão) que é controlada pelo outro termo, sem círculo.

Os valores referentes às propriedades físicas e elétricas do PZT-4 foram utilizados para o cálculo dos parâmetros utilizados na simulação. O valor da capacitância do transdutor ( $C_0$ ) foi calculado por:

$$C_0 = \frac{\epsilon_{33}}{\epsilon_0} \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{A}{l} = 635.885 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{4,9 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,377 \text{ nF} \quad (3.1)$$

Os ganhos das fontes de corrente F1 e F2 foram  $h \cdot C_0 = 3,69$  e  $h = 2,68 \cdot 10^9$ , respectivamente. O ganho da fonte de tensão E2 é unitário.

Os parâmetros da linha de transmissão mecânica foram calculados de acordo com as equações (2.11) e (2.12) e com os valores das constantes físicas e das dimensões da cerâmica presentes na seção 3.1. Como visto anteriormente, a linha apresenta um comprimento de valor igual ao da espessura do transdutor. Os valores da indutância e da capacitância da linha foram calculados por:

$$L = \rho \cdot A = (7,5 \cdot 10^3) \cdot (4,9 \cdot 10^{-4}) = 3,68 \text{ [kg/m]} \quad (3.2)$$

$$C = \frac{1}{A \cdot u_s^2 \cdot \rho} = \frac{1}{(4,9 \cdot 10^{-4}) \cdot (4,6 \cdot 10^3)^2 \cdot (7,5 \cdot 10^3)} = 12,86 \cdot 10^{-9} \text{ [s}^2/\text{kg.m]} \quad (3.3)$$

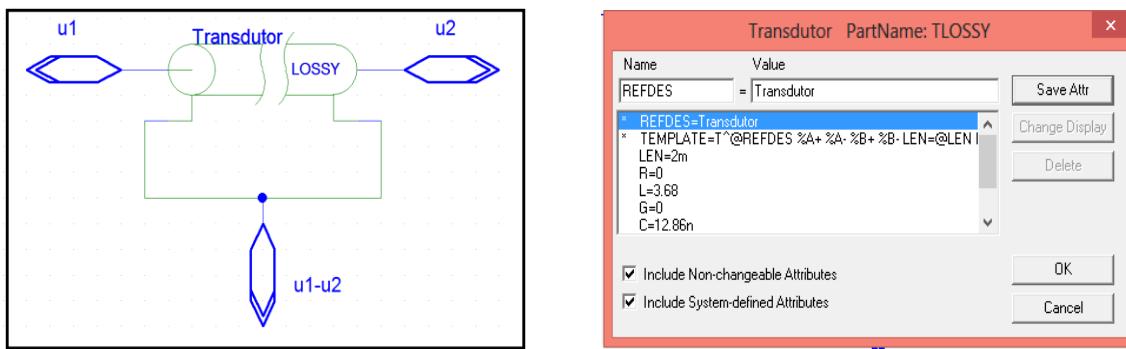


Figura 3.9: Representação da linha transmissão mecânica, seguida de seus parâmetros utilizados na simulação

As impedâncias acústicas dos meios adjacentes à cerâmica, representadas pelas resistências da parte frontal (Rf) e de retaguarda (Rb), foram calculadas pela multiplicação da impedância

acústica característica (rayl<sup>7</sup>) do material adjacente à cerâmica pela área da seção transversal do transdutor ( $m^2$ ), conforme Püttmer (1997). As impedâncias acústicas características do ar ( $Z_{ar}$ ) e da água ( $Z_{água}$ ) foram obtidas em (PÜTTMER, 1997) e (SHERAR; FOSTER, 1989), respectivamente. Para o ensaio com ar adjacente ao transdutor, a resistência calculada foi de  $Z_{ar} \cdot A = (429 \text{ rayl}) \cdot (4,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2) = 0,2 \text{ kg/s}$ . E para o ensaio com água,  $Z_{água} \cdot A = (1,5 \cdot 10^6 \text{ rayl}) \cdot (4,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2) = 735 \text{ kg/s}$ . Na figura a seguir estão representadas as linhas mecânicas com as resistências frontal e de retaguarda para os três ensaios realizados

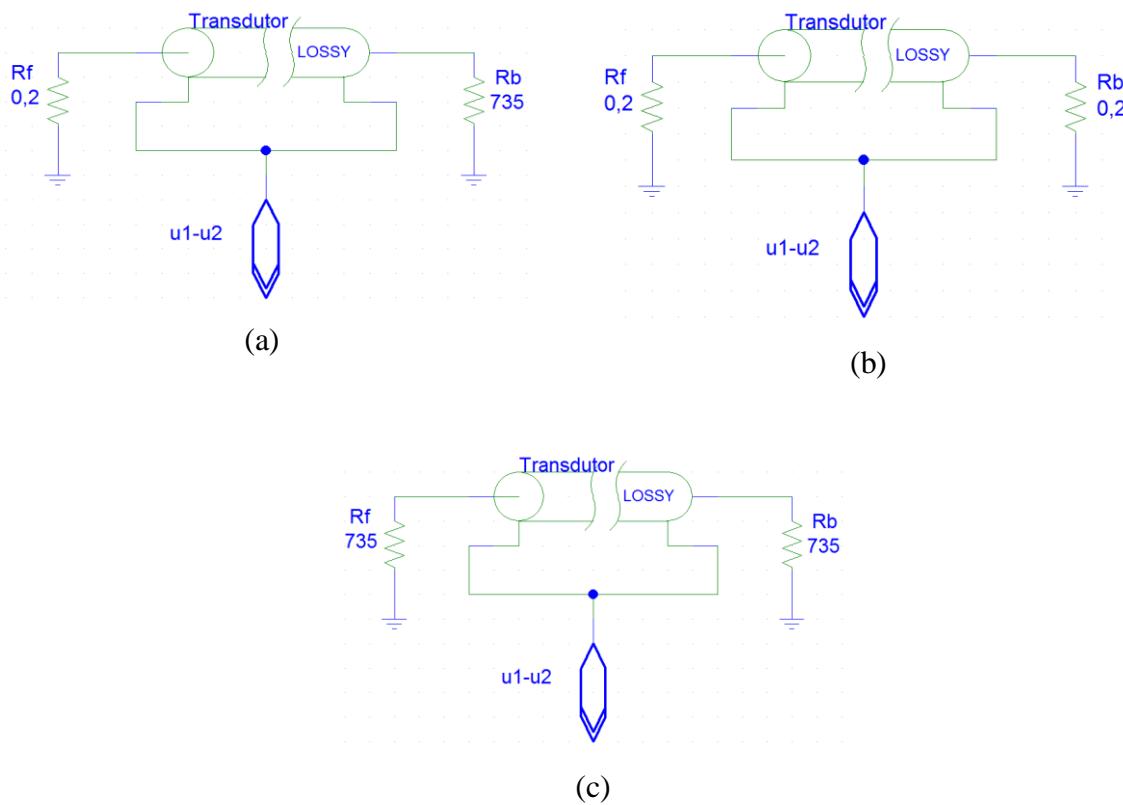


Figura 3.10: Linhas de transmissão mecânicas com as resistências representando os diferentes meios. Em (a): Ensaio com a cerâmica flutuando na água; (b): cerâmica solta no ar; (c): cerâmica submersa na água.

Por fim, o circuito completo para simulação da resposta transiente da cerâmica está detalhado na Figura 3.10. A tensão foi medida sobre o resistor de  $47 \text{ k}\Omega$  paralelo à cerâmica. A simulação foi realizada em um intervalo de  $10 \mu\text{s}$ .

<sup>7</sup> A unidade rayl refere-se à impedância acústica do meio de propagação do som. Seu valor é dado pela multiplicação da densidade do meio pela velocidade do som no meio [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ] (KINSLER, 2000).

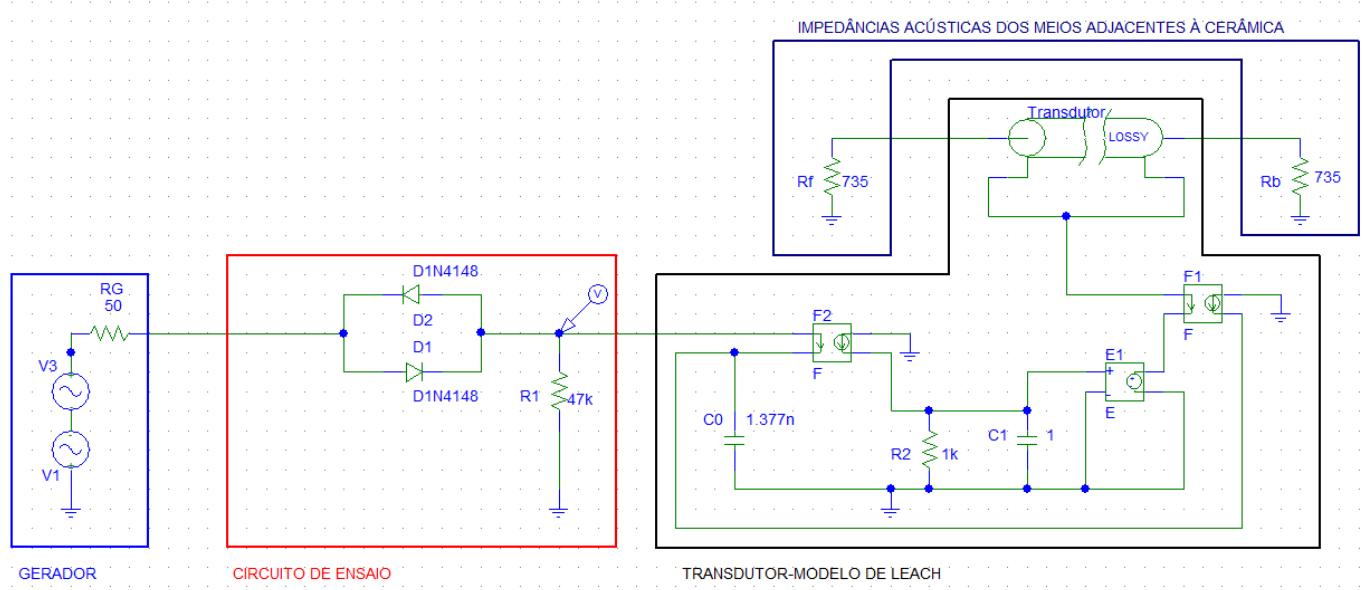


Figura 3.11: Circuito final para simulação do ensaio transiente com a cerâmica



## 4 RESULTADOS

Os resultados da pesquisa foram divididos em três seções. Em 4.1 foi feita a análise do comportamento do sinal com a mudança dos meios adjacentes ao transdutor. Para cada frequência analisada, os sinais de tensão dos três ensaios foram representados em um mesmo gráfico. O mesmo foi feito com os resultados da simulação. Na seção 4.2, cada sinal simulado foi comparado em um mesmo gráfico com o respectivo sinal obtido no ensaio. Por fim, na seção 4.3, o objetivo foi comparar os sinais simulados e medidos em termos numéricos. Para cada ensaio foram calculados o erro absoluto, o erro relativo percentual e o erro quadrático entre os sinais simulados e medidos.

### 4.1 Variação dos meios adjacentes à cerâmica

A seguir se encontram os gráficos da tensão sobre a cerâmica dos ensaios e das simulações, para todas as frequências dos pulsos de entrada. O número 1 refere-se ao ensaio com a cerâmica submersa em água; 2, à cerâmica solta no ar ambiente; e 3, ao ensaio com a cerâmica flutuando em água. O mesmo vale para as simulações

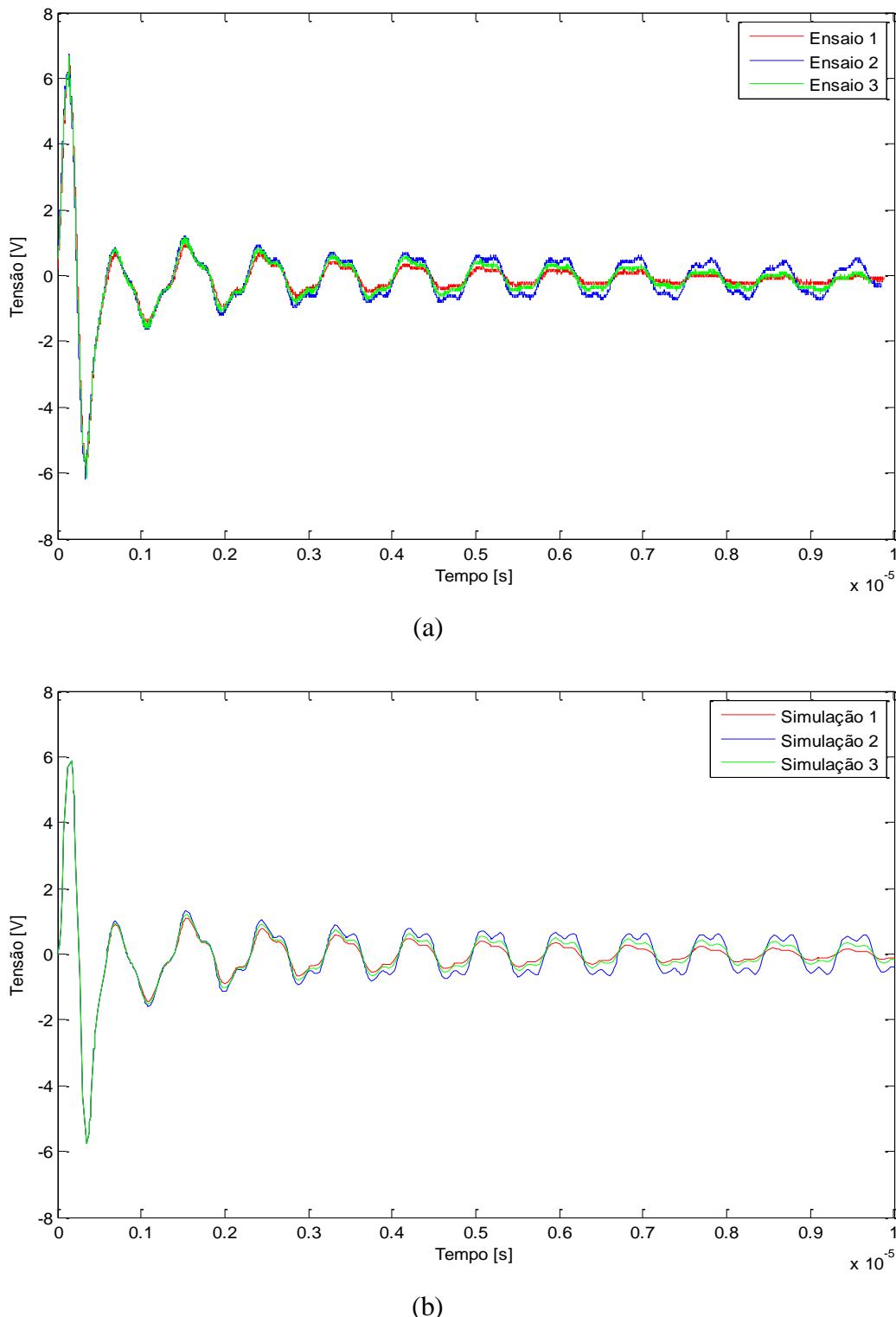


Figura 4.1: Variação dos meios adjacentes para 2,5 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

