

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Luiz Felipe de Oliveira Marchezini

Influência da Geometria e da impedância do sistema de medição na resposta em frequência de Filmes Finos de PVDF sujeitos a ondas de tensão longitudinal

Belo Horizonte  
2021

Luiz Felipe de Oliveira Marchezini

**Influência da Geometria e da impedância do sistema de medição na resposta em frequência de Filmes Finos de PVDF sujeitos a ondas de tensão longitudinal**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Torres Maia

Belo Horizonte  
2021

M317i

Marchezini, Luiz Felipe de Oliveira.

Influência da geometria e da impedância do sistema de medição na resposta em frequência de filmes finos de PVDF sujeitos a ondas de tensão longitudinal [recurso eletrônico] / Luiz Felipe de Oliveira Marchezini. - 2021.

1 recurso online (121 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Antônio Augusto Torres Maia.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 117-121.

Bibliografia: f. 113-116.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Detectores - Teses. 3. Ondas - Tensão - Teses. 4. Medição - Teses. 5. Resposta em frequência (Dinâmica) - Teses. I. Maia, Antônio Augusto Torres. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E DA IMPEDÂNCIA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO NA RESPOSTA EM  
FREQUÊNCIA DE FILMES FINOS DE PVDF SUJEITOS A ONDAS DE TENSÃO LONGITUDINAL**

**LUIZ FELIPE DE OLIVEIRA MARCHEZINI**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Antonio Augusto Torres Maia (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Antonio Ferreira Ávila (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG), Dr. Eduardo Bauzer Medeiros (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG) e Dr. Lazaro Valentim Donadon (Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Projeto e Sistemas**".

Dissertação aprovada no dia 25 de outubro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Augusto Torres Maia, Professor do Magistério Superior**, em 28/10/2021, às 22:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Ferreira Avila, Professor do Magistério Superior**, em 04/11/2021, às 18:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Bauzer Medeiros, Membro de comissão**, em 05/11/2021, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Lazaro Valentim Donadon, Membro**, em 08/11/2021, às 09:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1049344** e o código CRC **181705C9**.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que deu-me a benção da vida.

Agradeço ao Dr. Antônio Augusto Torres Maia, que orientou-me com muita paciência, confiança, respeito e compreensão. O conhecimento, as recomendações e apoio e motivação repassados foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Agradeço ao Dr. Antônio Ferreira Ávila, que apresentou-me o universo dos polímeros e a possibilidade de desenvolvimento do trabalho nesta área.

Agradeço a M<sup>a</sup>. Suchilla Garcia Leão, que compartilhou seu conhecimento sobre polímeros comigo e apresentou questões técnicas que contribuíram com a escolha do tópico desenvolvido neste trabalho.

Agradeço a CAPES, que concedeu-me bolsa durante parte do meu mestrado. Tal apoio financeiro foi significativo para minha capacitação e trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG, nas pessoas do Dr. Marco Túlio Correa de Faria e Marina Cândida de Miranda Costa. A pandemia de COVID-19 desafiou a todos, paralisando muitas atividades devido a necessidade de isolamento. A flexibilidade de prazos dada como resposta pelo Programa de Pós-Graduação foi fundamental para permitir a conclusão deste trabalho.

Agradeço à UFMG, pela estrutura e apoio ofertados. O acesso a artigos e materiais científicos concedidos pela mesma através de parcerias com vários periódicos foi importante para desenvolver este trabalho.

Agradeço a meus pais e família, base a partir da qual construí minha vida. Sem o suporte de vocês, isto não seria possível!

Agradeço a colegas de trabalho e amigos pelos diálogos, sugestões e ideias compartilhadas .

## RESUMO

Filmes feitos de difluoreto de polivinilideno (PVDF), quando revestidos com tinta de prata, constituem sensores piezoelétricos que podem ser usados para detectar e medir ondas de tensão no plano em estruturas. Esses filmes podem ser cortados com diferentes dimensões geométricas e o formato final do filme pode influenciar sua curva de resposta em frequência. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das dimensões geométricas de sensores de filme PVDF e da impedância do sistema de medição utilizado na resposta em frequência do filme, quando utilizados como elementos de detecção de ondas de tensão senoidal no plano. Para desenvolver esta análise, um modelo matemático foi usado para simular a excitação mecânica, a resposta piezoelétrica do sensor, a relação entre a frequência de excitação e a impedância elétrica de saída e seu impacto sobre o sinal obtido usando equipamento de medição elétrica típico como um osciloscópio. Resultados mostraram que as reduções no comprimento do sensor aumentaram a largura de banda de frequência adequada para medições de ondas de tensão e também aumentaram significativamente a frequência de corte superior, tornando-o adequado para medição de ondas de tensão com frequências mais altas. O aumento do comprimento e largura do sensor e a redução da espessura reduziram a frequência de corte inferior do sistema de medição, melhorando a detecção de ondas de tensão com frequências mais baixas. Simulações relacionadas a uma impedância de saída elétrica deste sensor mostraram que o efeito de carregamento pode afetar significativamente a amplitude do sinal ao longo da faixa de frequência. Para o sensor PVDF padrão e equipamento de medição elétrica típico com  $1\text{M}\Omega$  de impedância de entrada, a atenuação do sinal a 1 Hz pode ser superior a 40 dB e a frequência de corte inferior do sistema superior a 200 Hz. Tal fator, se não considerado, pode gerar erros relacionados à medição da magnitude das ondas de tensão com baixas frequências.

Palavras- Chave: sensor de PVDF, ondas de tensão mecânica, sensor piezoelétrico, medição, resposta em frequência

## ABSTRACT

Films of Polyvinylidene fluoride (PVDF), when covered with silver ink, constitute piezoelectric sensors that can be used to detect and measure longitudinal stress waves on structures. Such films can be cut with different geometric dimensions and the final format of the film can influence its own frequency response curve. The objective of this work is to evaluate the influence of the geometrical dimensions of PVDF thin film sensors and electrical impedance of the measurement equipment used into the frequency response of a measurement system used to detect sinusoidal stress waves actuating on a structure. To develop this analysis, a mathematical model was used to simulate the mechanical solicitation, the piezoelectric response of the sensor, the relation between the frequency of the solicitation and the electric output impedance of the sensor and its impact into the signal obtained using an oscilloscope as electrical measurement equipment. Results showed that reduction on length of sensor increased the useful frequency bandwidth for measurement of stress waves and also increased the upper cut-off frequency of operation of the measurement system, allowing its use for measurement of stress waves with higher frequencies. The increase of length and width of the sensor and decrease of its thickness reduced the lower cut-off frequency of the measurement system, improving the detection of stress waves with lower frequencies. Simulations related to the electric output impedance of this sensor showed that the *loading effect* can significantly affect the amplitude of the measured signal over the frequency bandwidth. For the standard PVDF sensor and typical measurement equipment with  $1\text{M}\Omega$  of electrical input impedance, the signal attenuation at 1 Hz can be higher than 40dB and the lower cut-off frequency of the measurement system can be higher than 200 Hz . Such factor, if not considered, can generate errors related to the measurement of amplitude of stress waves with lower frequencies propagating on the structure.

Keywords: PVDF sensor, mechanical stress waves, piezoelectric sensor, measurement, frequency response

## Lista de Figuras

Figura 1: Quadro esquemático de correlação de variáveis de estado através de coeficientes elásticos, dielétricos e piezoelétricos. Adaptado de Gusarov (2015).....	21
Figura 2: Representação esquemática da conformação de cadeia para as fases alfa, beta e gama do PVDF. Adaptado de Gusarov, 2015.....	24
Figura 3: Transformação de fases cristalinas principais do PVDF. Fonte: Menezes, 2017.....	26
Figura 4: Montagem experimental para medição de deformação cíclica de barra metálica por sensor de PVDF. Fonte: Fotouhi ( 2019 )......	31
Figura 5: Curva de resposta em frequência de sistema dinâmico, com faixa de passagem entre as frequências de corte $f_{c1}$ e $f_{c2}$ . Adaptado de Ferreira ( 2006).....	32
Figura 6: Modelo de sensor piezoelétrico. Adaptado de Karki (2000).....	33
Figura 7: Amplitude de impedância elétrica de filmes de PVDF com largura de 10 mm, distância entre eletrodos de 1 mm, 2 mm, 4mm e 8 mm e frequência entre (10 <sup>-1</sup> e 10 <sup>6</sup> Hz ). Fonte: Adaptado de Xiang Yao (2016).....	34
Figura 8: Amplitude de impedância elétrica de filmes de PVDF com distância entre eletrodos de 1 mm, largura de 1 mm, 2 mm, 4mm e 8 mm e frequência entre (10 <sup>-1</sup> e 10 <sup>6</sup> Hz ). Adaptado de Xiang Yao (2016).....	35
Figura 9: Resposta em frequência de sistema com comportamento "passa altas". Escalas log-log. Adaptado de Measurement Specialties (1999).....	36
Figura 10: Típica curva de resposta em frequência de filme de elemento piezoelétrico. Adaptado de Brown (1990).....	38
Figura 11: Curva de resposta em frequência para sensores de PVDF com diferentes comprimentos. Sensores com largura de 6 mm e comprimentos de 50 mm (A) e 350 mm(B). Adaptado de Brown (1990).....	39
Figura 12: Amplitude da tensão elétrica média gerada pelo sensor devido a uma onda de tensão mecânica senoidal em função do incremento do comprimento do sensor até o quádruplo do valor do comprimento de onda. Adaptado de Kotian et al, 2013.....	40
Figura 13: Tensão elétrica máxima gerada pelo sensor em função da variação do comprimento de onda ou frequência da onda para vários comprimentos do sensor. Adaptado de Kotian et al, 2013.....	41
Figura 14: Circuito elétrico correspondente ao modelo básico de sensor piezoelétrico.....	44
Figura 15: Modelo físico de filme fino de PVDF exposto à ondas compressivas longitudinais propagantes. Adaptado de Kotian et al (2013).....	45

Figura 16: Diagrama mostrando os eixos principais cartesianos e o correspondente posicionamento do sensor de filme de PVDF. Adaptado de Kotian <i>et al</i> , 2013.....	47
Figura 17: Capacitor de Placas paralelas constituído por filme fino de PVDF revestido por tinta condutiva de prata.....	51
Figura 18: Diagrama de montagem elétrica utilizada para aferir tensão elétrica gerada pela deformação de filme de PVDF. Adaptado de Gusarov <i>et al</i> , 2013.....	53
Figura 19: Curvas típicas de descarga de filmes de PVDF expostos a deformação mecânica de 0,5 %. Adaptado de GUSAROV <i>et al</i> , 2013.....	53
Figura 20: Constante de tempo para auto descarga dos elementos piezoelétricos ( PVDF, PZT e MFC) para vários valores de tensão elétrica inicial. Adaptado de Gusarov, 2015.....	58
Figura 21: Reatância Capacitiva do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação.....	63
Figura 22: Resistência Elétrica do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação.....	63
Figura 23: Resistência Elétrica do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação.....	64
Figura 24: Impedância Elétrica Equivalente do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação.....	65
Figura 25: Curva de resposta em frequência para o sensor de filme de PVDF com espessura de 28um, comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de 10MOhm.....	67
Figura 26: Comparação de curvas de resposta em frequência previstas pelo modelo de Kotial <i>et al</i> (2013) e modelo complementar.....	69
Figura 27: Variação da capacitância elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de seu comprimento.....	72
Figura 28: Variação da resistência elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de seu comprimento.....	72
Figura 29: Variação do módulo da Reatância Capacitiva do sensor de filme de PVDF em função de seu comprimento e frequência do sinal de excitação.....	73
Figura 30: Variação do módulo da Impedância Elétrica do sensor de filme de PVDF em função de seu comprimento e frequência.....	74
Figura 31: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 10mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.....	76