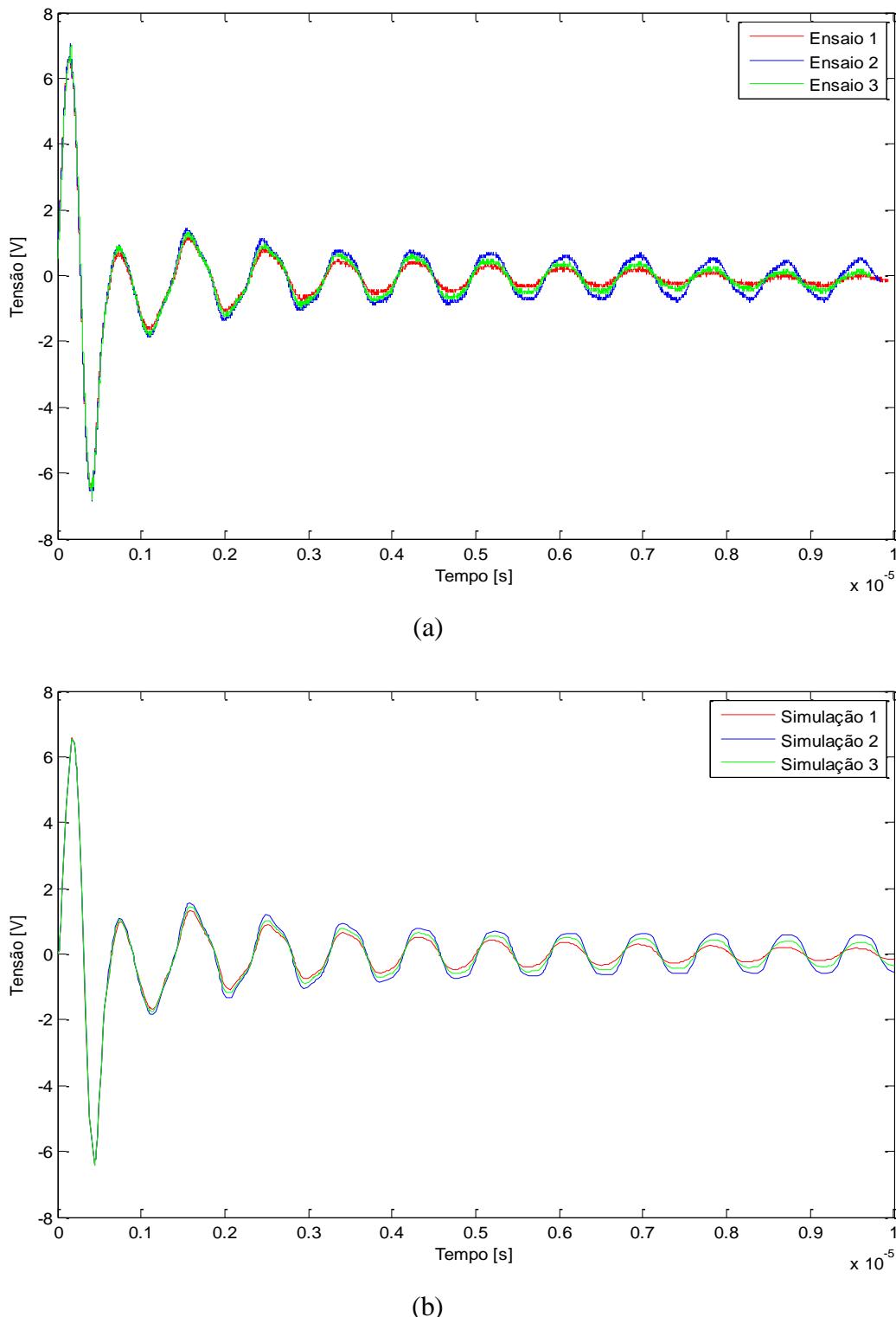


Figura 4.2: Variação dos meios adjacentes para 2 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

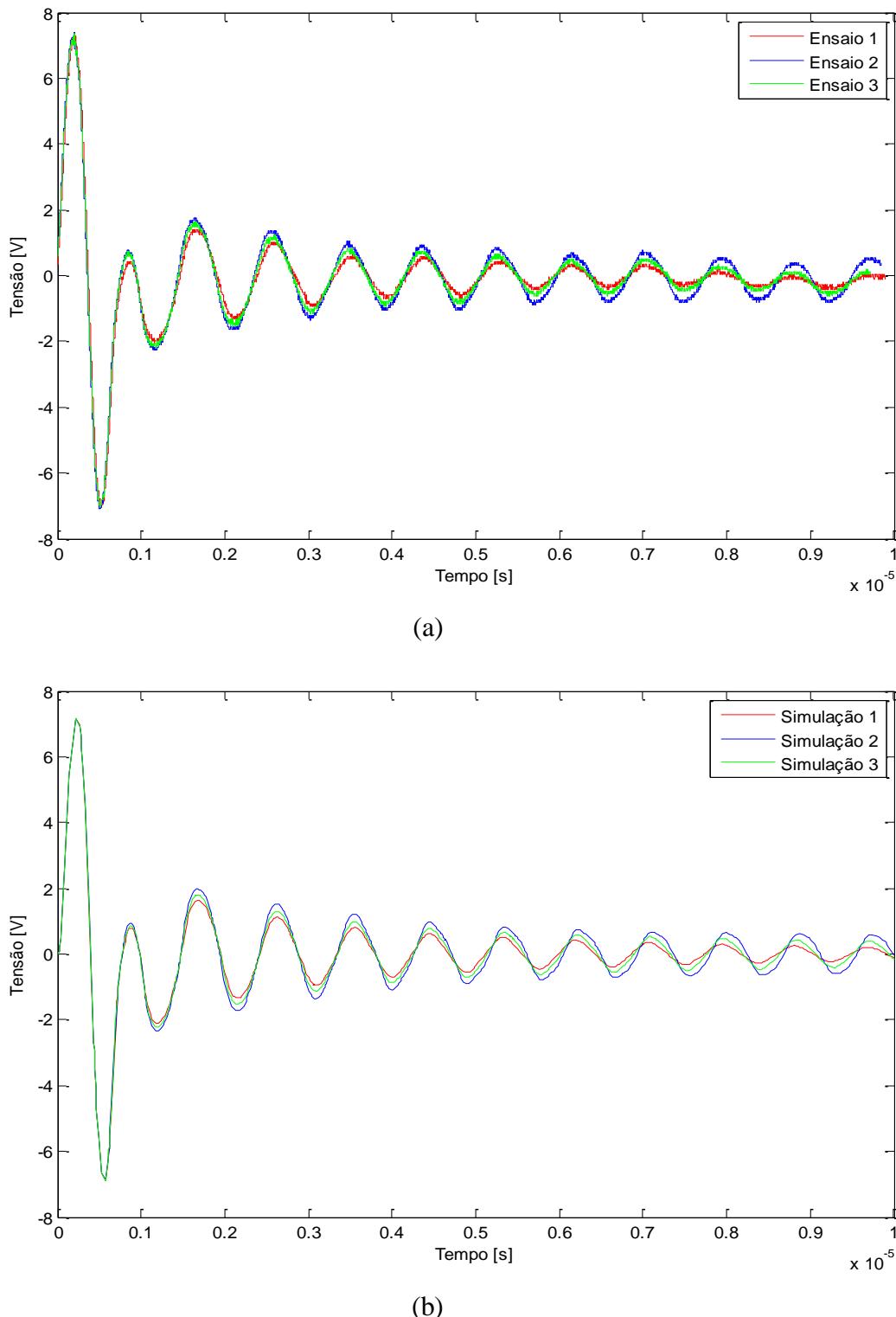


Figura 4.3: Variação dos meios adjacentes para 1,5 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

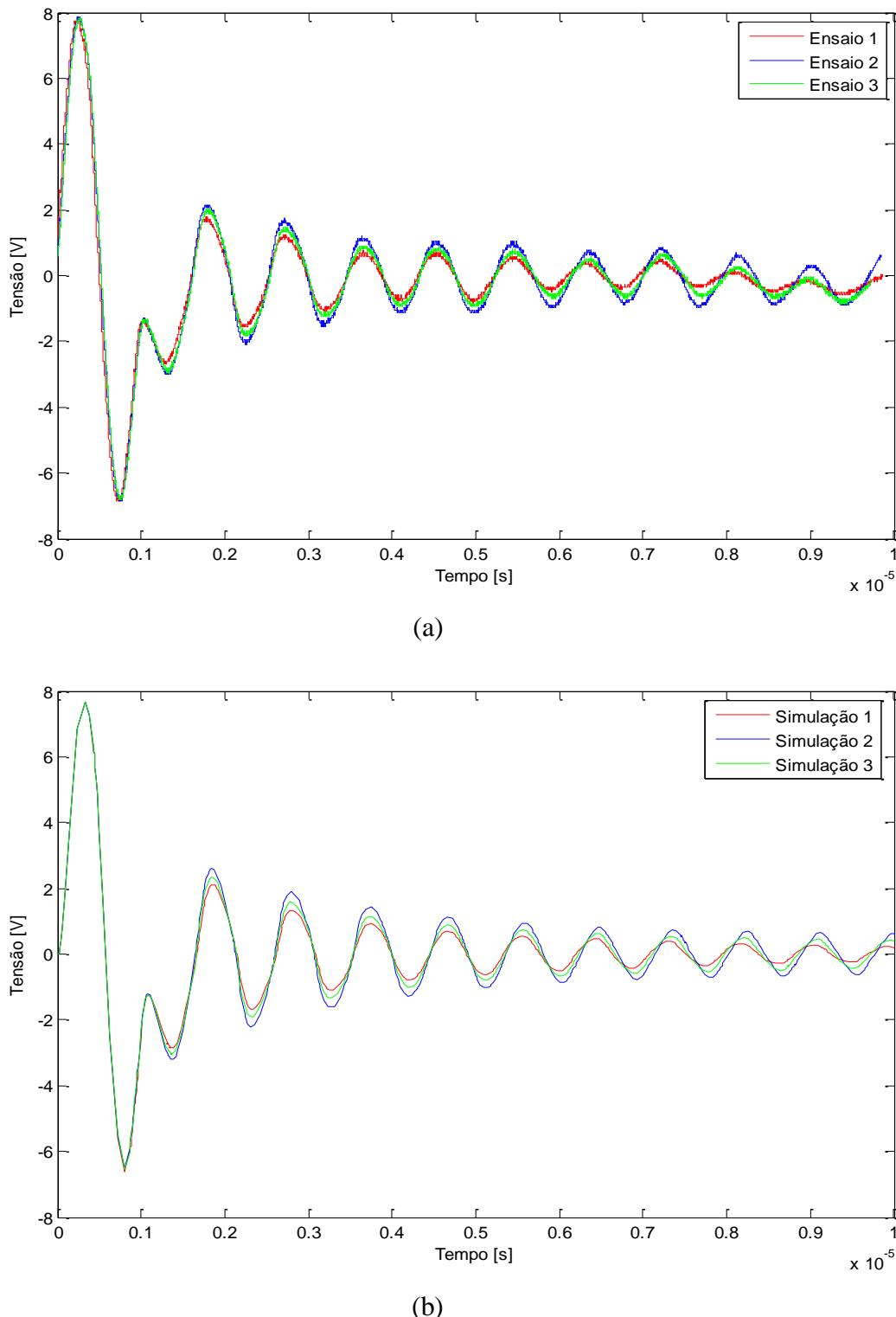


Figura 4.4: Variação dos meios adjacentes para 1 MHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

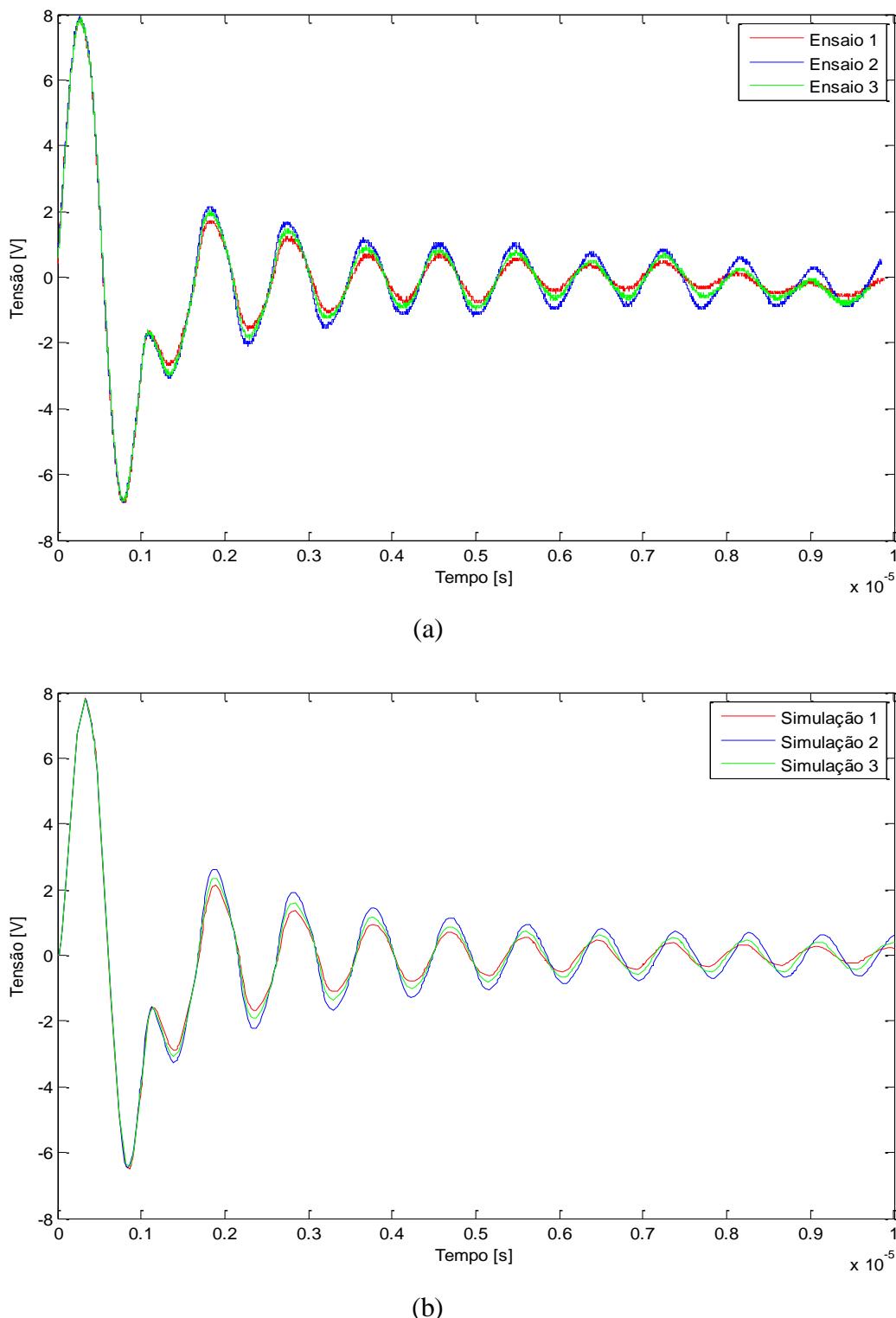


Figura 4.5: Variação dos meios adjacentes para 950 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

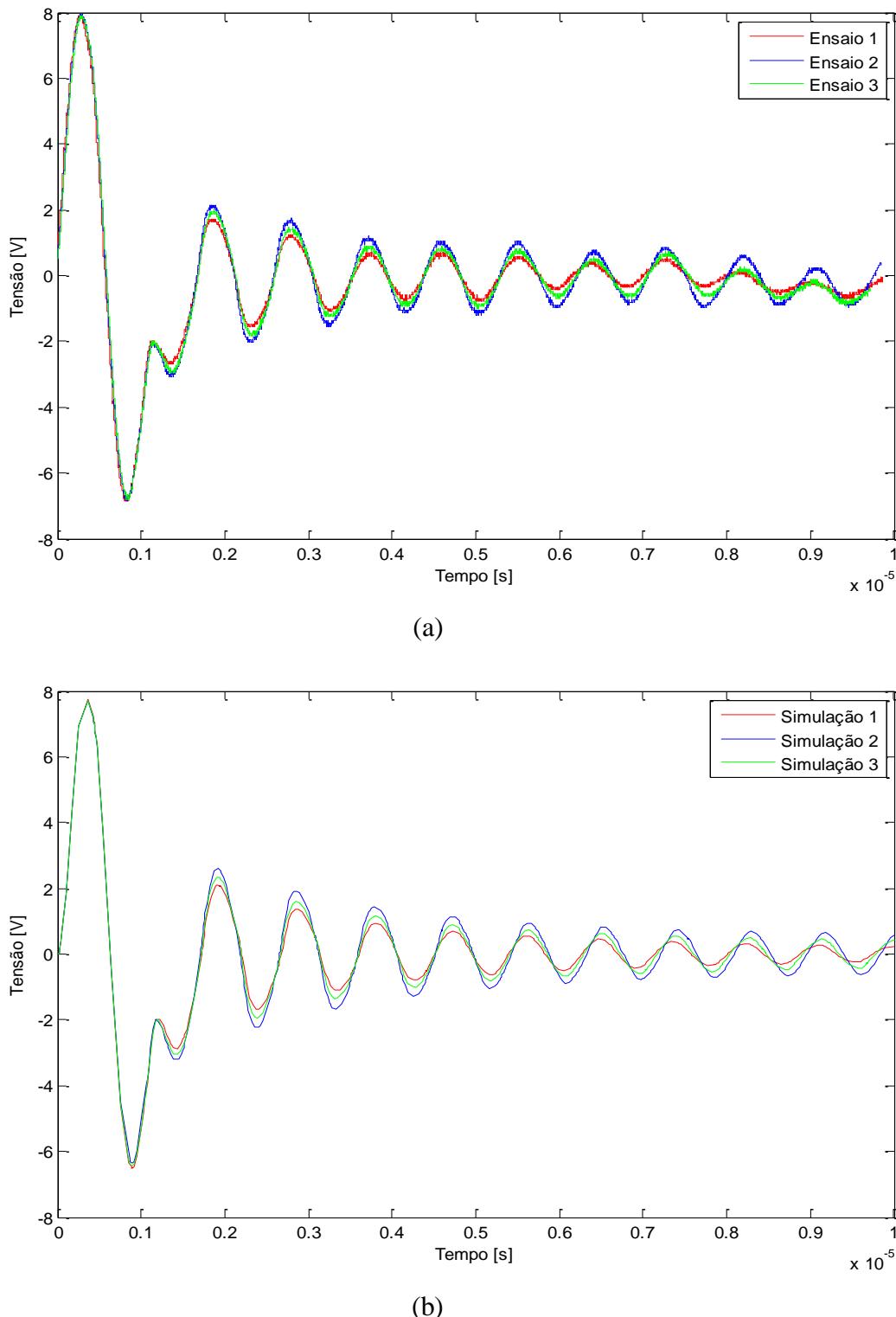


Figura 4.6: Variação dos meios adjacentes para 900 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

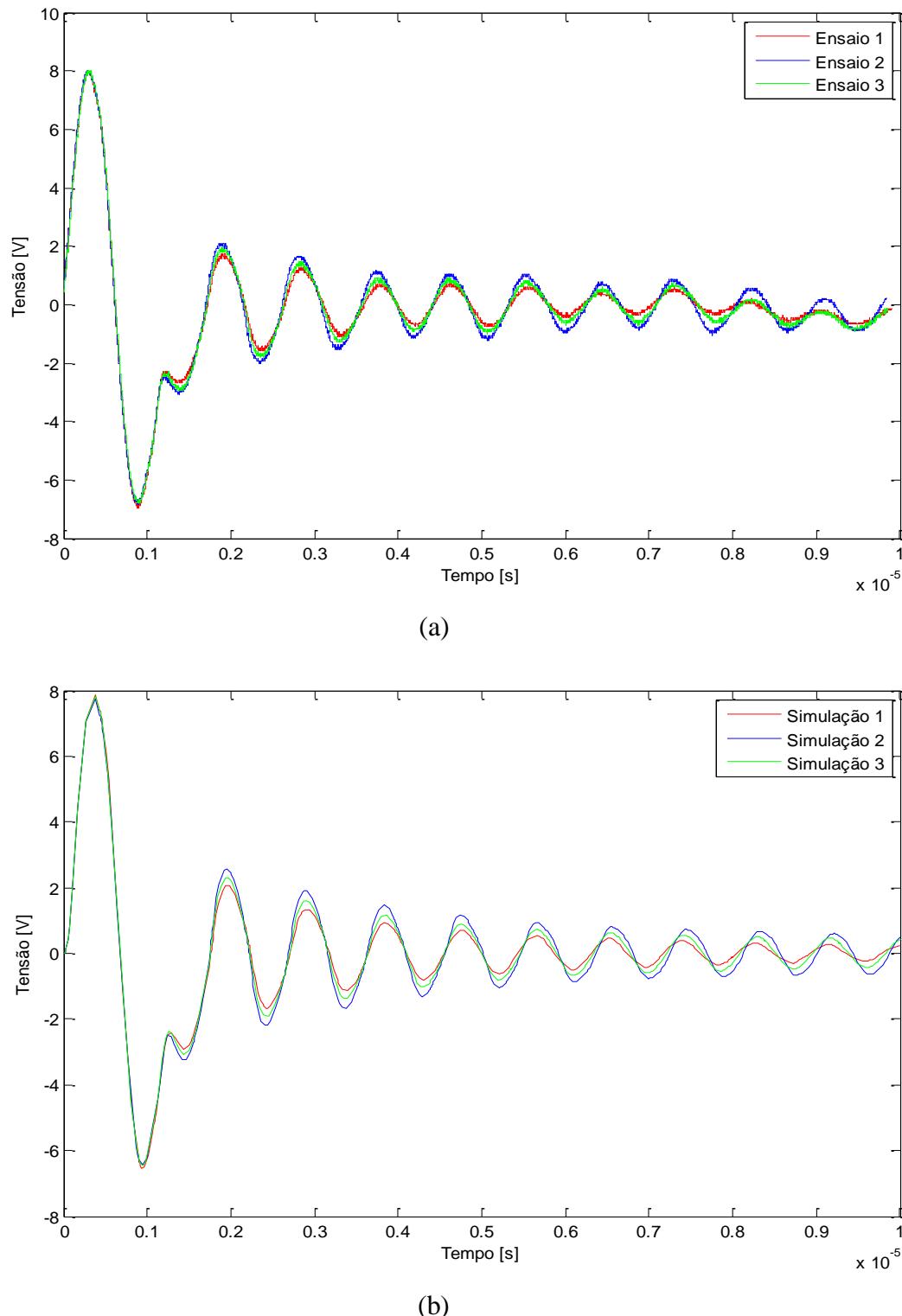


Figura 4.7: Variação dos meios adjacentes para 850 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

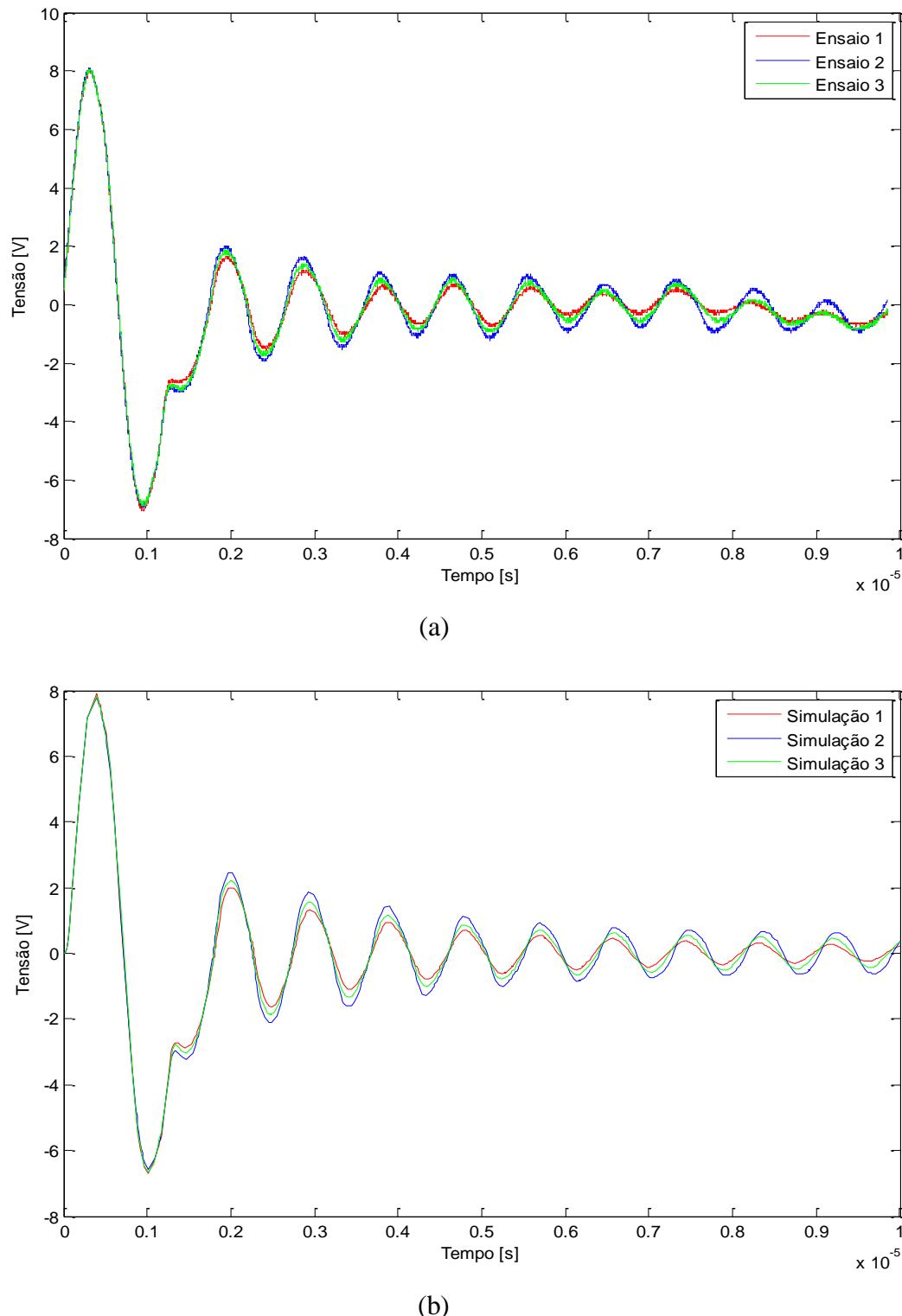


Figura 4.8: Variação dos meios adjacentes para 800 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

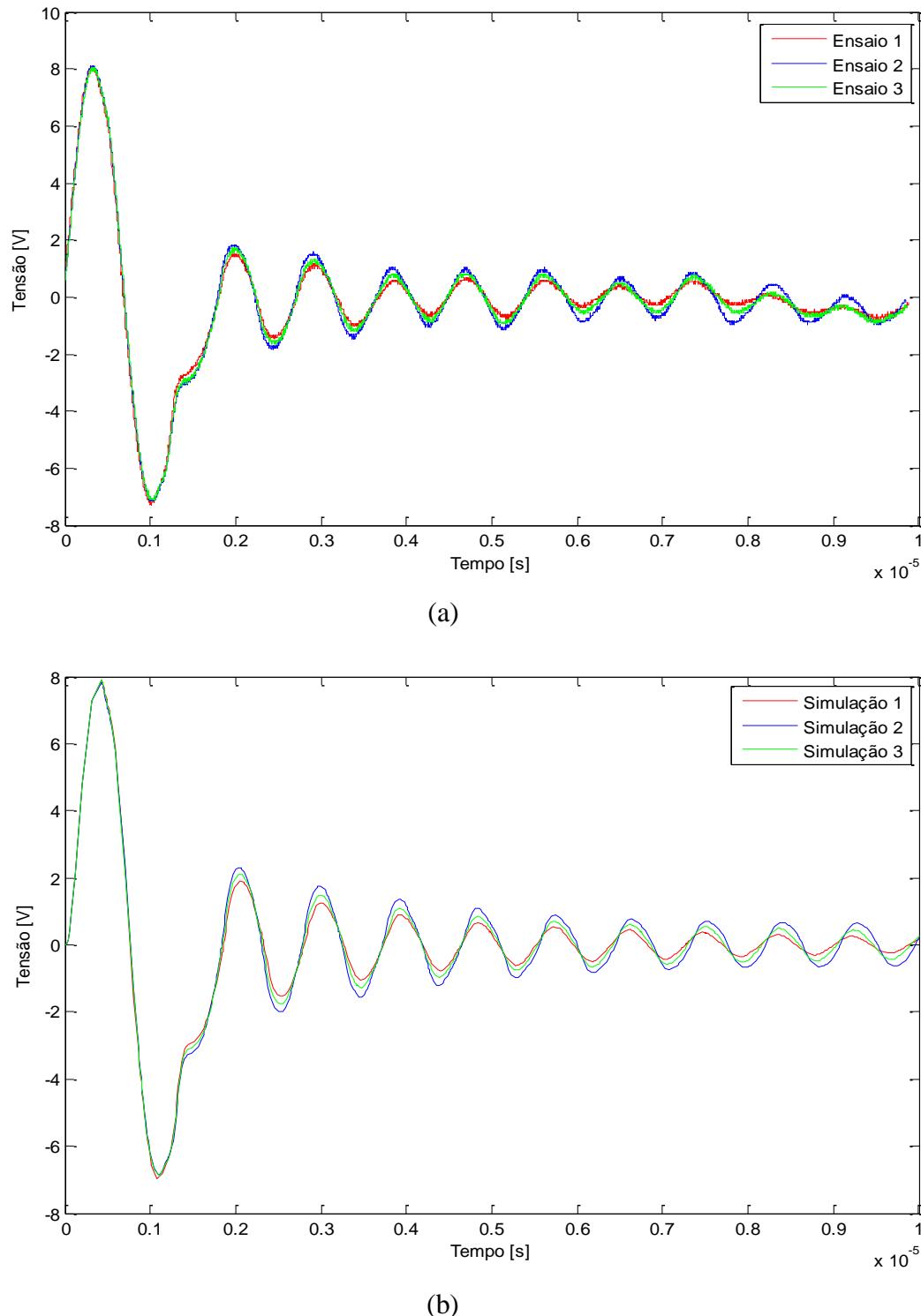


Figura 4.9: Variação dos meios adjacentes para 750 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

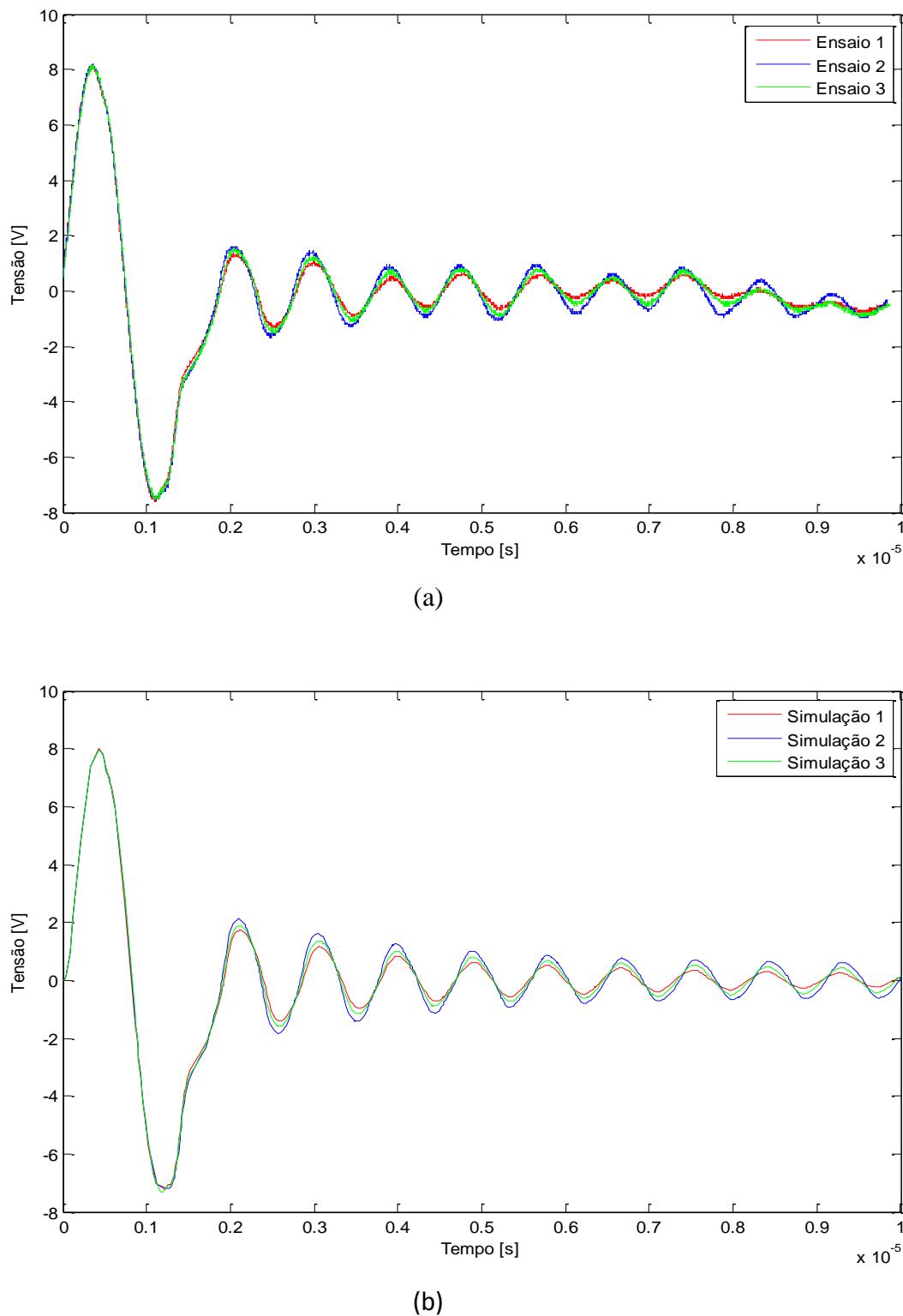


Figura 4.10: Variação dos meios adjacentes para 700 kHz. Em (a): ensaio; (b): simulação