Figura 32: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 96 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.....	76
Figura 33: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Comprimento variado entre 1 mm e 100 mm. Faixa de frequência entre 1 Hz e 200kHz.....	78
Figura 34: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 100 kHz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.....	79
Figura 35: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 200 kHz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.....	79
Figura 36: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Comprimento variado entre 1 mm e 100 mm. Faixa de frequência entre 1 Hz e 200 Hz.....	81
Figura 37: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 1 Hz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.....	82
Figura 38: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 200 Hz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.....	83
Figura 39: Variação da capacitância elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua largura.....	85
Figura 40: Variação da resistência elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua largura.....	85
Figura 41: Variação do módulo da Reatância Capacitiva do sensor de filme de PVDF em função de sua largura e frequência.....	86

Figura 42: Variação do módulo da impedância elétrica do sensor de filme de PVDF em função de sua largura e frequência.....	87
Figura 43: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 30 mm e largura de 36 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.....	89
Figura 44: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 30 mm e largura de 4 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.....	89
Figura 45: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e comprimento de 32 mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Largura variada entre 1 mm e 100 mm. Faixa de frequência variada entre 1 Hz e 200 Hz.....	90
Figura 46: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e comprimento de 30 mm. Largura do sensor variado entre 1 mm e 50 mm. Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 1 Hz.....	91
Figura 47: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um e comprimento de 30 mm. Largura do sensor variado entre 1 mm e 50 mm. Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 200 Hz.....	92
Figura 48: Variação da capacitância elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua espessura.....	94
Figura 49: Variação da resistência elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua espessura.....	95
Figura 50: Variação do módulo da reatância capacitiva do sensor de filme de PVDF em função de sua espessura e frequência.....	96
Figura 51: Variação do módulo da impedância elétrica do sensor de filme de PVDF em função de sua espessura e frequência.....	97
Figura 52: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 84 um, comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.....	98
Figura 53: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 9 um, comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.....	99

Figura 54: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 mm , comprimento de 30 mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Espessura variada entre 1um e 100 um. Faixa de frequência variada entre 1 Hz e 100 Hz.....	100
Figura 55: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 um e comprimento de 30 mm. Espessura do sensor variada entre 1 um e 100 mm. Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 1 Hz.....	101
Figura 56: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 um e comprimento de 30 mm. Espessura do sensor variada entre 1 um e 100 mm. Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 200 Hz.....	102
Figura 57: Curva de resposta em frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 32 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 1 MOhm.....	104
Figura 58: Curva de resposta em frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 100 MOhm.....	105
Figura 59: Curva de resposta em frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 um, comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 1 GOhm.....	105
Figura 60: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 mm , comprimento de 30 mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Espessura variada entre 1um e 100 um. Faixa de frequência variada entre 1 Hz e 200 Hz.....	106
Figura 61: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 um , comprimento de 30 mm e espessura de 28 um. Equipamento de medição com impedância de entrada variando entre 1 Mohm e 1 GOhm. Excitação mecânica com frequência de 1 Hz.....	107
Figura 62: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 um , comprimento de 30 mm e espessura de 28 um. Equipamento de medição com impedância de entrada variando entre 1 Mohm e 1 GOhm. Excitação mecânica com frequência de 200 Hz.....	108

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Propriedades de filmes de PVDF fabricados pela Measurement Specialties (1999)	26
Tabela 2: Lista de filmes de PVDF comerciais com respectivas dimensões geométricas, propriedades piezoelétricas e mecânicas. Gusarov et al, 2013.....	54
Tabela 3: Comparação de capacitância elétrica do filme de PVDF LDT1-028K obtido por diferentes formas.....	55
Tabela 4– Comparação de capacitância elétrica do filme de PVDF LDT1 obtido por diferentes formas.....	58

## Lista de Abreviaturas e Siglas

$A_{\text{BARRA}}$	Seção transversal da barra na direção longitudinal
$A_{\text{SENSOR}}$	Área transversal da barra
$C_0$	Velocidade de propagação da onda na barra
$C_E$	Rigidez mecânica do material à campo elétrico constante
$C_{\text{SENSOR}}, C_P$	Capacitância elétrica de saída do sensor piezoelétrico
$D$	Densidade de cargas
$d$	Distância entre o ponto médio do sensor e extremidade da barra onde o esforço é aplicado
$d_{i,j}$	Coefficiente piezoelétrico de carga elétrica
DMF	Dimetilformamida
$E$	Campo Elétrico
$e_{i,j}$	Coefficiente piezoelétrico
$f$	Frequência da onda de tensão mecânica
$F(t)$	Força externa aplicada
$g_{i,j}$	Coefficiente piezoelétrico de tensão elétrica
$h$	Espessura do filme
$h_{i,j}$	Coefficiente piezoelétrico
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
$L$	Comprimento do filme
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
$R_{\text{oscilloscope}}$	Resistência elétrica de entrada do equipamento de medição
$R_{\text{SENSOR}}, R_P$	Resistência elétrica de isolamento do sensor piezoelétrico
$S$	Deformação Mecânica
$s^D$	Flexibilidade mecânica do material à deslocamento elétrico constante
$s^E$	Flexibilidade mecânica do material a campo elétrico constante
$T$	Tensão Mecânica
$t$	Instante de tempo
$U$	Energia interna do material
$V$	Tensão Elétrica
$V_{\text{in}}$	Tensão Elétrica gerada por efeito piezoelétrico direto do sensor após solicitação mecânica
$V_{\text{out}}$	Tensão Elétrica coletada pelo equipamento de medição
$w$	Largura do filme
$x$	Distância entre a extremidade onde o esforço está sendo aplicado e a frente de onda
$Y$	Módulo de Elasticidade
$Z_C$	Reatância capacitiva do sensor
$Z_S$	Impedância elétrica de saída do sensor
$\beta^S$	Rigidez dielétrica do material à deformação mecânica constante
$\beta^T$	Rigidez dielétrica do material à tensão mecânica constante
$\epsilon$	Permissividade dielétrica do material
$\epsilon_0$	Permissividade dielétrica do vácuo
$\epsilon T$	Permissividade dielétrica do material à tensão mecânica constante
$\theta$	Ângulo de defasagem
$\rho$	Resistividade elétrica do material
$\sigma$	Entropia
$\Phi$	Temperatura
$\omega$	Frequência circular da onda

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivo geral.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Materiais piezoelétricos e piezoeletricidade.....	15
2.2 Polímeros.....	21
2.2.1 Piezoeletricidade dos Polímeros Semicristalinos.....	21
2.2.1.1 PVDF.....	22
Piezoeletricidade do PVDF em função de método de fabricação e processamento...	23
2.3 Propriedades e Aplicações do PVDF.....	26
2.4 Uso do PVDF como sensor piezoelétrico de tensões e deformações mecânicas.....	28
2.5 Resposta em frequência do sensor de PVDF.....	31
2.5.1 Frequência de corte inferior da curva de resposta em frequência do sensor de PVDF.....	32
2.5.2 Frequência de corte superior da curva de resposta em frequência do sensor de PVDF.....	36
3. METODOLOGIA.....	42
3.1 Modelo Elétrico do Sistema de Medição.....	42
3.1.1 Fonte de Tensão Elétrica.....	44
3.1.1.1 Modelo Físico.....	44
3.1.1.2 Comportamento piezoelétrico do sensor de PVDF.....	45
3.1.1.3 Tensão elétrica média em área gerada pelo sensor de PVDF.....	48
3.1.2 Elemento Capacitivo.....	50
3.1.2.1 Validação Experimental de Modelo de Capacitância.....	51
3.1.3 Elemento Resistivo.....	55
3.1.3.1 Verificação de Modelo de Resistência Elétrica de isolamento.....	56
3.1.4 Circuito Elétrico Alternado Equivalente.....	58
4 RESULTADOS.....	61
4.1 Efeito de frequência de excitação mecânica na impedância.....	61
4.2 Resposta em frequência para sensor de filme de PVDF.....	65
4.3 Estudo comparativo entre as curvas de resposta em frequência.....	67
4.4 Influência do comprimento do sensor na resposta em frequência.....	69
4.5 Influência da largura do sensor na resposta em frequência.....	83
4.6 Influência da espessura do sensor na resposta em frequência.....	92
4.7 Influência da impedância de entrada do equipamento de medição na resposta em frequência.....	102
5 CONCLUSÃO.....	108
6 BIBLIOGRAFIA.....	110
7 ANEXO.....	114
Código 1 – Avaliação da variação da impedância de saída do sensor de PVDF em função da Frequência.....	114
Código 2 – Avaliação da influência do Comprimento do sensor na impedância elétrica de saída do sensor e na resposta em frequência do sistema de medição.....	115
Código 3 - Avaliação da influência da largura do sensor na impedância elétrica de saída do sensor e na resposta em frequência do sistema de medição.....	117
Código 4 - Avaliação da influência da espessura do sensor na impedância elétrica de saída do sensor e na resposta em frequência do sistema de medição.....	118

Código 5 - Avaliação da influência da impedância de entrada do equipamento de medição na resposta em frequência do sistema de medição.....120

## 1. INTRODUÇÃO

Sensores piezoelétricos feitos a partir de filmes de PVDF são apontados como excelentes sensores para a medição de deformação mecânica periódicas. As propriedades que favorecem o uso deste material como sensor são várias. Pode-se citar a autoenergização do filme, gerada a partir de solicitações mecânicas atuantes no mesmo; a alta flexibilidade, que permite ao sensor adequar-se à geometria da estrutura sem exigir grandes esforços; a larga faixa de frequência de resposta, que permite que tal sensor capte excitações mecânicas em várias faixas de frequência; e resposta eletromecânica rápida, que permite que impulsos mecânicos sejam detectados e monitorados sem perda de informação.

Um fator adicional que favorece o uso de filmes de PVDF como sensores de deformação mecânica em estruturas é a possibilidade de adequação geométrica do sensor em função de demandas da aplicação. Esta possibilidade de adequação de geometria o torna versátil e é de fácil implementação, uma vez que fabricantes tem capacidade de fornecer filmes metalizados retangulares com diferentes espessuras, larguras e comprimentos que podem, posteriormente, ser cortados pelo próprio usuário para preparação dos próprios sensores (Measurement Specialties, 1999).