#### 4.2 Comparação entre ensaio e simulação

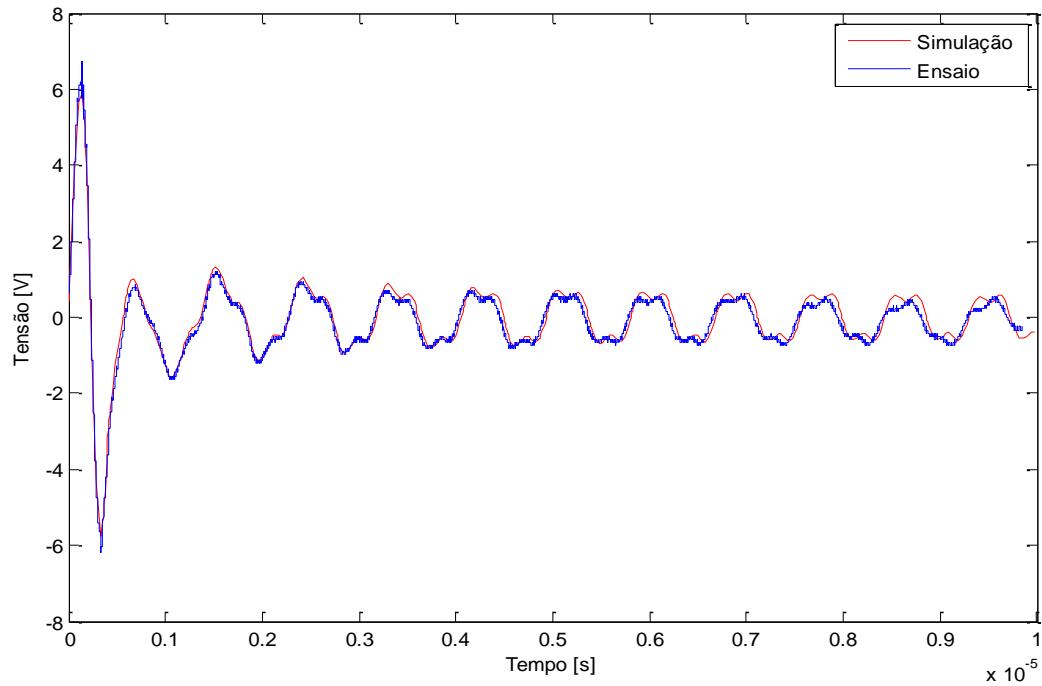


Figura 4.11: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (2,5 MHz)

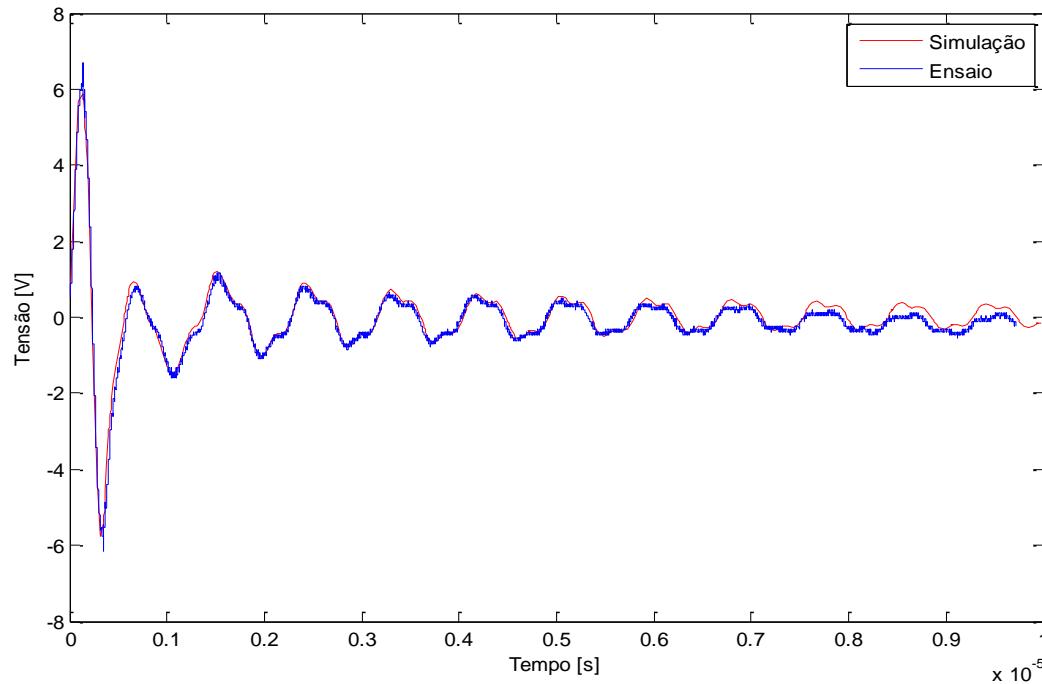


Figura 4.12 Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (2,5 MHz)

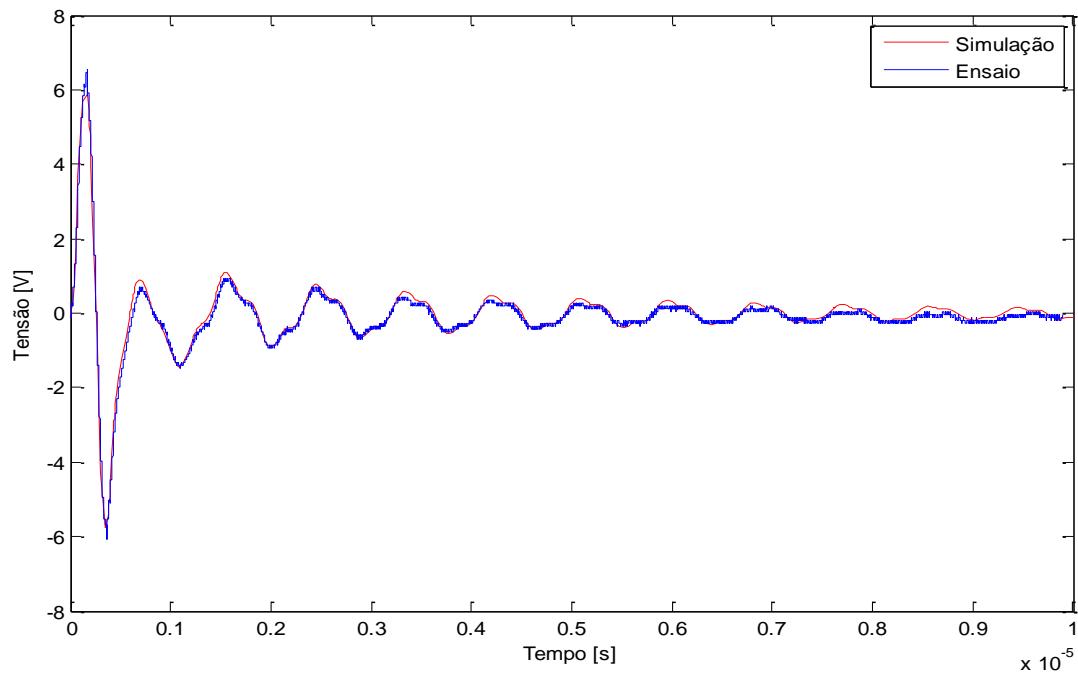


Figura 4.13: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (2,5 MHz)

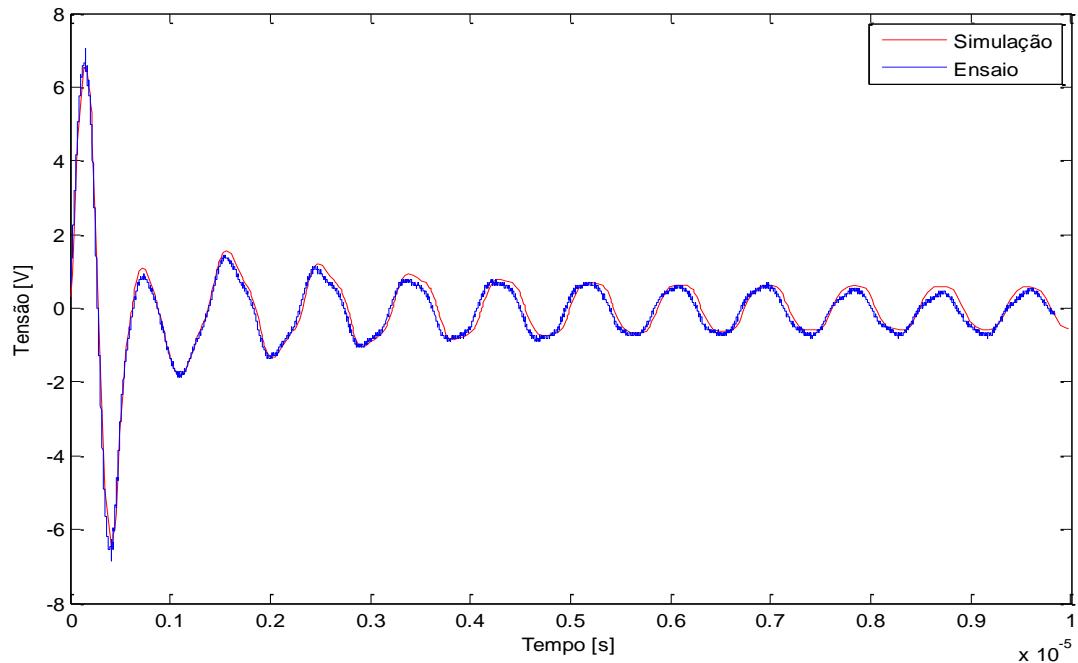


Figura 4.14: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (2 MHz)

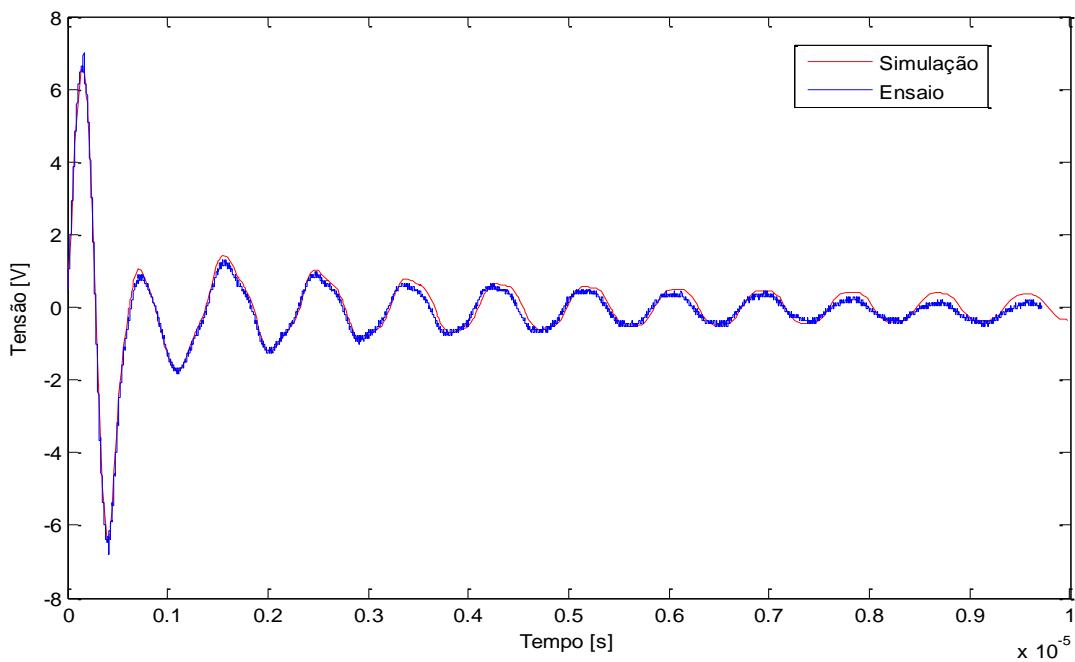


Figura 4.15: Simulação e ensaio para a cerâmica flutuando (2 MHz)

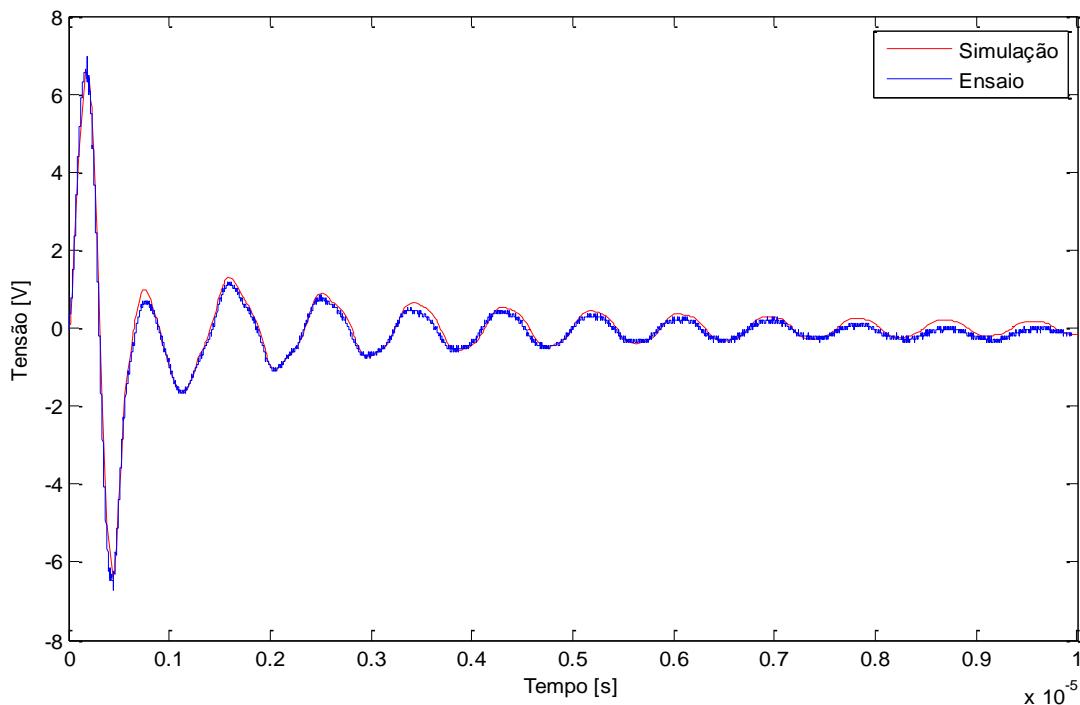


Figura 4.16: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (2 MHz)

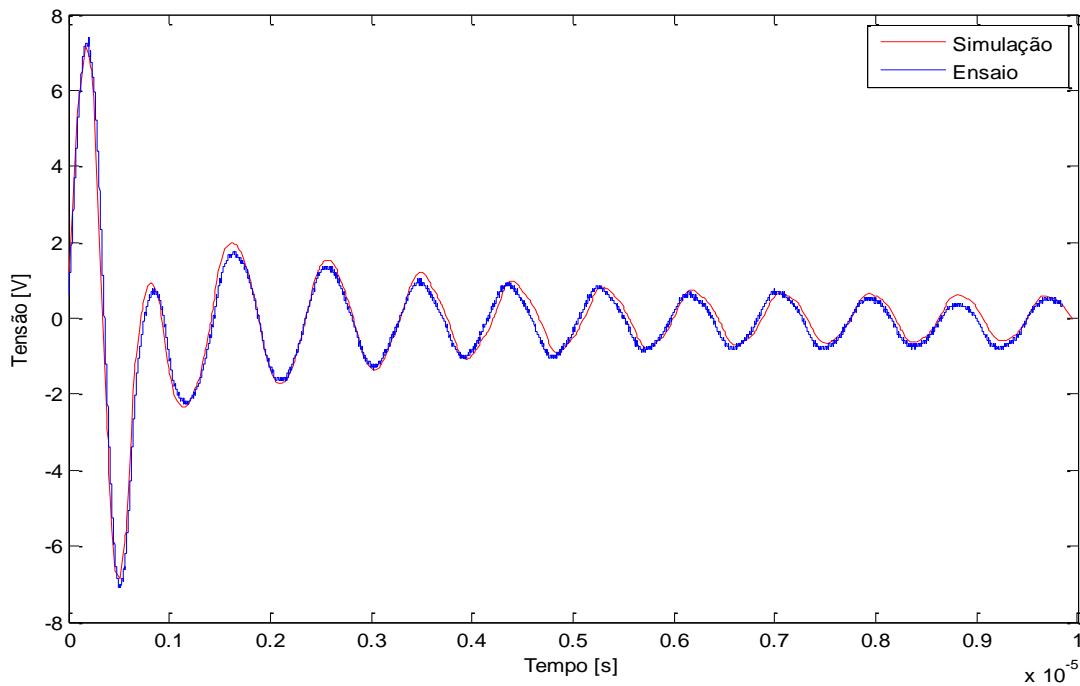


Figura 4.17: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (1,5 MHz)

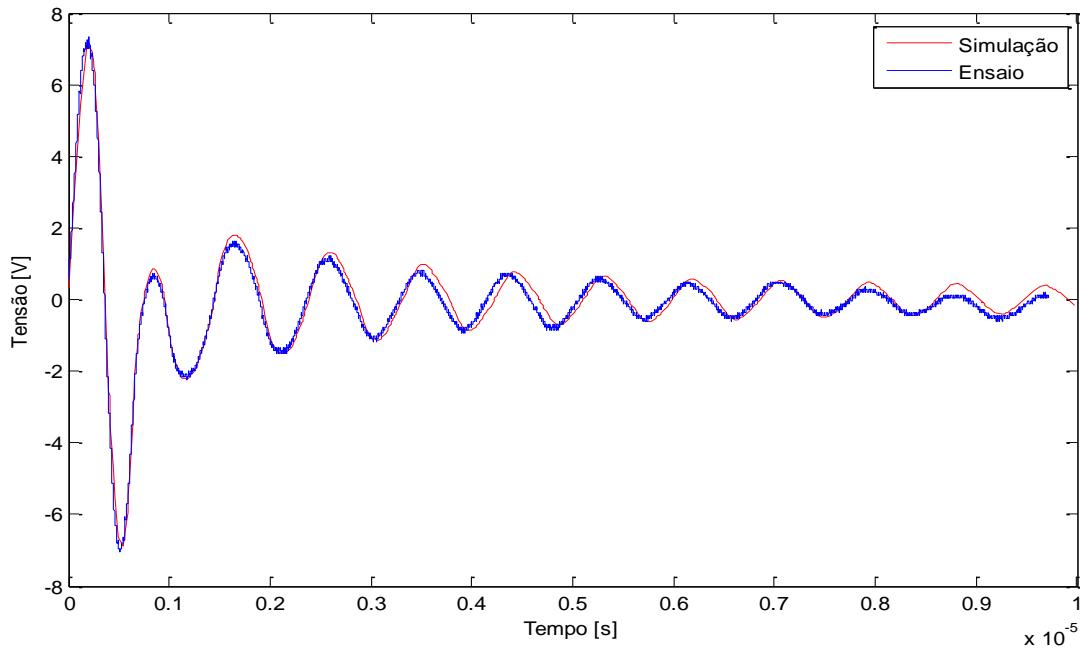


Figura 4.18: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (1,5 MHz)

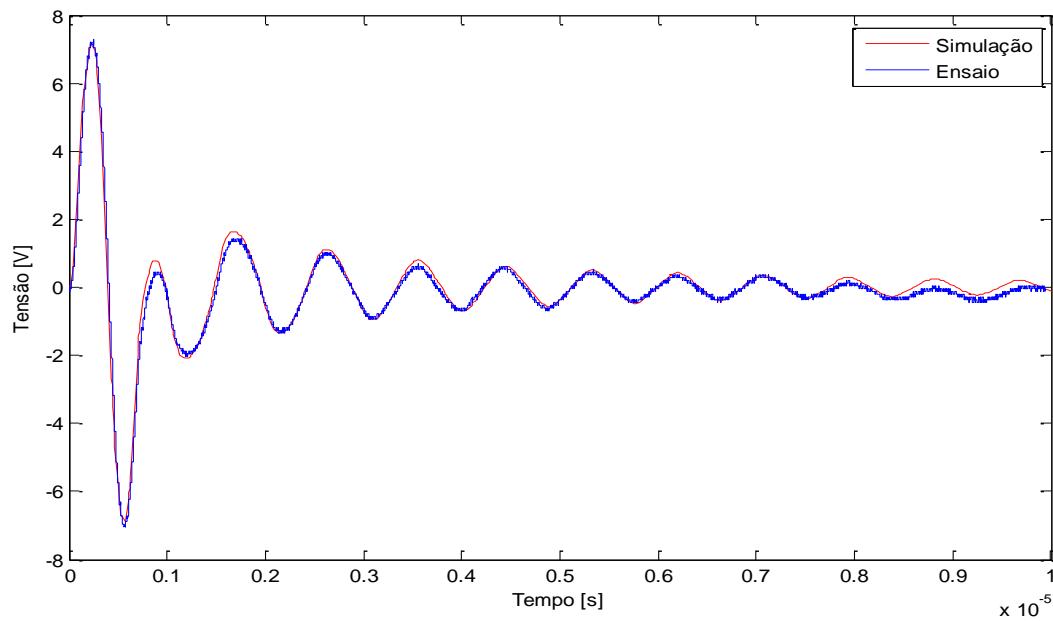


Figura 4.19: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (1,5 MHz)

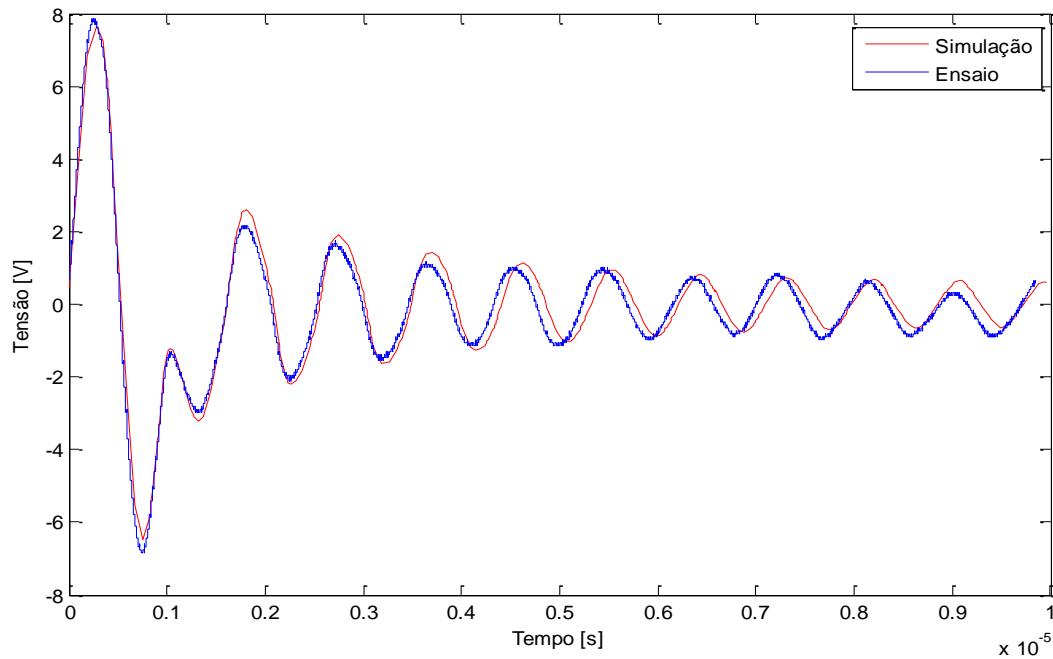


Figura 4.20: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (1 MHz)

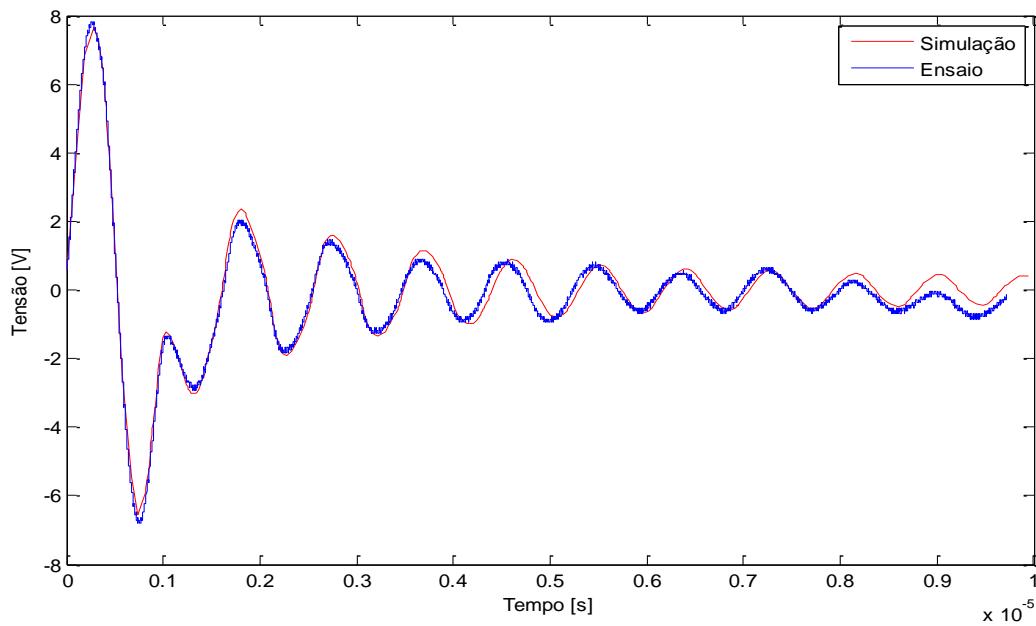


Figura 4.21: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (1 MHz)

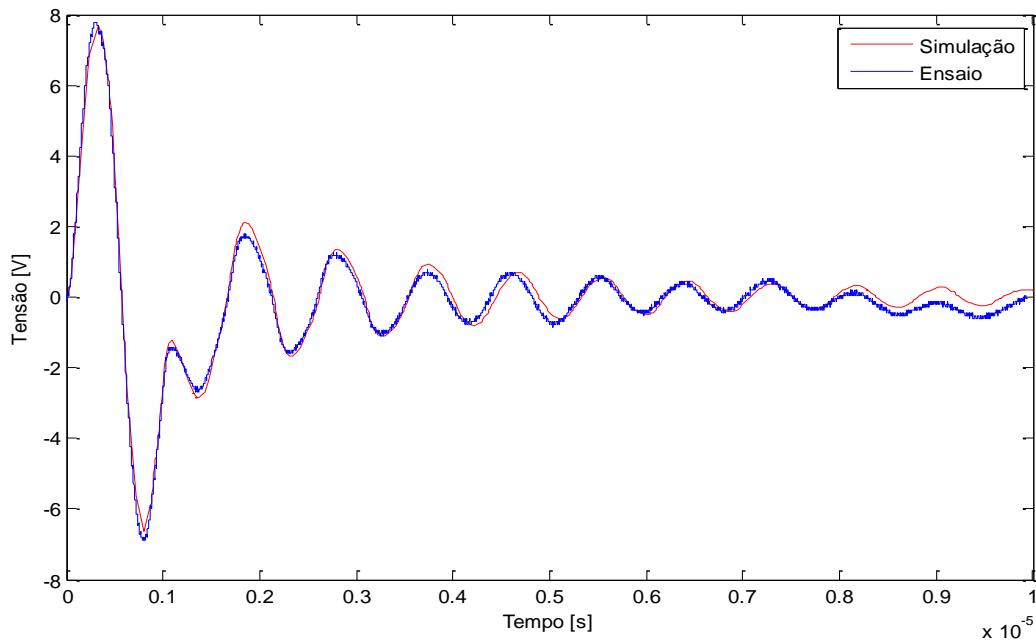


Figura 4.22: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (1 MHz)

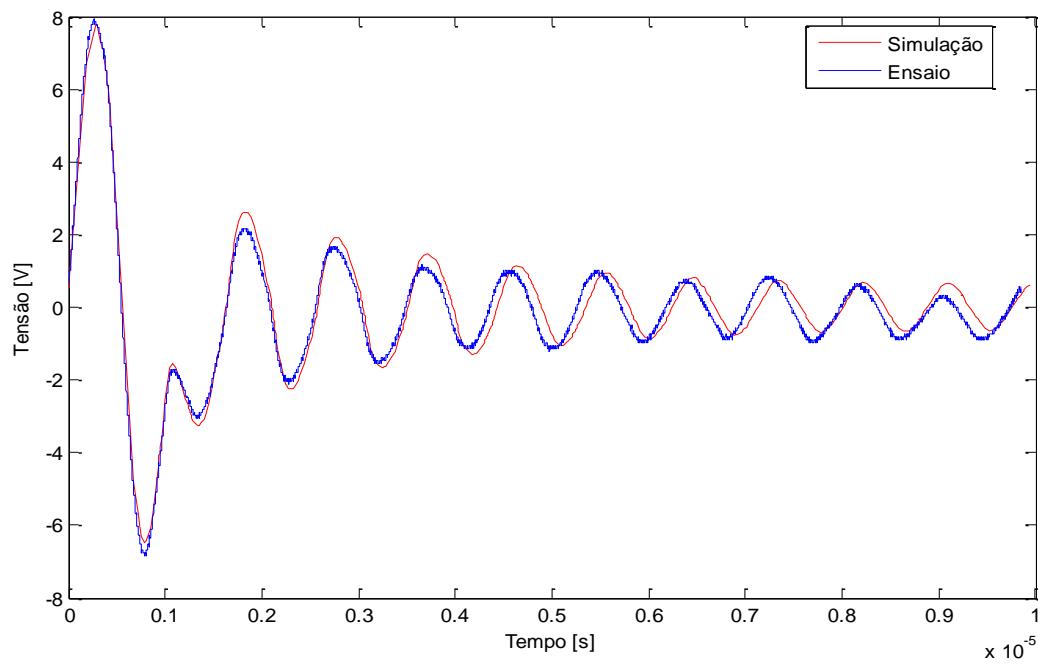


Figura 4.23: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (950 kHz)

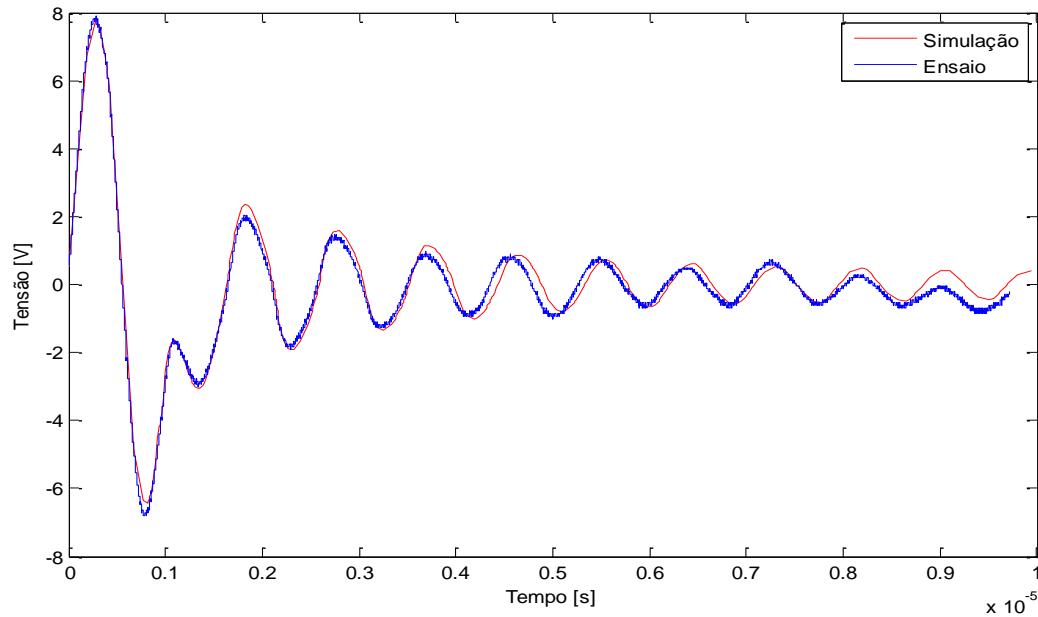


Figura 4.24: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (950 kHz)

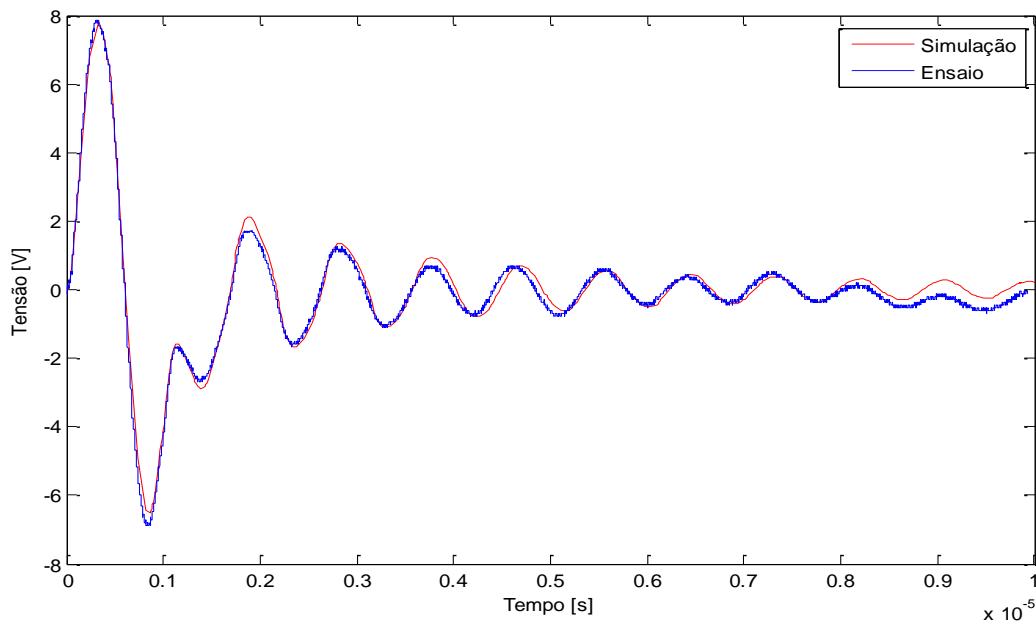


Figura 4.25: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (950 kHz)