O problema que surge a partir da alteração da geometria do sensor de filme de PVDF é a conseqüente alteração de sua resposta piezoelétrica, tanto em frequência quanto em amplitude. O modelo teórico para o sensor piezoelétrico apresentado pela fabricante Measurement Specialties (1999), baseado no modelo de capacitor de placas planas, indica que a capacitância elétrica do filme, que está relacionada à resposta em frequência do sensor, está diretamente relacionada com a geometria escolhida para o mesmo. O trabalho experimental publicado por Xiang Yao (2014) indica que a variação dos parâmetros de comprimento e largura de um sensor com geometria retangular afeta também a resistência elétrica do sensor, o que altera sua resposta em frequência. No caso de sensoramento de ondas mecânicas periódicas propagantes na estrutura, artigos encontrados na literatura (Brown, 1990 e Kotian *et al* (2013)) mostram que a capacidade de detecção das ondas por este sensor estão relacionadas à relação entre o comprimento da onda e o comprimento do próprio sensor. Tal fator altera a resposta em frequência do sensor, afetando a largura de faixa de frequência utilizável do mesmo para detecção e medição de ondas de tensão mecânica periódicas a que uma estrutura é exposta.

Tal conjunto de resultados mostra uma influência ampla da geometria do filme na resposta em frequência do sensor. Uma melhor compreensão desta influência pode ser obtida a partir de simulação computacional desenvolvida a partir de modelos matemáticos baseados em sistemas físicos simplificados, que representam aplicações específicas em que o sensor pode ser utilizado.

A contribuição deste trabalho reside na proposição de uso de modelo matemático de sensor piezoelétrico, proposto por Karki (2001), para simulação de resposta de um sensor de PVDF à onda de tensão mecânica longitudinal unidimensional periódica em uma estrutura. Cada um dos parâmetros que compõe o modelo proposto por Karki (2001) é calculado a partir de relações físico-matemáticas apresentadas por pesquisadores (Kotian *et al*, 2013, Xiang Yao, (2014)) e fabricante do sensores (Measurement Specialties, (1999)), tabelas com valores empíricos de

propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas de materiais componentes do sistema e considerações teóricas relativas ao tipo de sollicitação mecânica que atuam no modelo teórico proposto. O uso de tal modelo permite avaliar a influência dos parâmetros geométricos do sensor na resposta em frequência do sistema de medição. Acredita-se que tais resultados possam ser utilizados para orientar a escolha de sensores com dimensões compatíveis com o espectro de frequências esperado da aplicação.

### **1.1 Objetivo geral**

Esta dissertação tem como objetivo principal avaliar a influência da geometria do sensor de filme de PVDF na resposta em frequência de um sistema de medição de ondas de tensão mecânicas propagante em estrutura composto por este mesmo sensor e um equipamento de medição de grandezas elétricas padrão (Osciloscópio).

### **1.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a influência da variação do comprimento do sensor na resposta em frequência do sistema, inspecionando os resultados simulados tanto na faixa de baixas frequências quanto de altas frequências
- Avaliar a influência da variação de largura do sensor na resposta em frequência do sistema, inspecionando os resultados simulados na faixa de baixas frequências
- Avaliar a influência da variação de espessura do sensor na resposta em frequência do sistema, inspecionando os resultados simulados na faixa de baixas frequências
- Avaliar a influência da variação de impedância de entrada do osciloscópio na resposta em frequência do sistema, inspecionando os resultados simulados na faixa de baixas frequências.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção está dividida em cinco partes: teoria física básica do fenômeno piezoelétrico, apresentação do fenômeno piezoelétrico do polímero PVDF a partir de sua composição química e estrutura semicristalina, indicação da aplicabilidade deste material em diferentes áreas, uso deste material como elemento sensor piezoelétrico para monitoramento de tensões e deformações mecânicas em estruturas e, por fim, revisão de literatura voltada para o uso de filmes de PVDF como sensores de ondas de tensão mecânica periódicas propagantes em estrutura.

A primeira seção tem como objetivo conceituar física e matematicamente materiais piezoelétricos, identificando as variáveis que definem seu estado e como as mesmas se inter-relacionam quando o material troca energia com o meio em que está inserido. Nesta seção são definidos os coeficientes piezoelétricos, que correlacionam as grandezas mecânicas (tensão e deformação) com as grandezas elétricas (campo elétrico e deslocamento elétrico) do material piezoelétrico. Tais parâmetros são fundamentais na aplicação de materiais piezoelétricos como elementos transdutores, tema ao qual este trabalho se volta ao longo do seu desenvolvimento.

A segunda seção liga os conceitos teóricos desenvolvidos ao longo da primeira seção com características do material polimérico que é parte constituinte do sensor a ser estudado nesta dissertação. É apresentada revisão bibliográfica que correlaciona qualitativamente as características físicas e químicas do polímero como composição química, estrutura cristalina e distribuição de fases com a propriedade piezoelétrica que o mesmo apresenta.

A terceira seção busca apresentar os campos de aplicação do polímero PVDF, segundo os próprios fabricantes. Tal seção busca indicar a relevância de tal material e do estudo do mesmo a partir da potencialidade de suas aplicações.

A quarta seção é voltada para a revisão bibliográfica de uso de sensores de PVDF como elementos detectores de deformações e tensões mecânicas em estruturas. O objetivo é indicar, através de histórico, a potencialidade de sensores de PVDF como elementos componentes de sistemas de monitoramento estrutural.

A quinta seção é voltada para o estudo da influência da geometria do sensor de PVDF na curva de resposta em frequência de sistemas de medição que utilizam o mesmo para monitorar ondas de tensão mecânica dinâmicas em estruturas. O mesmo é feito através de compilação de material teórico e experimental relevante ao tópico e que dá base para o desenvolvimento do tema desta dissertação: estudo da influência da geometria do sensor de PVDF em sua resposta em frequência a estímulos de ondas de tensão mecânica longitudinal propagante.

## 2.1 Materiais piezoelétricos e piezoeletricidade

Materiais piezoelétricos são materiais que apresentam geração de polarização elétrica após serem submetidos a esforços mecânicos (Harrison, Ounaies, 2001). Quando os mesmos são solicitados por um esforço mecânico externo, a sua estrutura é deformada e distribuição de cargas elétricas na mesma é afetada, gerando dipólos elétricos. Desta forma, há a indução de polarização elétrica na estrutura do próprio material. Isto é conhecido como *efeito direto* da piezoeletricidade (Gusarov, 2015). Quando o material piezoelétrico é submetido a um campo elétrico externo, as cargas elétricas existentes no interior de sua estrutura interagem entre si. Esta interação dá origem a uma força elétrica que gera deformação mecânica do material. Isto é conhecido como *efeito inverso* da piezoeletricidade.

O fenômeno da piezoeletricidade pode ser teoricamente explicado a partir de princípios da termodinâmica. O desenvolvimento das equações pode ser encontrado em diferentes fontes da literatura científica (IEEE, 1983; Thompson, 2002; Gusarov, 2015). Nesta revisão, tendo como objetivo uma contextualização do tema sem buscar grande aprofundamento teórico, optou-se pelo desenvolvimento encontrado no trabalho de Gusarov (2015).

Para obter as relações constitutivas de um material piezoelétrico genérico, parte-se da consideração de que este encontre-se termodinamicamente isolado, de forma que não consiga trocar energia em forma de calor ou trabalho com o ambiente externo. Nesta condição, a energia interna  $U$  do material piezoelétrico será definida pelas variáveis internas de tensão mecânica  $T$ , deformação mecânica  $S$ , campo

elétrico  $E$ , densidade de cargas  $D$ , entropia  $\sigma$  e temperatura  $\Phi$ . A variação da energia  $U$ , aqui designada como  $dU$ , pode ser expressa pela Equação (1).

$$dU = T \cdot dS + E \cdot dD + \Phi \cdot d\sigma \quad 1$$

Com a consideração de que toda transição de estados termodinâmicos ocorra de forma isentrópica, o parâmetro de variação de entropia  $d\sigma$  será nulo e a Equação (1) será simplificada, sendo representada agora pela Equação (2):

$$dU = T \cdot dS + E \cdot dD \quad 2$$

O significado físico da relação expressa pela Equação (2) é o de acoplamento entre as variáveis de estado mecânicas ( $T$  e  $S$ ) e elétricas ( $E$  e  $D$ ) em um material piezoelétrico. A variação de um conjunto de variáveis internas acarretará a variação correspondente das demais variáveis, de forma que o sistema mantenha o mesmo nível de energia interna. Tal correlação é a essência dos materiais piezoelétricos. A representação matemática deste acoplamento entre grandezas mecânicas e elétricas próprias do material piezoelétrico é feita a partir de equações matemáticas que correlacionam as variáveis internas através do produto das mesmas por coeficientes designados “coeficientes piezoelétricos”. Uma representação matemática que utiliza os coeficientes piezoelétricos para descrever o acoplamento entre tensões mecânicas, deformações mecânicas e campo elétrico é representada pela Equação (3).

$$T = c^E \cdot S - e \cdot E \quad 3$$

Em que  $c^E$  representa o coeficiente de rigidez do material (Campo elétrico constante),  $e$  representa coeficiente piezoelétrico do material,  $S$  representa a deformação mecânica apresentada pelo mesmo e  $E$  o campo elétrico ao qual o material está exposto.

O uso de materiais piezoelétricos como elementos sensores / atuadores requer que os mesmos interajam com o ambiente externo, o que representa nova

situação termodinâmica. Nesta nova situação, considera-se que o sistema termodinâmico analisado (o material piezoelétrico) consiga trocar energia em forma de trabalho ou calor com o ambiente que o cerca. A troca de energia do sistema com o ambiente externo gerará uma variação de energia interna do primeiro, que será manifestada através da variação acoplada das variáveis internas do material piezoelétrico. Esta variação de energia interna, dada pela Equação (2), pode ser representada com acoplamento das variáveis internas através da Equação (3) na equação anterior. Desta forma, o diferencial de energia interna do material piezoelétrico gerado pela interação com o ambiente externo será representado em função das variáveis relacionadas ao estado mecânico (S) e elétrico (E) do material, indicado pela Equação (4):

$$dU = (c^E \cdot S - e \cdot E) \cdot dS + E \cdot dD \quad 4$$

Se o diferencial de energia interna do sistema (Equação (4)) for integrado em função da variação do estado mecânico e elétrico do material, obtém-se a Equação (5), que representa a variação de energia interna do sistema em função da interação com o ambiente externo. Esta variação de energia interna será em função da variação de seu estado mecânico (primeiro termo), ligado à deformação mecânica apresentada pelo material, a variação de seu estado elétrico (segundo termo), ligado ao campo elétrico apresentado pelo material e a variação de um fator de acoplamento entre seu estado elétrico e seu estado mecânico, expresso pelo produto entre as variáveis de estado supracitadas e um coeficiente de acoplamento (terceiro termo).

$$\Delta U = \left( \frac{1}{2} \cdot c^E \cdot S^2 \right) + \left( \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot E^2 \right) - (e \cdot E \cdot S) \quad 5$$

Em que  $c^E$  representa o coeficiente de rigidez do material (Campo elétrico constante),  $e$  representa coeficiente piezoelétrico do material,  $\varepsilon$  representa o coeficiente dielétrico do material, S representa a variável de estado mecânico do

material avaliada (deformação mecânica) e  $E$  representa a variável de elétrico do material avaliada (campo elétrico).