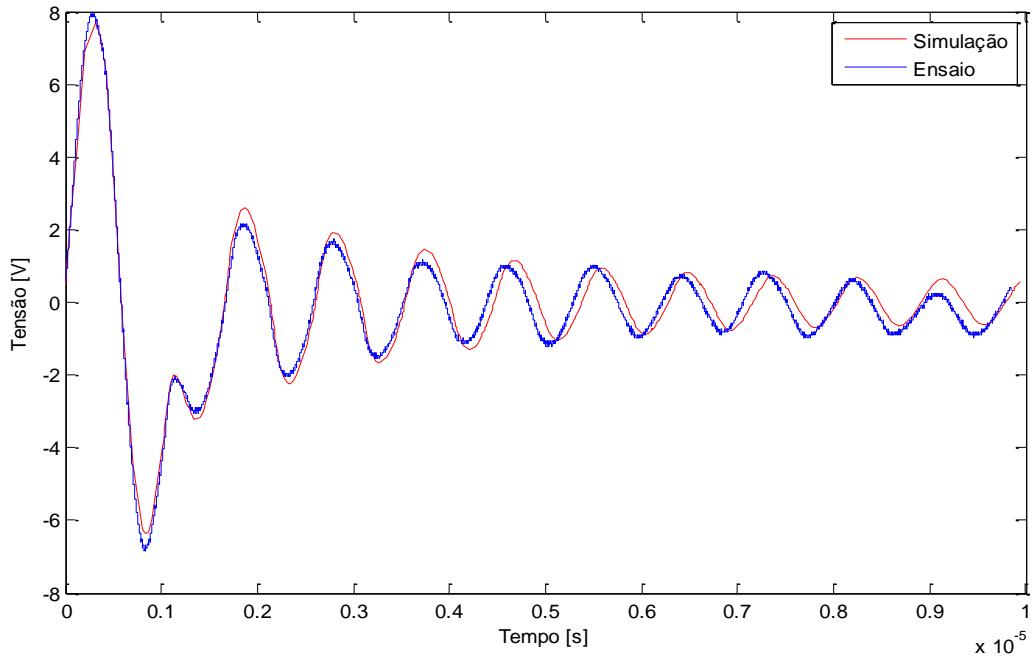


Figura 4.26: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (900 kHz)

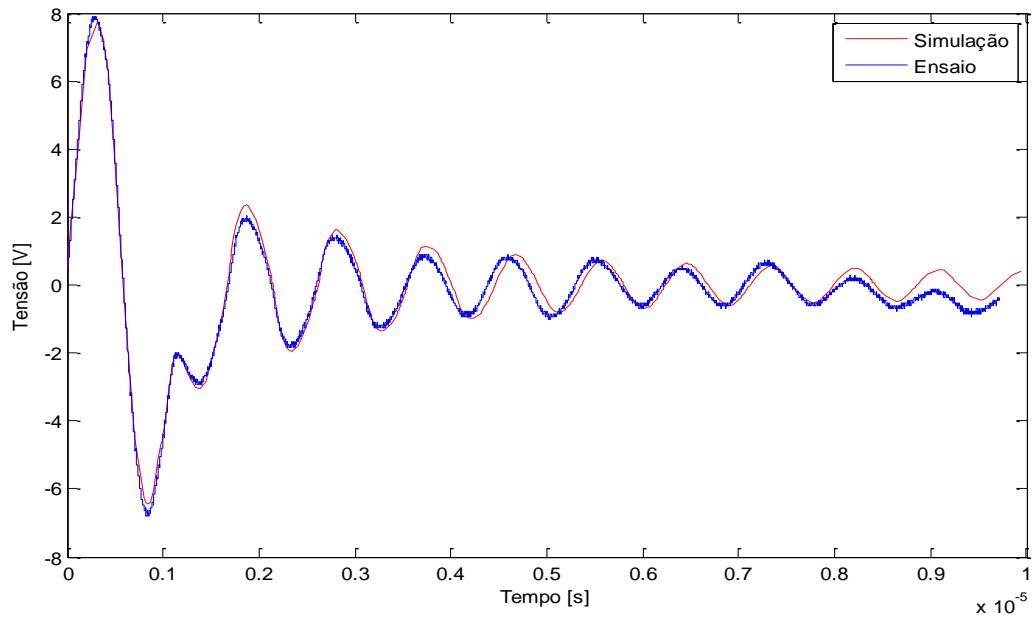


Figura 4.27: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (900 kHz)

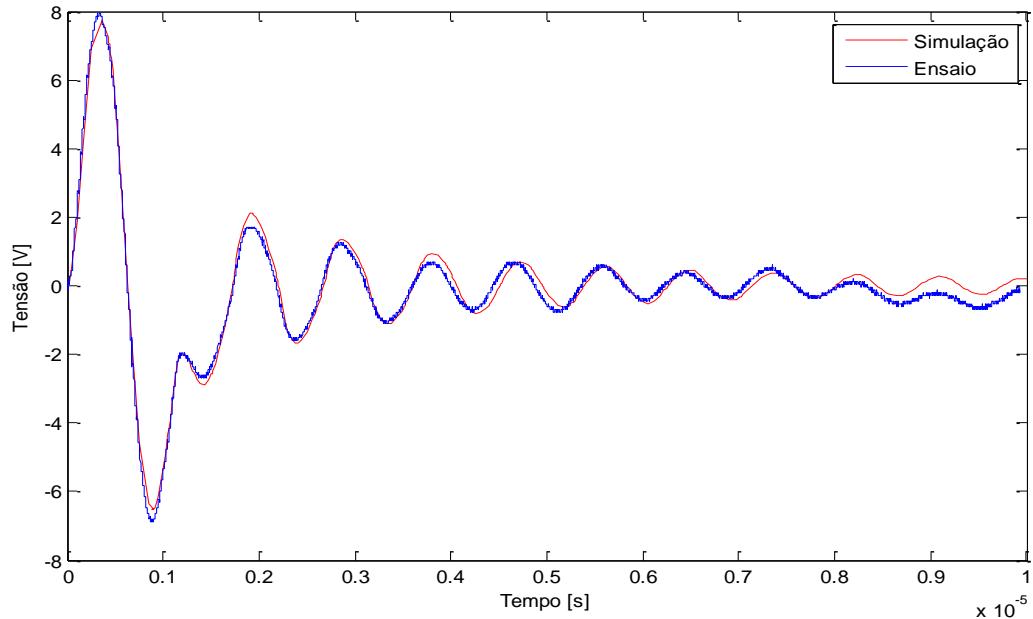


Figura 4.28: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (900 kHz)

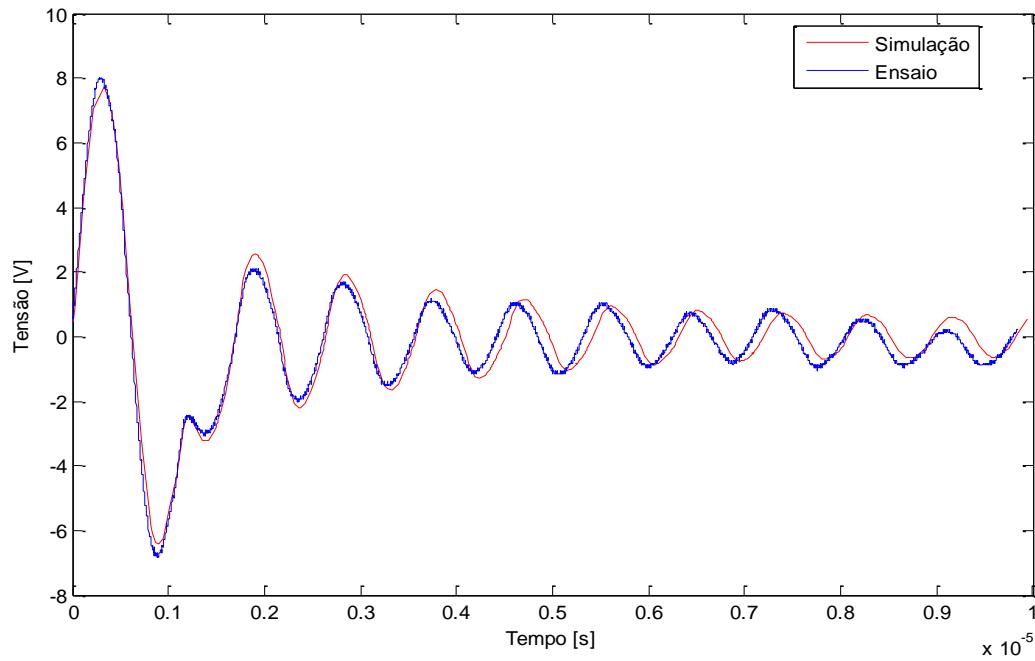


Figura 4.29: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (850 kHz)

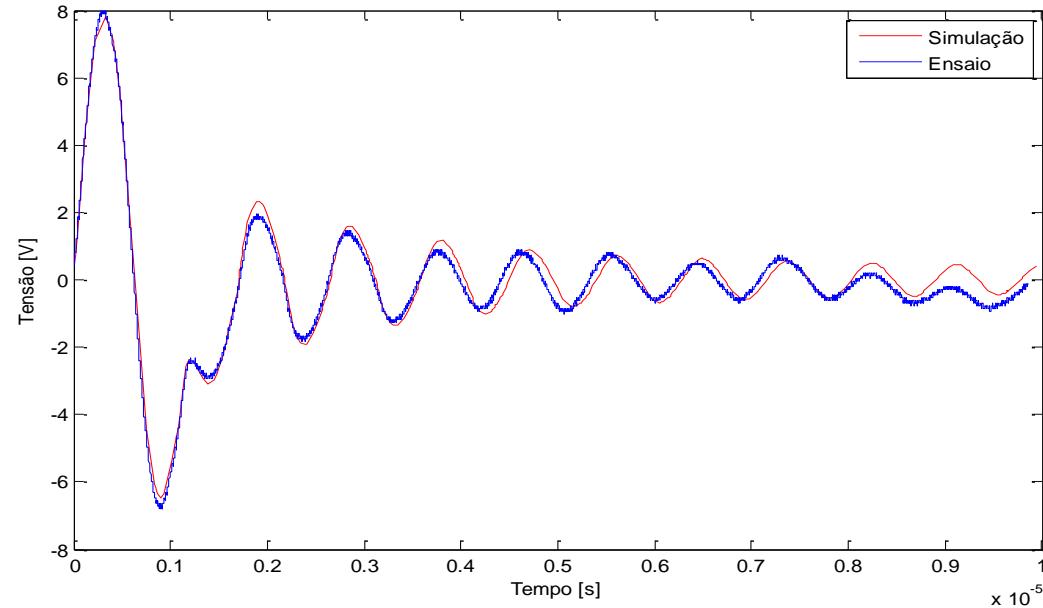


Figura 4.30: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (850 kHz)

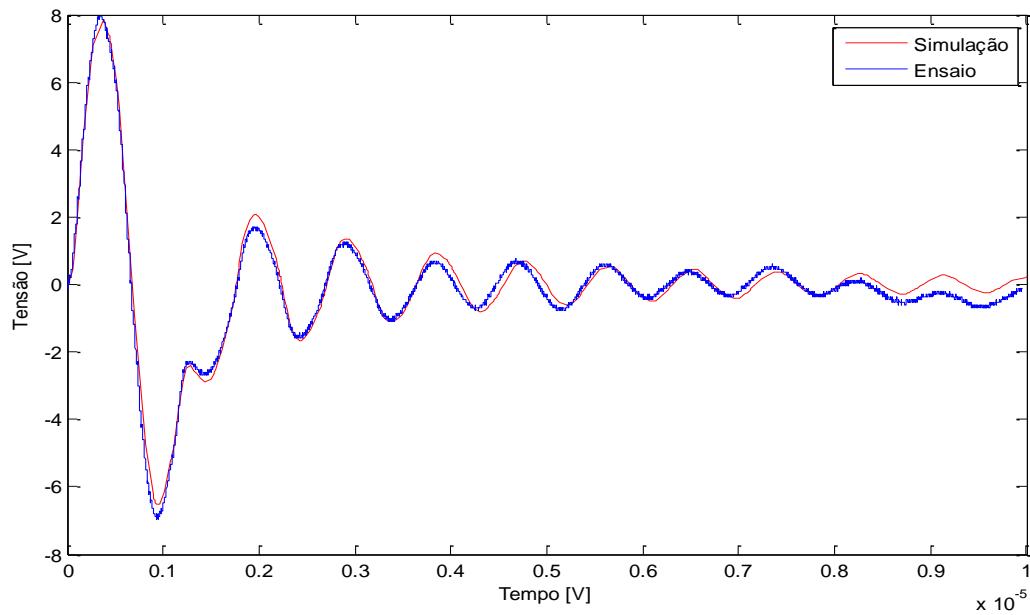


Figura 4.31: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (850 kHz)

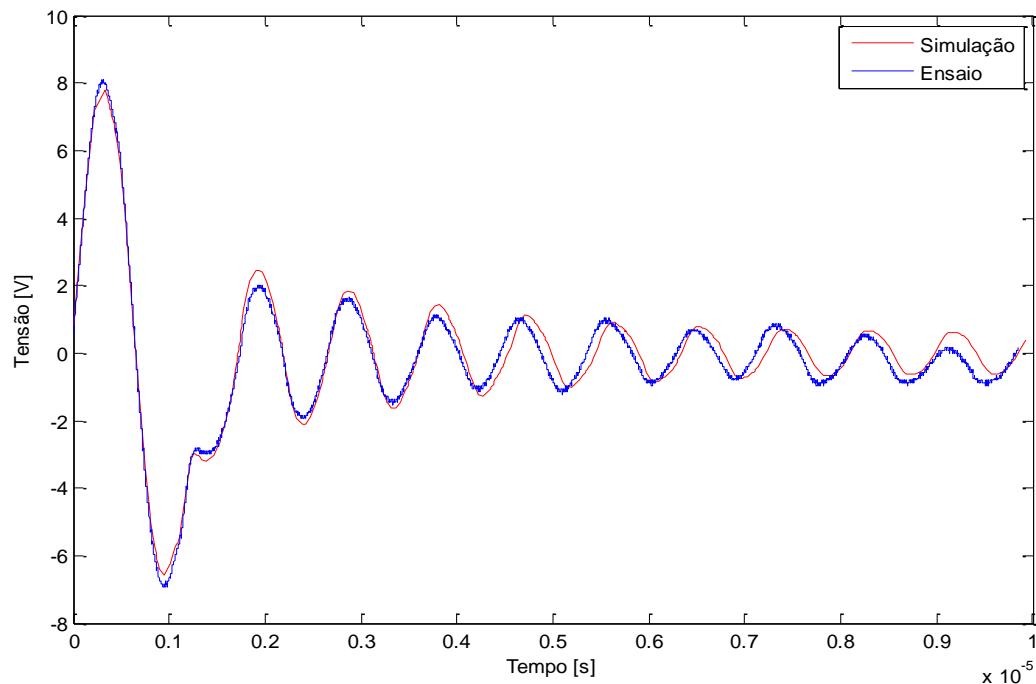


Figura 4.32: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (800 kHz)

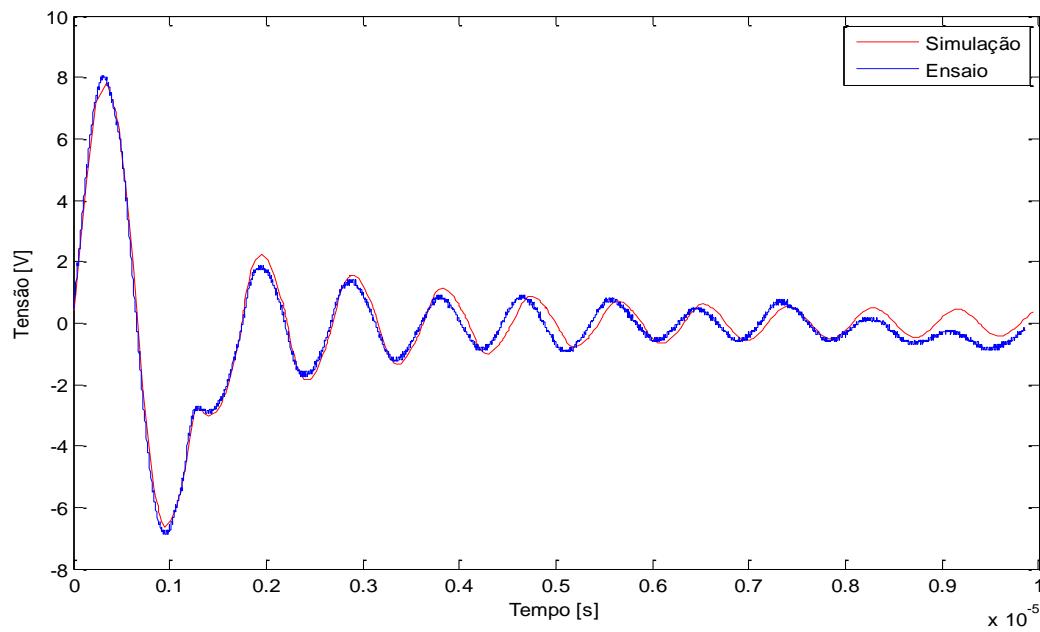


Figura 4.33: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (800 kHz)

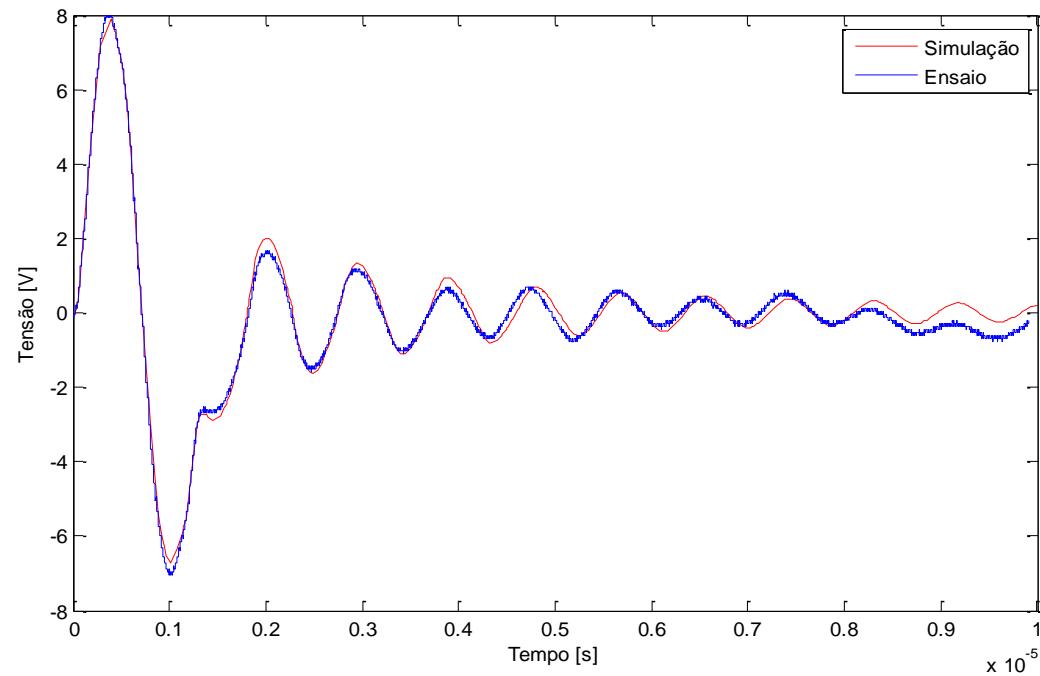


Figura 4.34: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (800 kHz)

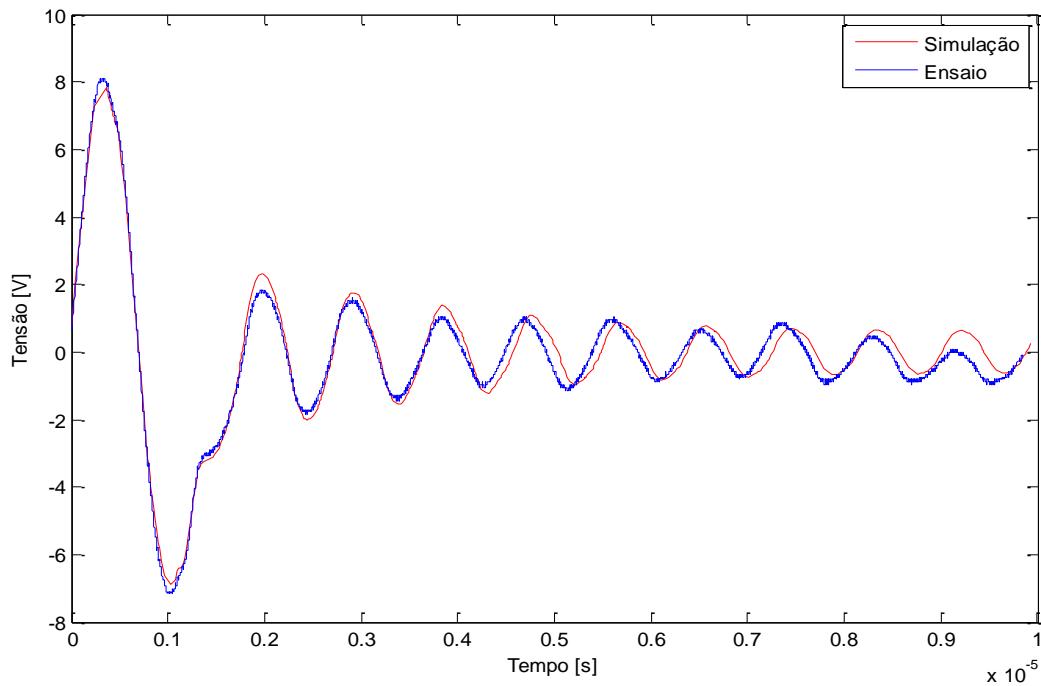


Figura 4.35: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (750 kHz)

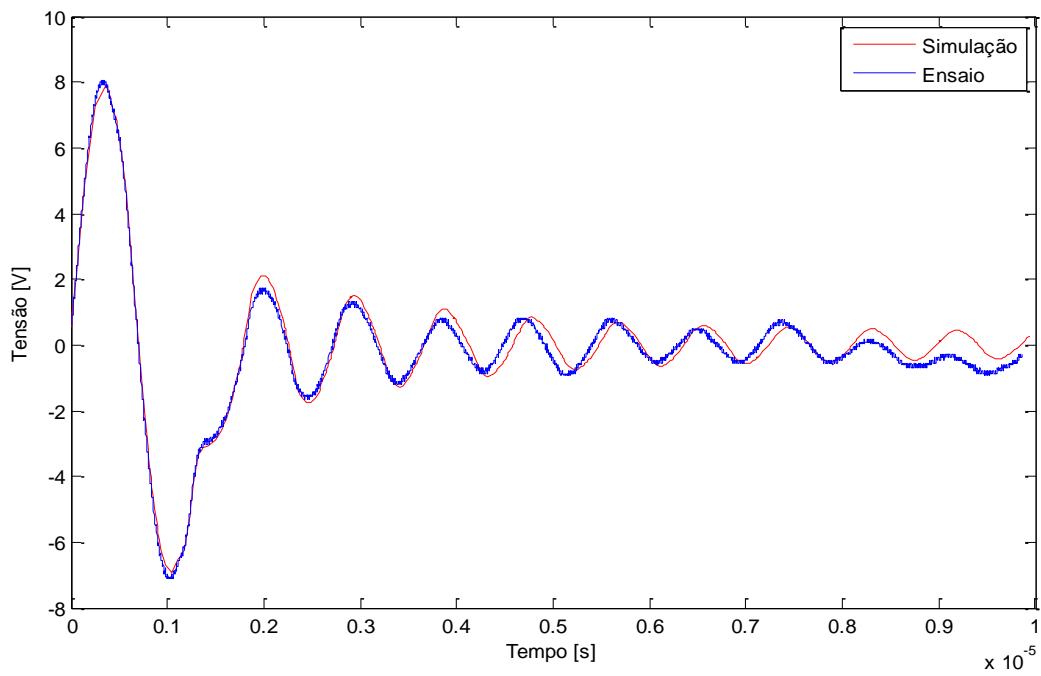


Figura 4.36: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (750 kHz)

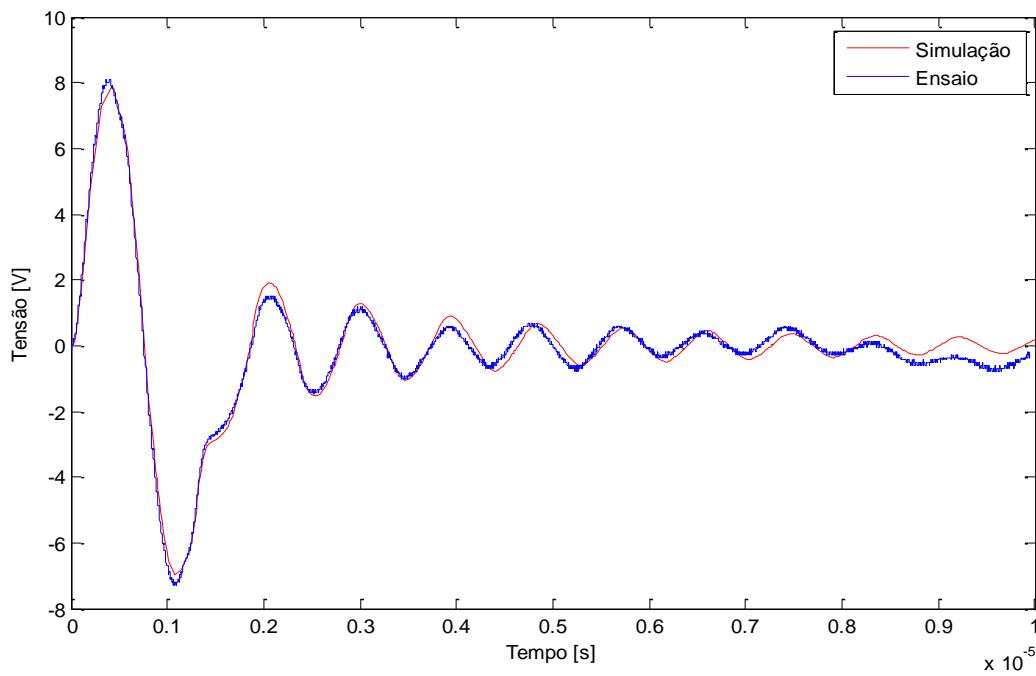


Figura 4.37: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (750 kHz)

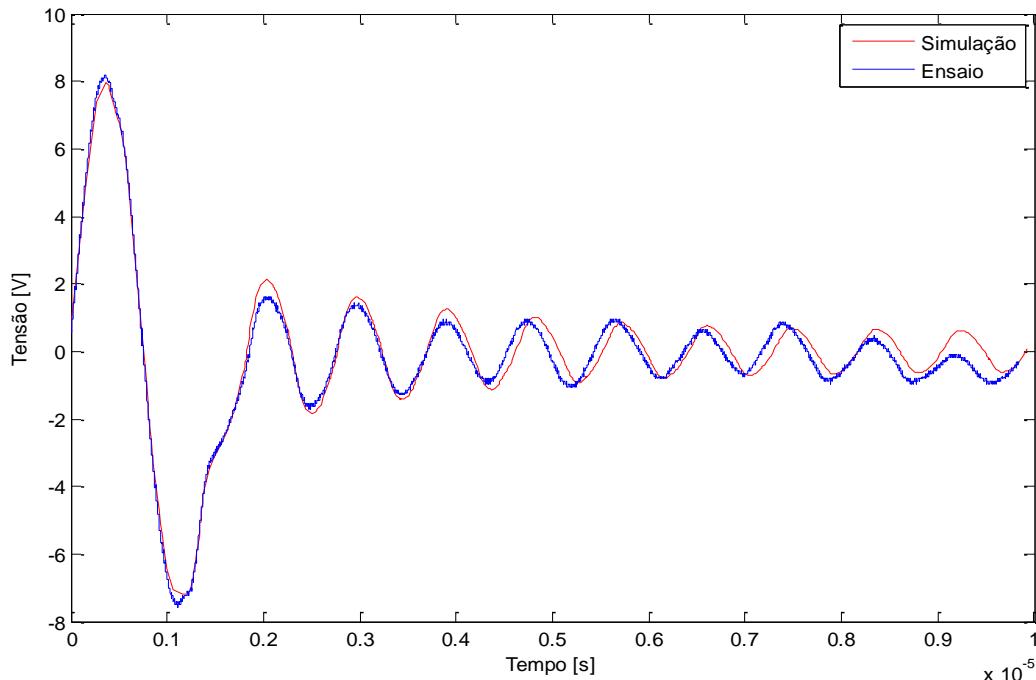


Figura 4.38: Simulação e ensaio com a cerâmica solta no ar (700 kHz)

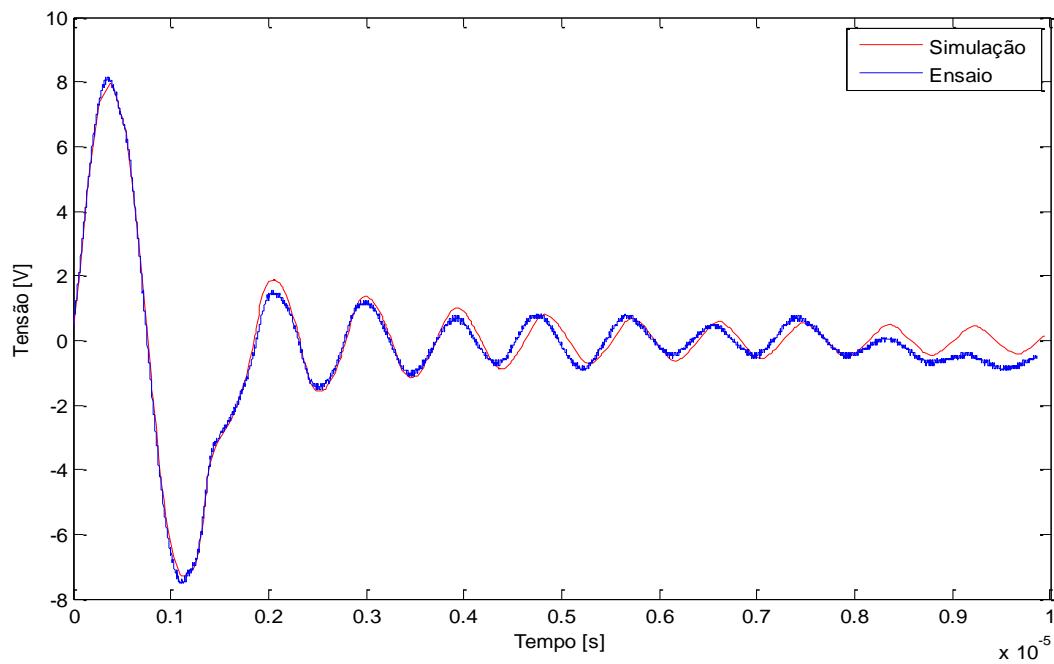


Figura 4.39: Simulação e ensaio com a cerâmica flutuando (700 kHz)

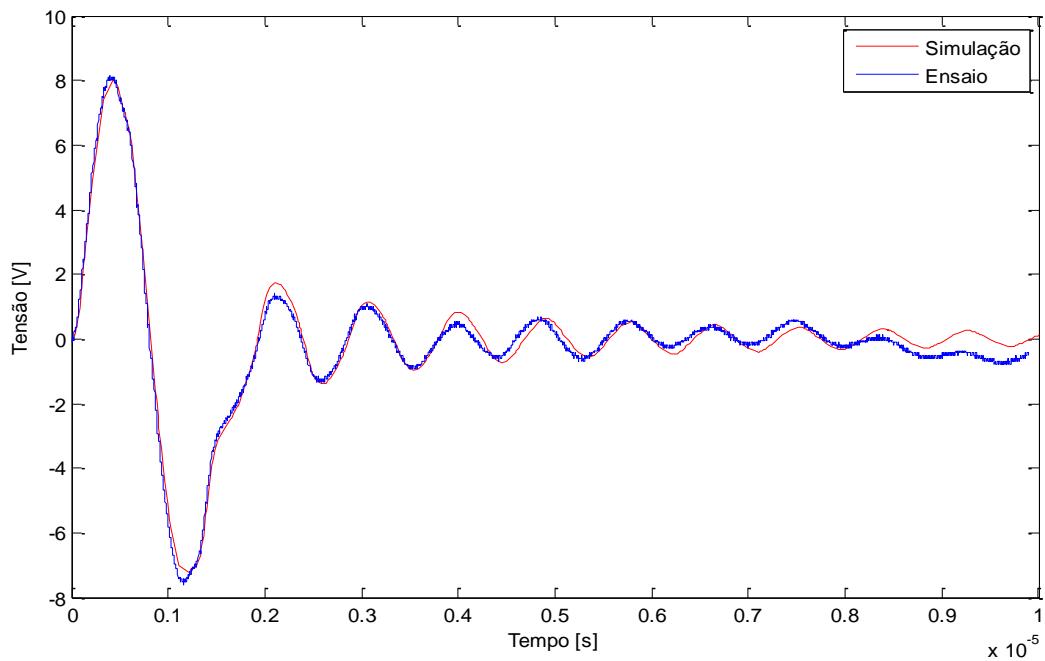


Figura 4.40: Simulação e ensaio com a cerâmica submersa (700 kHz)

De maneira geral, nota-se uma boa concordância entre os sinais medidos e simulados para as três configurações de ensaio. Percebe-se também que para as frequências do pulso de entrada maiores, acima de 1 MHz, as simulações foram mais precisas. Outra consideração foi que o tempo de decaimento dos sinais de ensaio foram mais rápidos comparados aos decaimentos dos sinais de simulação, fato relacionado à utilização do modelo de linha da transmissão sem perdas no circuito de simulação do PSPICE. Sendo assim, é possível notar uma maior diferença entre os sinais nos períodos finais de ensaio.