Segundo Gusarov (2015), na situação termodinâmica proposta,, pode ser mostrado que a variação de energia interna do sistema, indicada pela Equação (5), corresponde à variação de máxima energia livre disponível dentro do sistema para realização de trabalho, *Energia Livre de Gibbs*, o que é representado pela Equação (6).

$$\Delta U = \Delta G = \left( \frac{1}{2} \cdot c^E \cdot S^2 \right) + \left( \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot E^2 \right) - (e \cdot E \cdot S) \quad 6$$

A derivação parcial da energia livre de Gibbs, expressa pela Equação (6), em função de cada variável interna ( $T$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $D$ ) do material piezoelétrico fornecerá um conjunto de equações matemáticas que correlacionam as variáveis entre si através de coeficientes piezoelétricos.

Para o caso de campo elétrico ( $E$ ) e deformação mecânica ( $S$ ) constantes, a Tensão Mecânica ( $T$ ) e Densidade de Cargas ( $D$ ) apresentada pelo material piezoelétrico serão correlacionadas pelas Equações (7) e (8):

$$T = \frac{\partial \nabla G}{\partial S} (E \text{ constante}) \quad 7$$

$$D = \frac{\partial \nabla G}{\partial E} (S \text{ constante}) \quad 8$$

cuja condução das derivações parciais resultam nas relações de acoplamento indicadas pelas Equações (9) e (10):

$$T = c^E \cdot S - e \cdot E \quad 9$$

$$D = e \cdot S + \varepsilon^S \cdot E \quad 10$$

Para o caso de densidade de cargas ( $D$ ) e Tensão Mecânica ( $T$ ) constantes, a Deformação mecânica ( $S$ ) e Campo Elétrico ( $E$ ) apresentada pelo material piezoelétrico serão correlacionadas pelas Equações (11) e (12):

$$S = \frac{\partial \nabla G}{\partial T} (D \text{ constante}) \quad 11$$

$$E = \frac{\partial \nabla G}{\partial D} (T \text{ constante}) \quad 12$$

cuja condução das derivações parciais resultam nas relações de acoplamento indicadas pelas Equações (13) e (14):

$$S = s^D \cdot T + g \cdot D \quad 13$$

$$E = -g \cdot T + \beta^T \cdot D \quad 14$$

Para o caso de campo elétrico ( $E$ ) e Tensão Mecânica ( $T$ ) constantes, a Deformação mecânica ( $S$ ) e Densidade de Cargas ( $D$ ) apresentada pelo material piezoelétrico serão correlacionadas pelas Equações (15) e (16):

$$S = \frac{\partial \nabla G}{\partial T} (E \text{ constante}) \quad 15$$

$$D = \frac{\partial \nabla G}{\partial E} (T \text{ constante}) \quad 16$$

cuja condução das derivações parciais resultam nas relações de acoplamento indicadas pelas Equações (17) e (18):

$$S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad 17$$

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E \quad 18$$

Para o caso de Densidade de Cargas ( $D$ ) e Deformação mecânica ( $S$ ) constantes, a Tensão Mecânica ( $T$ ) e campo elétrico ( $E$ ) apresentados pelo material piezoelétrico serão correlacionadas pelas Equações (15) e (16):

$$T = \frac{\partial \nabla G}{\partial S} (D \text{ constante}) \quad 19$$

$$E = \frac{\partial \nabla G}{\partial D} (S \text{ constante}) \quad 20$$

cuja condução das derivações parciais resultam nas relações de acoplamento indicadas pelas Equações (21) e (22):

$$T = c^D \cdot S - h \cdot D \quad 21$$

$$E = -h \cdot S + \beta^S \cdot D \quad 22$$

O quadro esquemático encontrado no trabalho de Gusarov ilustra bem a correlação entre as variáveis internas do material piezoelétrico ( $T$ ,  $S$ ,  $E$ ,  $D$ ) e as propriedades mecânicas ( $c$  e  $s$ ), elétricas ( $\beta$ ,  $\epsilon$ ) e constantes piezoelétricas de acoplamento ( $h$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $g$ ) do material piezoelétrico.

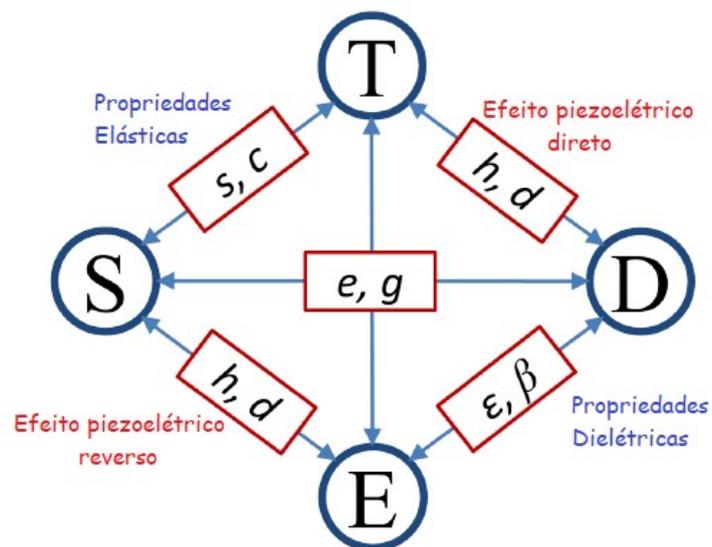


Figura 1: Quadro esquemático de correlação de variáveis de estado através de coeficientes elásticos, dielétricos e piezoelétricos. Adaptado de Gusarov (2015)

## 2.2 Polímeros

Polímeros são macromoléculas compostas por muitas (dezenas de milhares) unidades de repetição denominadas *monômeros*, ligadas por ligação covalente (CANEVAROLO, 2002). A composição química dos mesmos, o número de diferentes monômeros inseridos na cadeia polimérica, o grau de polimerização, a estrutura do polímero, sua morfologia e outros fatores afetam as propriedades físicas de um polímero, o que fundamenta a existência de grande número de materiais com diferentes propriedades dentro desta classe de materiais.

Considerando a classificação dos polímeros quanto a seus monômeros constituintes, dá-se o nome de *homopolímero* aos polímeros cuja cadeia principal é formada por um único monômero. Quando a cadeia principal dos mesmos é formada por dois monômeros, o polímero é chamado de *copolímero*.

Quanto a sua morfologia, os termos *cristalino* e *amorfo* são utilizados para designar polímeros com estrutura ordenada e desordenada, respectivamente. Dentro desta classificação de materiais quanto à estrutura, existe um grande espectro de distribuição. Existem polímeros completamente amorfos, polímeros que possuem parte de sua estrutura ordenada e outra parte desordenada, sendo designados *semicristalinos* e poucos completamente cristalinos, com sua estrutura completamente ordenada (O dian, 2004).

### 2.2.1 Piezoelectricidade dos Polímeros Semicristalinos

A morfologia de polímeros semicristalinos é composta por “cristalitos” dispersos em uma matriz amorfa. Podem existir diferentes fases cristalinas distribuídas pelo material, sendo que algumas delas possuem polaridade elétrica. Conforme Broadhurst e Davis (1987 *apud* Harrisson e Ounaies, 2001), os fatores que fundamentam a piezoelectricidade nos polímeros são os seguintes: (1) Presença de dipólos moleculares permanentes; (2) A possibilidade de alinhar ou orientar os dipólos moleculares; (3) A possibilidade de sustentar o alinhamento destes dipólos uma vez que os mesmos são solicitados e (4) a propriedade do material suportar altas deformações quando solicitado mecanicamente.

Considerando os polímeros do tipo semicristalino, o mecanismo que fundamenta a piezoelectricidade das fases cristalinas é a polaridade das mesmas. A porcentagem das fases cristalinas polares na estrutura e o alinhamento das mesmas em uma direção comum geram variações de propriedades piezoelétricas no material. Assim, processos que afetam estas características alteram diretamente o comportamento piezoelétrico do material. Pesquisas focadas no tratamento de polímeros para aumento de sua piezoelectricidade mostraram que alinhamento mecânico, tratamento térmico e polarização por altas tensões elétricas são efetivos para acentuar efeitos piezoelétricos dos polímeros semicristalinos em direções específicas.

### 2.2.1.1 PVDF

O PVDF é um polímero termoplástico sintético obtido por polimerização de adição do monômero fluoreto de vinilideno ( $\text{CH}_2 = \text{CF}_2$ ) (Barboza, 2015). As ligações químicas que ocorrem entre os átomos de carbono e flúor no monômero base do PVDF influenciam diretamente as propriedades mecânicas, a estabilidade química e térmica do material (Leão, 2018). Este polímero apresenta atividades piroelétricas, ferroelétricas e excelentes propriedades mecânicas como elevada resistência química, boa estabilidade térmica e processabilidade. A porcentagem de fases cristalinas na morfologia do PVDF varia entre 35% e 70%, de acordo com o histórico térmico e de processamento.

Conforme indicado por Leão (2018), o PVDF apresenta polimorfismo. É possível encontrar, em sua parte cristalina, cinco fases cristalinas distintas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $\epsilon$ ) relacionadas a diferentes conformações de cadeias projetadas: zigue zague planar trans (TTT) para a fase  $\beta$ , TGTG' (trans-gauche-trans-gauche) para as fases  $\alpha$  e  $\delta$  e T<sub>3</sub>GT<sub>3</sub>G' para as fases  $\gamma$  e  $\epsilon$ . A Figura (2) apresenta as fases,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , mais estudadas e utilizadas em diferentes aplicações:

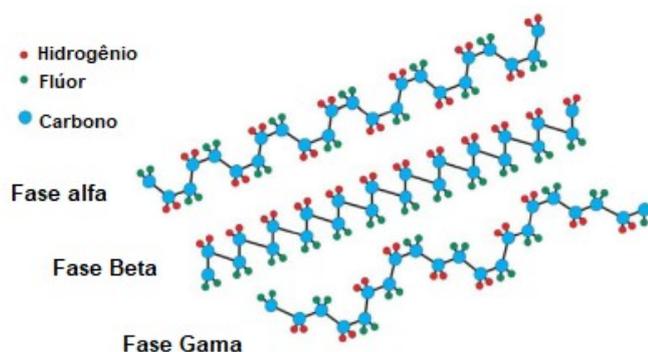


Figura 2: Representação esquemática da conformação de cadeia para as fases alfa, beta e gama do PVDF. Adaptado de Gusarov, 2015

### **Piezoelasticidade do PVDF em função de método de fabricação e processamento**

O PVDF pode apresentar diferentes fases cristalinas de acordo com o modo de fabricação a partir do qual é obtido e processamento a que é submetido posteriormente. Esta mudança entre fases cristalinas ocorre a partir do princípio de mudança de estrutura dos materiais a partir da aplicação de energia mecânica, energia elétrica e energia térmica suficientes.

Kawaii (1963 *apud* Harrison e Ounaies, 2001) mostrou que o PVDF, após ter sido submetido a processo elétrico de polarização, exibiu constantes piezoelétricas de 6 a 7 pC/N, valor dez vezes maior do que previamente encontrados em outros polímeros. As propriedades piezoelétricas do PVDF estão diretamente relacionadas ao intenso momento dipolar existente em seu monômero ( $8 \cdot 10^{-30} \text{C} \cdot \text{m}$ ), o que é devido à eletronegatividade de átomos de flúor quando comparados com os átomos de carbono e hidrogênio. Quando polimerizado, este monômero dá origem a cadeias poliméricas cuja configuração geométrica pode acentuar ou anular o momento dipolar total do polímero. Se as cadeias poliméricas associarem-se de forma antiparalela em estruturas cristalinas (caso das fases apolares  $\alpha$  e  $\epsilon$ ), o momento dipolar total será nulo. Se associarem-se de forma paralela em estruturas cristalinas (caso das fases polares  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ ), o momento dipolar total será não nulo.

Trabalho de Sencadas *et al* (2009) exemplifica uma forma de obtenção de filmes de PVDF com fase cristalina  $\alpha$  predominante. A partir de dissolução do PVDF em Dimetilformamida (DMF), aquecimento controlado da solução em forno (aquecimento a 120 °C por 60 minutos seguido por fusão do material à 220 °C por 10 minutos) e resfriamento do PVDF em temperatura ambiente, obteve-se filmes de PVDF com fase  $\alpha$  predominante e espessura de 30  $\mu\text{m}$ . Segundo LEÃO (2018), PVDF com fase cristalina  $\alpha$  pode ser obtido a partir da fusão do material a temperaturas inferiores à 160°C. Esta fase é considerada a mais estável, é formada nos processos convencionais de fabricação de PVDF e apresenta características apolares.

A transformação da fase cristalina  $\alpha$  do PVDF em fase cristalina  $\beta$  é visada para aplicações em sensoramento. Esta busca por PVDF com predominância da fase cristalina  $\beta$  justifica-se pela maior intensidade de momento dipolar por célula entre todas as cinco fases cristalinas, o que a torna a mais interessante para aplicações na área de piezo e piroeletricidade. Trabalho de Mohhamadi *et al* (2007) associa maior filmes de PVDF com maior fração relativa de fase cristalina  $\beta$  com maiores coeficientes piezoelétricos de carga elétrica ( $d_{33}$ ).

A transformação da fase cristalina  $\alpha$  do PVDF em fase cristalina  $\beta$  pode ser obtida de diferentes formas. Trabalho de Sencadas *et al* (2009) mostrou que a *deformação mecânica controlada de filmes de PVDF* ( razão R de alongamento entre 1 e 5 ) a *temperaturas controladas* ( entre 80° C e 140 ° C ) induz a transformação de parte da fase cristalina  $\alpha$  em fase  $\beta$  em filmes de PVDF. Neste mesmo trabalho, os pesquisadores mostraram que a *polarização a alta tensão elétrica* do filme de PVDF aumenta a porcentagem relativa de fase cristalina  $\beta$  no filme, contribuindo ainda com um alinhamento direcional das fases cristalinas. Trabalho de Branciforti *et al* ( 2007 ) mostrou que o *recozimento de filme de PVDF a baixas temperaturas* ( 60° C ) também gera a transformação de parte da fase cristalina  $\alpha$  do polímero em fase  $\beta$ . Outro método que pode ser utilizado para gerar filmes de PVDF com alta fração relativa de fase  $\beta$  é um processo de fabricação especial denominado *eletrospinning*. Revisão de literatura apresentada por He *et al* (2021) mostra que é possível obter filmes de PVDF com 64% de fase cristalina e 85% de fração relativa de fase cristalina do tipo  $\beta$ .

Uma vez que tenha sido submetido a esta transformação, o PVDF apresenta piezoelectricidade estável à temperatura ambiente. Entretanto, caso seja submetido a temperaturas mais altas, seu efeito piezoelétrico é progressivamente degradado até tornar-se nulo.

Também é possível induzir a transformação da fase cristalina  $\alpha$  do PVDF nas fases cristalinas  $\gamma$  e  $\delta$ . Quando a cristalização ocorre a altas temperaturas (acima de  $165^\circ\text{C}$ ) e durante um longo período (acima de 15 horas), a fase apolar  $\alpha$  é transformada em fase polar  $\gamma$ . Quando material com fase  $\alpha$  em sua estrutura é submetido a polarização por alta tensão elétrica, ela é transformada na fase polar  $\delta$  (Leão, 2018).

Um diagrama esquemático da transformação entre fases  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  a partir de diferentes processamentos do PVDF pode ser visto na Figura (3):

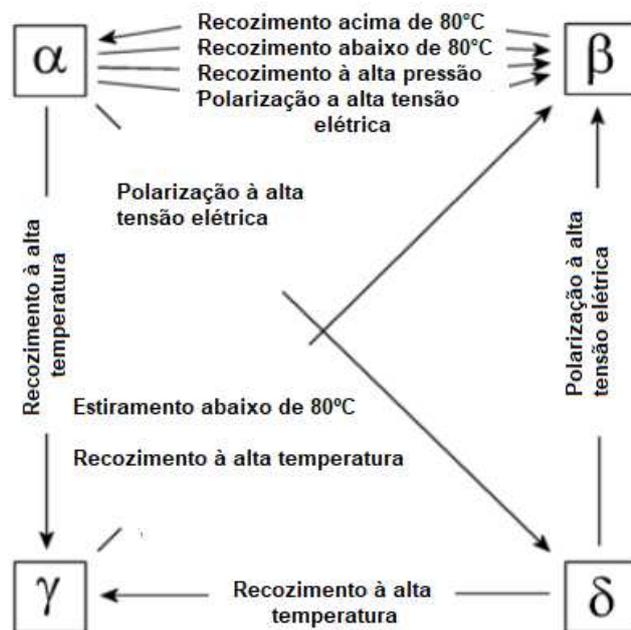


Figura 3: Transformação de fases cristalinas principais do PVDF. Fonte: Menezes, 2017

### 2.3 Propriedades e Aplicações do PVDF

O PVDF é um material que apresenta uma combinação única de características e propriedades. Segundo a fabricante Piezotech, as características deste polímero que mais destacam-se são flexibilidade, alta resistência mecânica, estabilidade dimensional, inércia química, estabilidade térmica dos coeficientes piezoelétricos do material até a temperatura de 90°C e possibilidade de fabricação de filmes com grande variação de espessura (9 um a 1 mm). Harrison e Ounaies (2001) destacam ainda outras características, como valor de seus coeficientes piezoelétricos quando expostos à tensão mecânica, baixo peso e baixas impedâncias acústica e mecânica.

Valores das propriedades mecânicas, elétricas, piezoelétricas, piroelétricas e limites de operação de filmes finos de PVDF fabricados pela Measurement Specialities (1999) seguem na Tabela (1):

Tabela 1: Propriedades de filmes de PVDF fabricados pela Measurement Specialities (1999)

Símbolo	Parâmetro	PVDF	Unidade
t	Espessura	9,28,52,110	μm
d <sub>31</sub>	Coeficiente Piezoelétrico de deformação mecânica	23	10 <sup>-12</sup> $\frac{m/m}{V/m}$
d <sub>33</sub>		-33	10 <sup>-12</sup> $\frac{m/m}{V/m}$
g <sub>31</sub>	Coeficiente Piezoelétrico de tensão mecânica	216	10 <sup>-3</sup> $\frac{V/m}{N/m^2}$
g <sub>33</sub>		330	10 <sup>-3</sup> $\frac{V/m}{N/m^2}$
k <sub>31</sub>	Fator de acoplamento eletromecânico	12%	-
k <sub>i</sub>		14%	-
C	Capacitância elétrica	380 para 28um	pF/cm <sup>2</sup> 1 kHz
Y	Módulo de Young	2-4	10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
V <sub>0</sub>	Velocidade do som	Ao longo do Comprimento	1,5
		Ao longo do espessura	2,2
p	Coeficiente piroelétrico	30	10 <sup>-6</sup> C /m <sup>2</sup> °K
ε	Permissividade	106-113	10 <sup>-12</sup> F/m
ε/ε <sub>0</sub>	Permissividade relativa	12-13	-
ρ <sub>m</sub>	Densidade mássica	1,78	10 <sup>3</sup> kg/m
ρ <sub>e</sub>	Resistividade Volumétrica	>10 <sup>13</sup>	Ohm metro
R <sub>Ω</sub>	Resistividade de Metalização da Superfície	3	Ohms/quadrado para NiAl
		0,1	Ohms/quadrado para Tinta de preta

<b>Símbolo</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>PVDF</b>	<b>Unidade</b>
Tan $\delta_e$	Tangente de Perda	0,2	-
	Limite de Escoamento	45-55	$10^6$ N/m <sup>2</sup>
	Temperatura de utilização	-40 - 80	° C
	Absorção de água	< 0,02	% H <sub>2</sub> O
	Máxima tensão elétrica de Operação	750 (30)	V / $\mu$ m, Tensão Contínua, 25°C
	Tensão elétrica de ruptura	2000 (80)	V / $\mu$ m, Tensão Contínua, 25°C

Fonte: Measurement Specialties (1999)

Tal conjunto de propriedades torna este material muito interessante como transdutor em várias aplicações, em casos em que cerâmicas e cristais piezoelétricos não tem desempenho adequado. A Piezotech, outra fabricante de filmes de PVDF, lista diversas aplicações deste material. Os mesmos podem ser utilizados em componentes acústicos como microfones, sonares e hidrofones, componentes elétricos como chaves e pequenos ventiladores, equipamentos para instrumentação médica como catéter, sensores de pressão e pele artificialmente sensível em robótica e detectores de vibrações, impactos e pressão em superfícies na área de monitoramento estrutural.

## **2.4 Uso do PVDF como sensor piezoelétrico de tensões e deformações mecânicas**

Dentro da gama de aplicações citadas na seção anterior, uma área de especial relevância para a engenharia mecânica é a área de sensoriamento de tensões e deformações em monitoramento estrutural. Para esta aplicação, o uso de filmes finos de PVDF tem grande destaque. Conforme indicado pela fabricante Measurement Specialties (1999), a sensibilidade de filmes de PVDF a excitações mecânicas é elevada. O filme de PVDF comporta-se como um strain gauge dinâmico que não necessita de alimentação elétrica externa e cujo sinal piezoelétrico gerado como resposta a uma excitação mecânica é maior do que o de strain gauges de lâmina após amplificação.

Diversos artigos e trabalhos acadêmicos foram feitos com intenção de investigar o potencial de uso de filmes de PVDF como sensores de deformação mecânica em estruturas. Nesta área, Zhang *et al* (1993) conduziram investigações no uso de filmes de PVDF comerciais como elementos sensores de deformações flutuantes em uma estrutura e como elemento de monitoramento de crescimento de trinca na mesma. Através do uso de circuito de condicionamento de sinal específico, os autores conseguiram resultados experimentais que demonstravam a correlação linear entre a deformação sofrida pela estrutura e o sinal elétrico indicado pelo circuito de condicionamento de sinal. Desta forma, deram indícios da possibilidade de uso deste tipo de sensor como elemento de indicação de deformações flutuantes em estruturas e componentes mecânicos.

Em 2000, Sihori e Chopra avaliaram experimentalmente a possibilidade de uso de filmes finos de PVDF como elementos sensores de vibrações mecânicas em uma viga. A partir da comparação de resultados experimentais com strain gauges de lâminas, foi mostrado uma boa correlação existente entre frequências harmônicas de vibração teóricas da viga, experimentos de referência usando strain gauges de lâminas e experimentos com os próprios filmes de PVDF.