### 4.3 Erros estatísticos

Neste item foi analisada a equivalência entre os sinais medidos e simulados por meio das expressões de erro absoluto ( $E_{abs}$ ), erro relativo percentual ( $E_{rel}$ ) e erro quadrático ( $E_{quad}$ ). Tanto as simulações quanto as medidas foram amostradas em um vetor de aproximadamente 39000 amostras, com os valores de tensão referentes ao tempo de 0 à 10  $\mu$ s. Comparou-se, ponto a ponto, por meio de uma rotina em Matlab, cada valor medido com o respectivo valor simulado através das expressões abaixo:

$$E_{abs} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |V_{med}^i - V_{sim}^i|, \quad (4.1)$$

$$E_{rel} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{V_{med}^i - V_{sim}^i}{V_{med}^i} \right|, \quad (4.2)$$

$$E_{quad} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{med}^i - V_{sim}^i)^2}, \quad (4.3)$$

sendo que  $N$  é o número de pontos da amostra,  $V_{med}^i$  é o valor da tensão da  $i$ -ésima posição da matriz de tensão medida no osciloscópio e  $V_{sim}^i$  é o valor de tensão  $i$ -ésima posição do vetor de tensão da simulação. Os resultados das análises estão nas Tabelas 4.1, 4.1 e 4.3.

Tabela 4.1: Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica solta no ar

Frequência do pulso de entrada	E <sub>abs</sub>	E <sub>rel</sub> (%)	E <sub>quad</sub>
2,5 MHz	0,1772	135,9842	0,2347
2 MHz	0,1603	127,2534	0,2113
1,5 MHz	0,1540	84,3657	0,2034
1 MHz	0,2274	97,1932	0,2979
950 kHz	0,2142	91,1778	0,2585
900 kHz	0,2195	95,4053	0,2651
850 kHz	0,2303	112,4008	0,2789
800 kHz	0,2440	137,6031	0,2967
750 kHz	0,2789	167,8408	0,3476
700 kHz	0,2765	104,1091	0,3475

Tabela 4.2: Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica flutuando sobre a água

Frequência do pulso de entrada	E <sub>abs</sub>	E <sub>rel</sub> (%)	E <sub>quad</sub>
2,5 MHz	0,2415	200,5750	0,3069
2 MHz	0,2521	193,0033	0,3068
1,5 MHz	0,2555	162,6552	0,3065
1 MHz	0,2835	118,4617	0,3545
950 kHz	0,2831	117,5436	0,3538
900 kHz	0,2880	117,3970	0,3617
850 kHz	0,2214	76,3870	0,2826
800 kHz	0,2299	80,1500	0,2908
750 kHz	0,2767	93,5446	0,3581
700 kHz	0,2542	96,8562	0,3249

Tabela 4.3: Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica submersa na água

Frequência do pulso de entrada	$E_{abs}$	$E_{rel} (\%)$	$E_{quad}$
2,5 MHz	0,1204	99,7455	0,1512
2 MHz	0,1151	87,3546	0,1518
1,5 MHz	0,1286	80,3408	0,1726
1 MHz	0,1777	68,1901	0,2313
950 kHz	0,1870	68,7695	0,2427
900 kHz	0,1905	68,7286	0,2434
850 kHz	0,2119	78,1758	0,2656
800 kHz	0,2068	75,0325	0,2652
750 kHz	0,2249	84,3137	0,2816
700 kHz	0,2275	91,2858	0,2920

Os valores dos erros relativos percentuais das Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 mostraram-se altos, em alguns casos superiores a 100 %. Tais erros estão relacionados às discrepâncias entre os sinais medidos e simulados nos períodos finais dos ensaios, ou seja, próximos de  $10 \mu s$ , fato que se pode notar nos gráficos comparativos do item 4.2. A fim de se verificar a melhor concordância entre ensaios e simulações nos períodos iniciais da análise transitória, os cálculos acima foram refeitos, porém, apenas para a primeira metade dos valores de tensão medidos e simulados. Nas Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 encontram-se os resultados desta análise.

Tabela 4.4: Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica solta no ar considerando a primeira metade dos valores de tensão

Frequência do pulso de entrada	$E_{abs}$	$E_{rel} (%)$	$E_{quad}$
2,5 MHz	0,0323	14,6275	0,0818
2 MHz	0,0312	10,0271	0,0831
1,5 MHz	0,0411	12,8784	0,1056
1 MHz	0,0709	16,4434	0,1833
950 kHz	0,0622	14,9804	0,1469
900 kHz	0,0631	15,3852	0,1492
850 kHz	0,0648	16,2897	0,1548
800 kHz	0,0678	17,9856	0,1629
750 kHz	0,0790	17,0093	0,1963
700 kHz	0,0747	16,6359	0,1869

Tabela 4.5: Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica flutuando sobre a água considerando a primeira metade dos valores de tensão

Frequência do pulso de entrada	$E_{abs}$	$E_{rel} (%)$	$E_{quad}$
2,5 MHz	0,0495	24,6328	0,1234
2 MHz	0,0486	21,8426	0,1200
1,5 MHz	0,0511	16,9536	0,1251
1 MHz	0,0569	15,0065	0,1435
950 kHz	0,0578	15,2090	0,1464
900 kHz	0,0591	15,1594	0,1503
850 kHz	0,0536	12,6584	0,1288
800 kHz	0,0563	13,1889	0,1360
750 kHz	0,0748	15,9996	0,1923
700 kHz	0,0596	12,3589	0,1474

Tabela 4.6: Erros estatísticos referentes aos ensaios com a cerâmica submersa na água considerando a primeira metade dos valores de tensão

Frequência do pulso de entrada	$E_{abs}$	$E_{rel} (\%)$	$E_{quad}$
2,5 MHz	0,0294	11,6808	0,0758
2 MHz	0,0302	9,5787	0,0840
1,5 MHz	0,0354	10,4474	0,0969
1 MHz	0,0497	11,0460	0,1249
950 kHz	0,0522	11,8556	0,1315
900 kHz	0,0513	11,6572	0,1271
850 kHz	0,0575	14,2853	0,1408
800 kHz	0,0528	11,6257	0,1329
750 kHz	0,0573	13,3223	0,1400
700 kHz	0,0548	12,9056	0,1393

Pode-se notar através dos resultados das tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 que houve uma queda nos valores dos erros calculados, evidenciando o melhor desempenho da simulação nos instantes iniciais do período de 10  $\mu$ s da análise transitória. Como consideração final da análise numérica, destaca-se uma tendência de diminuição dos erros absoluto e quadrático com o aumento da frequência do pulso de entrada, evidenciando o fato de que o modelo teve um melhor desempenho nas frequências superiores.



## 5 CONCLUSÕES

Nas análises feitas com a alteração do meio adjacente à cerâmica, os resultados evidenciaram uma pequena mudança no comportamento do sinal. Essa mudança está visível tanto nos ensaios, quanto nas simulações. Para o ensaio com a cerâmica livre no ar, a amplitude do sinal decaiu mais lentamente do que o ensaio com a cerâmica flutuando na água. A tensão deste último ensaio, por sua vez, teve um decaimento mais lento quando comparado ao ensaio com a cerâmica submersa na água. Este comportamento está relacionado ao melhor casamento de impedância acústica entre a cerâmica e a água. Nas simulações, as mudanças dos meios adjacentes foram representadas pelas variações nas resistências dos terminais da linha de transmissão mecânica (resistência frontal e de retaguarda). Tal mudança fez com que as simulações tivessem o mesmo comportamento do que os ensaios, em todos os casos analisados.

Em seguida, comparando-se os sinais medidos com os simulados em um mesmo gráfico, pode-se observar uma relevante concordância entre eles, principalmente nos instantes de tempo iniciais. Entretanto, nos períodos de tempo próximos de 10  $\mu$ s, os sinais apresentaram um desvio de tensão evidente no gráfico, mesmo tendo o mesmo comportamento. Tal fato foi comprovado através da análise estatística realizada, sendo que os valores dos erros relativos percentuais foram altos. Entretanto, ao se realizar a mesma análise numérica para a primeira metade dos valores de tensão simulados e medidos, houve uma queda em todos os valores de erro calculados, principalmente para o erro relativo percentual.

Com estes resultados conclui-se que o modelo de Leach foi eficaz na simulação do ensaio realizado com a cerâmica de PZT-4. Dando sequência ao estudo do modelo de Leach, propõem-se outras abordagens:

- Verificação do comportamento do modelo para diferentes materiais adjacentes à cerâmica, além da água e do ar;
- Adaptação do modelo para frequências abaixo de 100 kHz;
- Adaptação do modelo para simulação dos piezoeletretos termo-formados.



## REFERÊNCIAS

- ALTAFIM, R. A. P. **Análise e implementação de métodos para a caracterização de eletretos termo-formados**. 2005. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- \_\_\_\_\_. **Novos piezoeletretos**: desenvolvimento e caracterização. 2010. Dissertação (Doutorado em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- ALTAFIM, R. A. C. et al. Piezoelectricity of multi-layers space-charge electrets from Teflon FEP with homogeneous voids distributed on its surface. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2003, Albuquerque. *Proceedings...* Piscataway: IEEE Service Center, 2003. p. 225-228.
- \_\_\_\_\_. Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of fluoropolymer-electret films. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, New York, v. 13, n. 5, p. 979-985, Oct. 2006.
- DAHIYA, R. S.; VALLE, M.; LORENZELLI, L. SPICE model for lossy piezoelectric Polymers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**. v. 56, n. 2, p. 387-395, Feb. 2009.
- GERHARD-MULTHAUPT, R. Less can be more. Holes in polymers lead to a new paradigm of piezoelectric materials for electret transducers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 9, n. 5, p. 850-859, 2002.
- HAERTLING, G. H. Ferroelectric Ceramics: History and Technology. **Journal of the American Ceramic Association**, v. 82, n. 4, p. 797-818, 1999.
- KAWAI, H. The Piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride). **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 8, n. 7, p. 975-976, 1969.
- KINSLER, L. E. et al. **Fundamentals of acoustics**. 4<sup>th</sup>ed. New York: Jonh Wiley, 2000.
- KOSSOF, G. The Effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, v. 13, n. 1, p. 20-30, Mar. 1966.
- LEACH, W. M. Controlled-source analogous circuits and SPICE models for piezoelectric transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 41, n. 1, p. 60-66, Jan. 1994.
- LEEDOM, D. A.; KRIMHOLTS, R.; MATTHAEI, G. L. Equivalent circuits for transducers having arbitrary even- or odd-symmetry piezoelectric excitation. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, v. 18, n. 3, p. 128-141, July 1971.
- MASON, W. P. **Electromechanical transducers and wave filters**. Princeton: Van Nostrand, 1948.

- MEDEIROS, L. J. **Hidrofone ultrassônico com piezoeletreto como elemento transdutor**. 2014. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- MORRIS, S. A.; HUTCHENS, C. G. Implementation of mason's model on circuit analysis program. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 33, n. 3, p. 295-298, May 1986.
- PÜTTMER, A. et al. SPICE model for lossy piezoceramic transducer. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 44, n. 1, p. 60-66, Jan.1997.
- REDWOOD, M. Transient performance of a piezoelectric transducer. **The Journal of Acoustic Society of America**, v.33, n. 4, p.527-536, Apr. 1961.
- SELFridge, A. R. Approximate material properties in isotropic materials. **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics**, v. 32, n. 3, p. 381-394, May 1985.
- SHERAR, M.; FOSTER, F. The Design and fabrication of high frequency poly (vinylidene fluoride) transducers. **Ultrasonic Imaging**, v. 94, p. 75-94, 1989.
- SHERMAN, C. H.; BUTLER, J. L. **Transducers and arrays for underwater sound**. New York: Springer, 2007.
- TRAINER, M. Kelvin and piezoelectricity. **IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation**, v. 10, p. 842-861, 2003.
- VAN DEVENTER, J.; LÖFQVIST, T.; DELSING, J. PSpice simulation of ultrasonic systems. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 47, n. 4, p. 1014-1024, July 2000.

## ANEXO A

### I – Dedução do modelo de Leach

- Assumindo que  $d(hi/s)/dz = 0$  ( $i$  é a corrente no terminal elétrico do transdutor) e subtraindo este termo do lado esquerdo da equação (2.3) (LEACH, 1994):

$$\frac{df}{dz} - \frac{d(hi/s)}{dz} = -\rho Asu$$

E, portanto:

$$\frac{d}{dz} \left[ f - \frac{h}{s} i \right] = -\rho Asu$$

- Assumindo que  $\varsigma = u/s$  e  $D = i/(sA)$  e substituindo tais valores em (2.4) (LEACH, 1994):

$$c \frac{d(\frac{u}{s})}{dz} = -\frac{1}{A} f + h \frac{i}{(sA)}$$

$$\frac{c}{s} \frac{du}{dz} = -\frac{1}{A} f + h \frac{i}{(sA)}$$

Desenvolvendo:

$$\frac{du}{dz} = -\frac{s}{Ac} \left[ f - \frac{h}{s} i \right]$$

- Substituindo  $\varsigma = u/s$  e  $D = i/(sA)$  em (2.5) e integrando em relação ao eixo  $z$  todos os termos da equação de  $z=0$  à  $z=1$  (LEACH, 1994):

$$\int_{z=0}^{z=1} Edz = \int_{z=0}^{z=1} -h \frac{s}{dz} dz + \int_{z=0}^{z=1} \frac{1}{\varepsilon} \frac{i}{(sA)} dz$$

$$E \int_{z=0}^{z=1} dz = -\frac{h}{s} \int_{z=0}^{z=1} du + \frac{i}{\epsilon(sA)} \int_{z=0}^{z=1} dz$$

Sendo  $u(z=0)=u_1$  e  $u(z=1)=u_2$ :

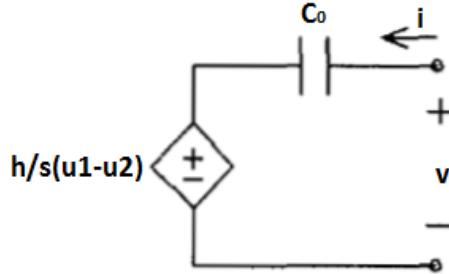
$$E \cdot l = \frac{h}{s} [u_1 - u_2] + \frac{i}{\epsilon(sA)} l$$

Considerando  $v = E \cdot l$  (tensão entre os eletrodos do transdutor) e  $C_0 = \epsilon \cdot A / l$  (capacitância do transdutor):

$$v = \frac{h}{s} [u_1 - u_2] + \frac{1}{C_0 s} i$$

## II – Dedução do circuito derivado do modelo de Leach para aplicação no PSPICE

- O circuito da parte elétrica do modelo de Leach é formado por uma fonte de tensão controlada e pela capacitância do transdutor:



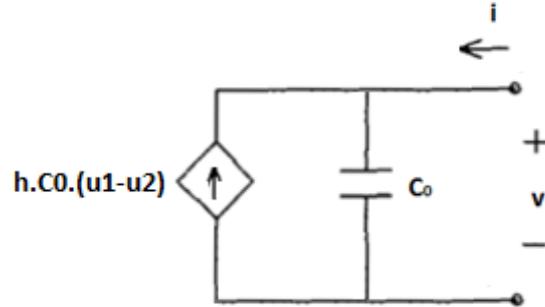
A impedância de *Thevenin* do circuito é:

$$Z_{Th} = \frac{1}{C_0 s}$$

Aplicando-se então um curto-círcuito aos terminais de tensão  $v$  e calculando a corrente:

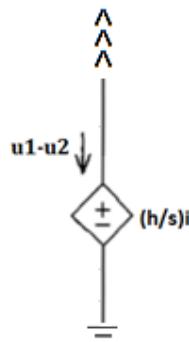
$$i_{\text{norton}} = \frac{\frac{h}{s}(u_1 - u_2)}{\frac{1}{C_0 s}} = hC_0(u_1 - u_2)$$

Portanto, de acordo com o teorema de Norton, o circuito equivalente é:

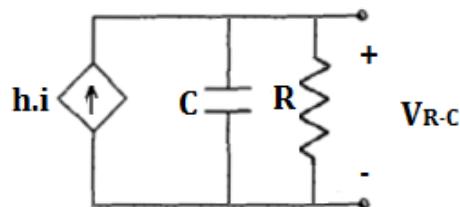


- No circuito da parte mecânica, a tensão é controlada por  $(h/s)i$ :

### Linha mecânica



Seja um circuito R-C paralelo alimentado por uma fonte de corrente de valor  $h \cdot i$ :



A tensão da sobre o resistor é calculada por:

$$V_{R-C} = h_i \frac{\frac{1}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}}$$

No caso de um resistor de  $1 \text{ k}\Omega$  e um capacitor de  $1 \text{ F}$ , e considerando que a frequência seja grande o suficiente para que se possa desprezar o termo  $1/Cs$  no denominador da equação acima,  $V_{R-C}$  pode ser aproximado por:

$$V_{R-C} = \frac{h}{s} i$$

Portanto, a fonte de tensão do circuito original, pode ser substituída por outra fonte de tensão de ganho unitário, controlada pela tensão  $V_{R-C}$ .