Em 2004, Matsumoto *et al* mostraram a possibilidade de utilização de filmes finos de PVDF não revestidos como elementos sensores de deformação superficial. Utilizando eletrômetro sem contato, os autores conseguiram avaliar a concentração

de deformações nas proximidades de defeitos induzidos em uma placa de alumínio uniaxialmente solicitada através do levantamento de variações de tensões elétricas locais apresentadas pelo filme de PVDF ao longo de sua área. Em 2005, GU *et al* utilizaram filmes finos de PVDF como elementos sensores de um sistema de monitoramento *wireless* para monitorar a saúde estrutural de uma ponte. Através de uso de circuitos de condicionamento de sinal, microcontrolador e sistema de recepção/transmissão *wireless*, os autores mostraram a capacidade de uso deste sensor para detecção de solicitações dinâmicas de uma estrutura e transmissão para uma central de dados. Em 2012, MA *et al* apresentaram o projeto de rosetas feitas com filmes finos de PVDF para separação das componentes de deformação presentes em uma estrutura mecânica solicitada por esforços de flexão, compressão e torção dinâmicos. A condução de experimentos para validação do projeto de tais rosetas feitas com este material piezoelétrico mostrou que o sinal coletado pelas mesmas apresentou boa correlação de sinal quando confrontado com sinais de referência coletados por strain gauges de lâminas metálicas. Em 2019, Fotouhi *et al* buscaram validar o uso de filmes de PVDF como sensores de deformação dinâmica confiáveis.

Nos ensaios experimentais, utilizou-se uma máquina de tração uniaxial para induzir esforços de tração/compressão cíclica (1 Hz) em uma barra metálica monitorada por um sensor de filme de PVDF e um strain gauge de filme metálico. A montagem experimental pode ser vista na Figura 4.



Figura 4: Montagem experimental para medição de deformação cíclica de barra metálica por sensor de PVDF. Fonte: Fotouhi ( 2019 )

A partir de tal experimento, os autores obtiveram dados que indicaram boa correlação direta entre deformação mecânica periódica medida por sensores de filme de PVDF e strain gauges de lâminas metálicas.

Dentro do contexto de uso de filmes de PVDF como elementos sensores de deformação em estruturas, uma sub-área que merece atenção é a voltada ao uso dos mesmos para detecção e monitoramento de ondas de tensão/deformação que se propagam espacialmente na estrutura ou componente mecânico ao longo do tempo. A nível teórico, o estudo da propagação de ondas mecânicas em estruturas e componentes mecânicos é feito com base em modelos de propagação de ondas elásticas em sólidos. A decorrente análise de tensões/deformações em uma estrutura a partir da física de ondas faz-se relevante, segundo Achenbach (1975), em casos em que o tempo de atuação das cargas na estrutura / componente mecânico é similar ao tempo total de propagação da onda no mesmo. Este é o caso de cargas geradas por impacto na estrutura, onde o tempo de atuação da força dinâmica é muito curto e uso de teoria de ondas elásticas na estrutura pode ser utilizada para melhor entendimento físico do fenômeno. Tal estudo também tem relevância, segundo o mesmo autor, em casos de forças externas sustentadas onde a frequência de repetição é relativamente alta.

## 2.5 Resposta em frequência do sensor de PVDF

Do ponto de vista de sensoramento, é importante avaliar a curva de resposta em frequência do sensor, identificando a faixa de frequências dentro da qual o sensor responde satisfatoriamente ao sinal de entrada. Esta faixa de frequências específica é denominada *faixa de passagem* ou *largura de banda* (Ferreira, 2006). Dentro da *faixa de passagem*, pode existir uma região de resposta plana, em que a razão entre as amplitudes de saída e de entrada é constante, independentemente da frequência do sinal de entrada. Na Figura 5, é possível visualizar a resposta em frequência de um sistema dinâmico, em que a *faixa de passagem* é estabelecida como a região localizada entre os limiares de frequência  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$ , em que a atenuação da resposta é inferior a 3dB em relação ao valor de resposta máximo, com módulo de amplitude  $|A|$ .

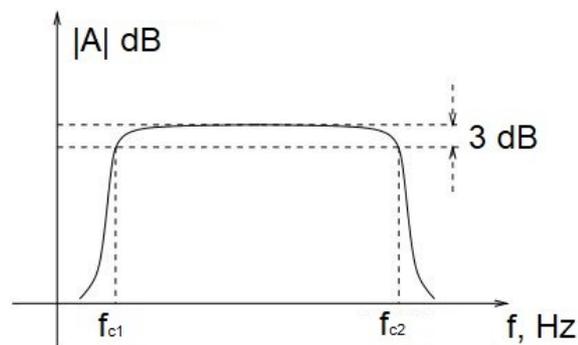


Figura 5: Curva de resposta em frequência de sistema dinâmico, com faixa de passagem entre as frequências de corte  $f_{c1}$  e  $f_{c2}$ . Adaptado de Ferreira (2006)

O uso do sensor de PVDF como elemento de detecção de ondas de tensão mecânica propagantes, portanto, deve vir acompanhado do estudo da resposta em frequência do mesmo. Revisão de literatura (Measurement Specialties (1999), Kotian (2013)) indica que a resposta em frequência do sensor de PVDF está relacionada com suas propriedades elétricas, com a interação elétrica que o mesmo estabelece com o equipamento de medição e com a interação piezoelétrica que este sensor estabelece com a estrutura a qual está acoplado mecanicamente.

### 2.5.1 Frequência de corte inferior da curva de resposta em frequência do sensor de PVDF

As propriedades elétricas do sensor influenciam a resposta em frequência do mesmo através do parâmetro elétrico conhecido como impedância elétrica de saída. Dependendo da amplitude de tal parâmetro e de seu valor frente a impedância elétrica de entrada do equipamento de medição, pode ocorrer a atenuação da amplitude do sinal elétrico transferido ao equipamento de medição, afetando o desempenho do próprio sistema de medição. No caso de sensores piezoelétricos, a impedância elétrica é frequentemente modelada a partir dos parâmetros de capacitância e resistência de isolamento do sensor. Trabalho de Karki (2001) apresenta estes parâmetros em modelo matemático e os associa conforme apresentado na Figura (6).

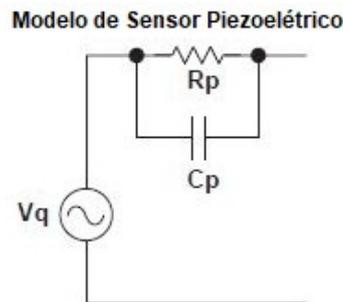


Figura 6: Modelo de sensor piezoelétrico.  
Adaptado de Karki (2000)

Esta impedância elétrica de saída do sensor, representada a partir da relação elétrica paralela entre a reatância capacitiva  $C_p$  e a resistência elétrica de isolamento  $R_p$  do sensor, é relacionada por alguns trabalhos técnicos (Measurement Specialties (1999), Xiang Yao (2016)) com a geometria do sensor de PVDF. Em manual técnico da Measurement Specialties (1999), o modelo equivalente utilizado para descrever a capacitância elétrica do sensor de PVDF é o modelo de capacitor de placas planas. Em trabalho publicado em 2016, Xiang Yao afirma que a aplicação de filmes de PVDF como elementos sensores/atuadores piezoelétricos requer a consideração prática de como a geometria afeta seus parâmetros elétricos. A consideração da influência da geometria do filme em seus parâmetros elétricos foi

feita por este autor a partir do modelamento da resistência elétrica e impedância capacitivo resistiva de filmes finos de PVDF a partir da 2ª Lei de Ohm. Conduzindo medições de impedância elétrica na direção longitudinal destes filmes em função da frequência, da largura do filme e da distância normal entre os eletrodos, este autor observou resultados que apontam a significativa influência da geometria do filme em sua própria impedância elétrica de saída. Dentre seus resultados, observou-se que a impedância elétrica de saída do filme de PVDF tem relação direta com a distância de separação entre os eletrodos (L) e relação inversa com a largura dos filmes (W), conforme pode ser visto nas Figuras (7) e (8).

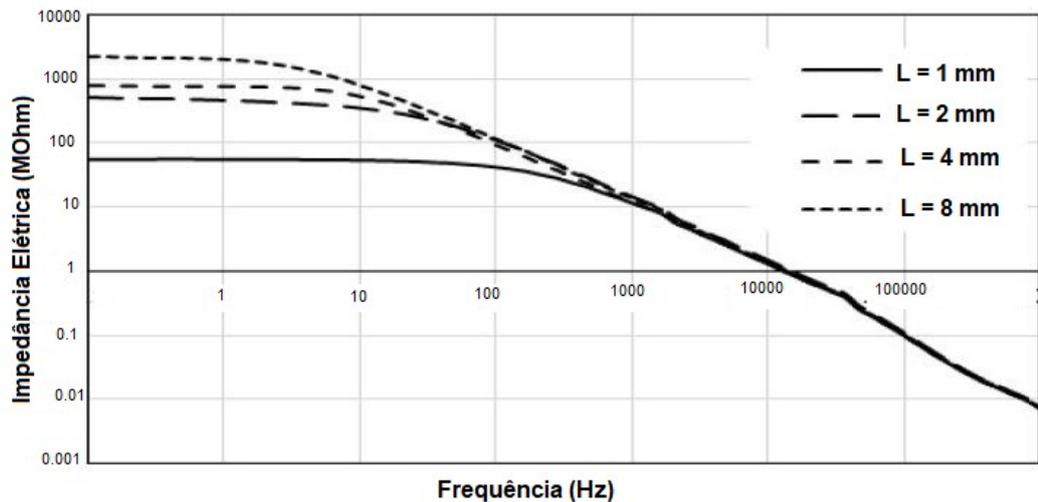


Figura 7: Amplitude de impedância elétrica de filmes de PVDF com largura de 10 mm, distância entre eletrodos de 1 mm, 2 mm, 4mm e 8 mm e frequência entre (10<sup>-1</sup> e 10<sup>6</sup> Hz ).  
Fonte: Adaptado de Xiang Yao (2016)

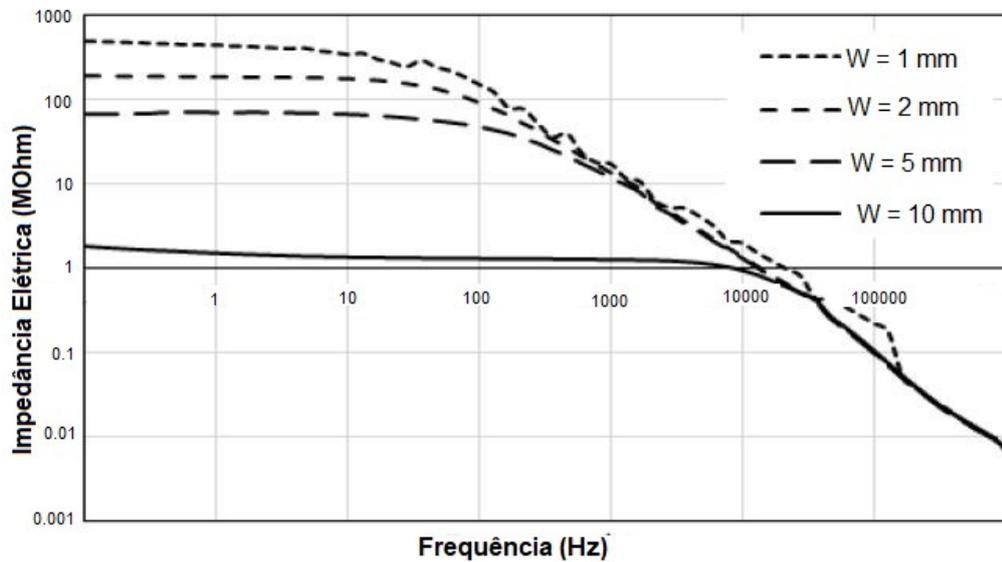


Figura 8: Amplitude de impedância elétrica de filmes de PVDF com distância entre eletrodos de 1 mm, largura de 1 mm, 2 mm, 4mm e 8 mm e frequência entre ( $10^{-1}$  e  $10^6$  Hz ). Adaptado de Xiang Yao (2016)

Trabalhos técnicos (Measurement Specialties (1999), Karki (2001), Kester *et al* (2005) ) apontam a relevância de atentar-se para a amplitude da impedância elétrica de saída de sensores piezoelétricos, pois a mesma pode gerar atenuação ao longo do escopo de frequência que o sensor será utilizado. Neste sentido, publicação da Measurement Specialties (1999) destaca que, quando tal sensor é utilizado em conjunto com um equipamento de medição de grandezas elétricas (osciloscópio) em medições de deformações e tensões mecânicas com características dinâmicas, o sistema de medição coleta um sinal elétrico com filtragem do tipo “passa-altas”. O perfil em frequência do sinal elétrico coletado após este tipo de filtragem segue na Figura (9).

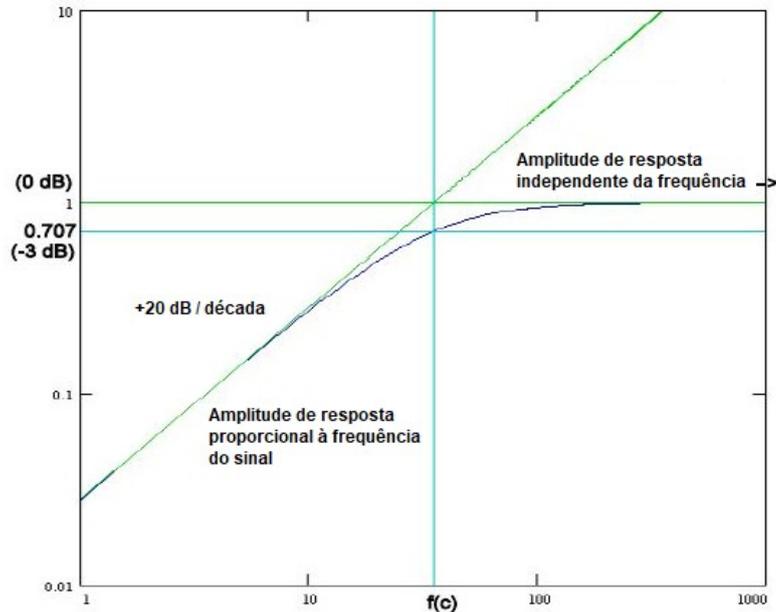


Figura 9: Resposta em frequência de sistema com comportamento "passa altas". Escalas log-log. Adaptado de Measurement Specialties (1999)

Em tal figura, é possível distinguir três regiões de acordo com o perfil de resposta. A primeira região é caracterizada por uma amplitude de resposta proporcional à frequência do sinal. A região consecutiva é caracterizada por um perfil de amplitude de resposta em frequência assintótico, em que a mesma deixa de ser proporcional à frequência do sinal e tende, ao longo do incremento desta variável, tornar-se constante. A terceira região é caracterizada por uma completa independência entre a amplitude de resposta do sistema e a frequência do sinal. De forma a representar este comportamento de filtragem de forma mais simplificada, tal trabalho faz a aproximação desta curva de resposta em frequência a partir de duas retas. A primeira reta é paralela à primeira região da curva de resposta em frequência, tendo uma inclinação de +20dB/década. A segunda reta é paralela à terceira região da curva de resposta em frequência, sendo horizontal. O ponto de intercessão das duas retas, tem como valor, no eixo das abscissas, o parâmetro denominado frequência de corte ( $f(c)$ ). O mesmo é utilizado como referência para identificar a transição entre as duas regiões da curva de resposta em frequência. Se este valor de frequência for utilizado na curva de resposta em frequência original, a ele estará associada a amplitude de resposta de 0,707 (-3dB).

A atenuação de sinal apresentada em baixas frequências, apresentada para frequências com valores abaixo do parâmetro de frequência de corte pode comprometer a qualidade da medição caso não tenha seu impacto considerado no resultado final.

### **2.5.2 Frequência de corte superior da curva de resposta em frequência do sensor de PVDF**

A interação piezoelétrica que este sensor estabelece com ondas de tensão mecânica que se propagam na estrutura a qual está o mesmo está acoplado mecanicamente afetam sua resposta em altas frequências. Tal região de frequência é relevante para estudos de impactos e esforços mecânicos cíclicos. Com foco neste área de aplicação, foram encontrados alguns trabalhos publicados na literatura que buscam modelar a resposta de filmes finos de PVDF (elementos sensores piezoelétricos) a ondas longitudinais elásticas de tensão/deformação propagantes na estrutura com amplo espectro de frequências. Em 1990, Brown publicou artigo sugerindo que a resposta em alta frequência do sensor de deformação planar piezoelétrico (PVDF) a ondas mecânicas propagantes pode ser obtida de forma relativamente simples a partir da inspeção da geometria de superfície dos próprios elementos. Para tanto, o autor usa ferramentas de teoria dos sinais para gerar qualitativamente a forma genérica de resposta dos filmes piezoelétricos a estímulos mecânicos a partir de sua geometria. Ao longo deste artigo, o autor discute uma típica curva de resposta em frequência de um filme piezoelétrico de PVDF (apresentada na Figura (10)) a uma solicitação mecânica com natureza ondulatória atuando em uma estrutura. Em tal curva de resposta em frequência, o autor destaca duas regiões específicas: 1<sup>a</sup>) Região localizada no limite inferior da faixa de frequências, cujo comportamento apresentado pelo filme de PVDF pode, segundo o autor, ser adequadamente descrito por um modelo de circuito elétrico RC série, em que a capacitância elétrica (C) refere-se à própria capacitância do sensor e a resistência elétrica (R) corresponde à resistência elétrica do equipamento de medição; 2<sup>a</sup>) Região localizada no limite superior de faixas de frequência, cujo perfil de atenuação pode ser explicado, segundo o próprio autor, por consequência direta

da aplicação da Transformada de Fourier a geometrias do sensor. Para a geometria retangular, a resposta em frequência prevista terá um perfil  $\text{sinc}(x)$  com lóbulo principal centrado em zero e respostas nulas posteriores igualmente espaçadas.

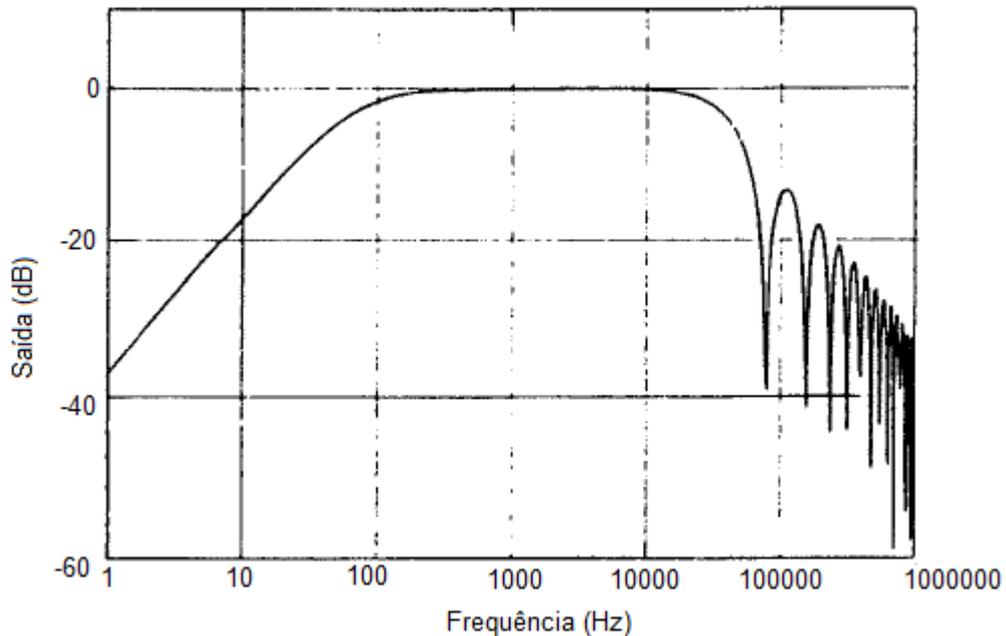


Figura 10: Típica curva de resposta em frequência de filme de elemento piezoelétrico. Adaptado de Brown (1990)

Dando continuidade à discussão da influência da geometria do sensor em sua resposta em frequência, Brown(1990) conduziu experimentos de teste de impacto em uma barra circular de bronze cuja deformação foi monitorada a partir de resposta em frequência de sistema de medição constituído por dois sensores feitos a partir de filmes de PVDF com geometrias diferentes. Ambos tinham mesma largura (6 mm), entretanto diferenciavam-se em relação ao comprimento: o primeiro sensor apresentava 50 mm de comprimento (A) enquanto o segundo apresentava 350 mm (B). Para tais sensores, as curvas de resposta em frequência da barra de bronze submetida a teste de impacto e monitorada pelos dois sensores podem ser vistas na Figura (11).

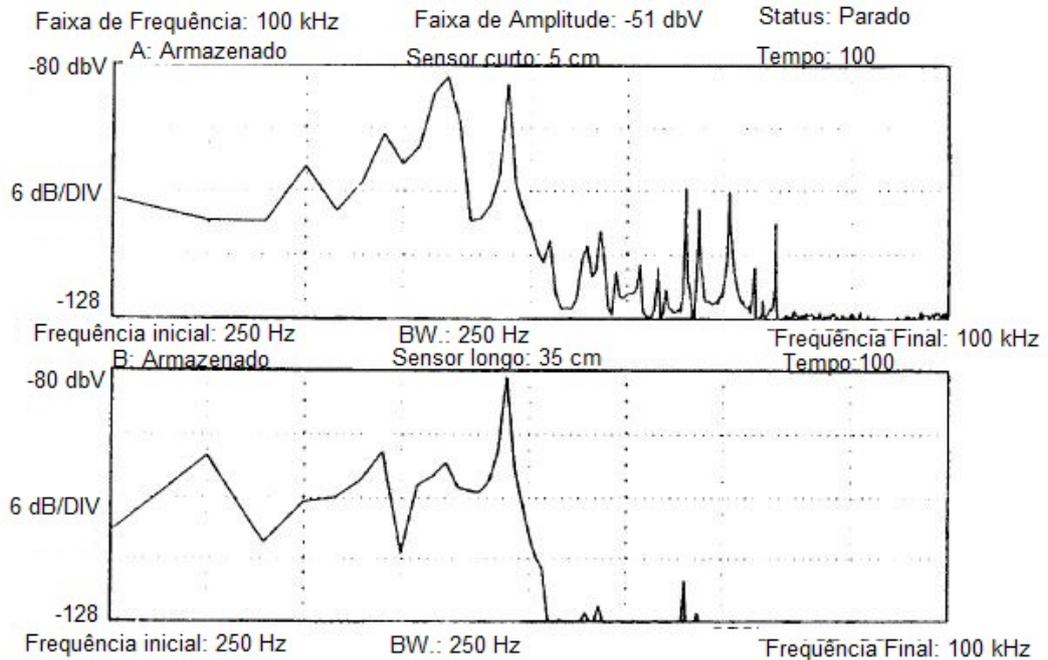


Figura 11: Curva de resposta em frequência para sensores de PVDF com diferentes comprimentos. Sensores com largura de 6 mm e comprimentos de 50 mm (A) e 350 mm (B). Adaptado de Brown (1990)

A avaliação das duas curvas permite visualizar, segundo o próprio autor, a menor banda de frequência sensível do elemento sensor mais longo (B). Observa-se que, para o sensor mais curto (A), o sinal coletado tem picos de amplitude em valores de frequência mais elevados, enquanto que, para o sensor mais longo, o sinal coletado tem sua resposta em frequência com picos de amplitude em espectro mais reduzido.

Em 2013, Kotian *et al* publicaram um artigo em que avaliam a possibilidade de uso de filmes finos de PVDF como elementos sensores de ondas de tensão longitudinais propagantes em uma barra sólida. Neste artigo, a partir da consideração de um modelo de onda longitudinal unidimensional de tensão mecânica propagante, os autores modelam a amplitude máxima de sinal elétrico gerado pelo sensor de PVDF a uma onda (senoidal ou com natureza de impacto) como função da geometria do próprio sensor, material da estrutura e frequência da onda de tensão mecânica. Após este modelamento, os autores fizeram a avaliação da influência de parâmetros como geometria, material da estrutura e frequência do sinal na amplitude de tensão elétrica gerada pelo sensor. Resultados deste estudo, apresentados nas Figuras (12) e (13), mostram que a geometria do sensor e a

frequência do sinal de excitação mecânica influenciam significativamente a resposta do sensor:

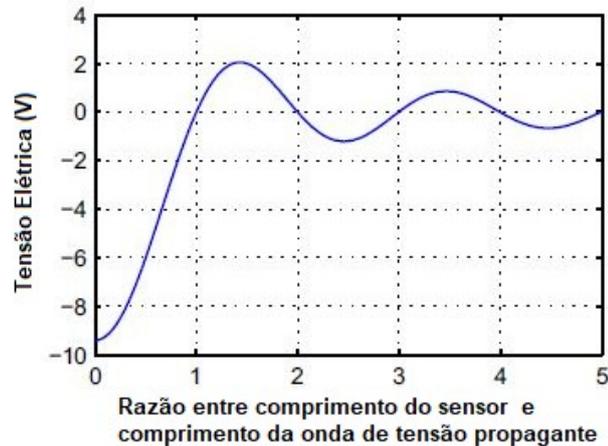


Figura 12: Amplitude da tensão elétrica média gerada pelo sensor devido a uma onda de tensão mecânica senoidal em função do incremento do comprimento do sensor até o quintuplo do valor do comprimento de onda. Adaptado de Kotian et al, 2013

Na Figura (12), os autores apresentam a amplitude máxima de tensão elétrica gerada pelo sensor em função da razão entre o comprimento do sensor e o comprimento de onda da excitação mecânica. Tais autores destacam que, em pontos onde o comprimento do sensor se iguala ao comprimento de onda da excitação mecânica ou um múltiplo da mesma, a resposta do sensor é nula. Tal comportamento, segundo os autores, deve-se ao efeito denominado “stress averaging effect”, equivalente à tensão elétrica gerada pelo sensor ser proporcional à média, em área, das tensões mecânicas que estão atuando no sensor. Para ondas cíclicas senoidais, como o caso proposto, a média da amplitude em um ou mais ciclos inteiros é nula. Desta forma, a média de tensão mecânica torna-se nula e o sinal gerado pelo sensor será nulo. Outro ponto destacado pelos autores é que, para casos onde o comprimento do sensor é muito inferior ao comprimento da onda propagante na estrutura, o “stress averaging effect” é mínimo, uma vez que a média de tensões mecânicas será constituída por valores que não variam muito entre si.

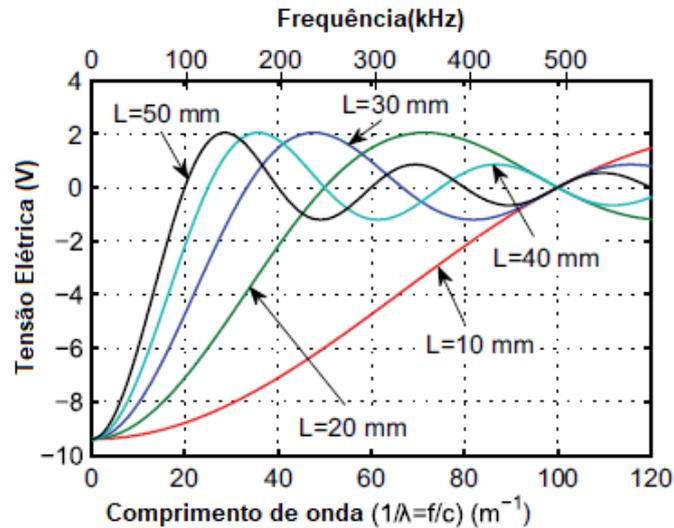


Figura 13: Tensão elétrica máxima gerada pelo sensor em função da variação do comprimento de onda ou frequência da onda para vários comprimentos do sensor. Adaptado de Kotian et al. 2013

Na Figura (13), os autores apresentam a amplitude máxima de tensão elétrica gerada pelo PVDF como função tanto da frequência de excitação mecânica quanto do comprimento do sensor. A análise da figura, considerando um único comprimento, gera conclusões similares às já obtidas pela análise da Figura (12). Quando, entretanto, compara-se curvas geradas a partir de diferentes comprimentos, percebe-se que sensores com menores comprimentos são mais adequados para detectar ondas de tensão mecânica com maiores frequências. Conforme pode ser vista pela Figura (13), a primeira frequência para a qual o sensor com menor comprimento (10 mm) apresenta tensão máxima virtualmente nula é 500 kHz, enquanto que, para o sensor com maior comprimento (50 mm), a primeira frequência em que a amplitude do sinal gerado é nula vale 100 kHz. Os resultados apresentados nas Figuras (12) e (13) mostram que os parâmetros geométricos do sensor desempenham um papel relevante na amplitude de resposta do sensor em altas frequências. A partir das mesmas, é possível identificar fenômenos de atenuação que podem afetar significativamente uma medição de tensões/deformações feita com sensores de PVDF.

A revisão bibliográfica desenvolvida nesta seção indica que a escolha de filmes de PVDF como elementos sensores piezoelétricos deve passar pela consideração de suas propriedades, aplicação a que se destina e também sua

geometria. Resultados apresentados por trabalhos de fabricantes (Measurements Specialties, 1999) e pesquisadores (Brown (1990), Kotian *et al* (2013) e Xiang Yao (2016)) indicam que este último fator afeta a resposta em frequência de tal sensor através de efeitos gerados no processo de medição em faixas de baixas e altas frequências, sendo necessário considerá-lo para evitar atenuações de sinal de medição que podem afetar o resultado experimental final. A investigação da influência de tal parâmetro na resposta em frequência é a motivação deste trabalho.

### 3. METODOLOGIA

Esta seção apresenta o modelo matemático utilizado para estimar a resposta piezoelétrica do sistema de medição (composto por sensor de PVDF e osciloscópio) a ondas de tensão mecânica longitudinais propagantes em estrutura e avaliar a influência da geometria do sensor na mesma. Este modelo matemático é constituído por um circuito elétrico equivalente, em que cada elemento do circuito representa aspectos da solicitação mecânica da estrutura, do sensor de PVDF ou do equipamento de medição. Neste modelo, todos os parâmetros elétricos relativos ao sensor de PVDF tem dependência de fatores geométricos do próprio sensor. A partir desta consideração no modelo, foram geradas e apresentadas na seção de resultados as curvas de respostas em frequência e de efeito de carga. Estas curvas permitem visualizar a relevância da geometria do filme de PVDF em sua função como sensor piezoelétrico, uma vez que este parâmetro influencia na resposta em frequência do sensor na região de baixas e altas frequências.

A metodologia deste trabalho foi organizada de forma a apresentar, em primeiro momento, o modelo adotado de maneira genérica. A partir desta descrição genérica, cada um dos elementos utilizados no modelo foi estudado individualmente, considerando teorias relativas à situação física solicitante, ao sensor de PVDF, ao equipamento de medição e verificação de coerência das mesmas a partir de confronto com dados experimentais, quando disponíveis. Por fim, equações matemáticas da teoria utilizada para conectar eletricamente tais elementos, teoria de circuitos alternados, foi apresentada.

#### 3.1 Modelo Elétrico do Sistema de Medição

O modelo elétrico utilizado neste trabalho é baseado em modelo básico utilizado para descrever sensores piezoelétricos. Ele é constituído por uma fonte de tensão em série com uma impedância elétrica constituída por um capacitor em paralelo com um resistor (Karki, 2001). Em série com este sensor, o circuito elétrico de impedância de entrada do equipamento de medição é representado por um simples resistor (Kotian, 2013). Este modelo está representado na Figura (14), em

que,  $V_{in}$  é um parâmetro que representa a tensão elétrica gerada pelo efeito piezoelétrico direto do sensor após o mesmo ser excitado por ondas de tensão mecânica que se propagam na estrutura em que o mesmo está inserido. A relação matemática correspondente a este elemento foi extraída do trabalho apresentado por Kotian *et al* (2013). A variável  $C_{SENSOR}$  é um parâmetro que representa a capacitância do sensor devido a sua constituição e formato geométrico. A relação físico-matemática selecionada para representar este parâmetro corresponde ao modelo de capacitor de placas planas, que está presente em livros de eletromagnetismo e pode também ser encontrado no manual de fabricantes de sensores de PVDF (Measurement Specialties, 1999).  $R_{SENSOR}$  é um parâmetro que representa o isolamento elétrico finito do sensor devido às propriedades do próprio PVDF. Seu valor foi estimado com o uso da 2ª Lei de Ohm a partir de dimensões geométricas e propriedades do material informadas pelo fabricante (Measurement Specialties, 1999). O resultado calculado, quando confrontado com resultados experimentais gerados por Gusarov (2015) e Chang *et al* (2013), apresentaram valores com mesmas ordens de grandeza.  $R_{OSCILLOSCOPE}$  é um parâmetro correspondente ao circuito elétrico da impedância de entrada do equipamento de medição, cujo valor pode ser obtido a partir de ficha técnica do equipamento de medição utilizado. O último parâmetro,  $V_{OUT}$ , representa o valor numérico do sinal lido pelo equipamento de medição. Neste modelo, assume-se que as propriedades do sensor e da estrutura não mudam com a mudança de frequência da excitação mecânica ou da temperatura a que os mesmos estão expostos.

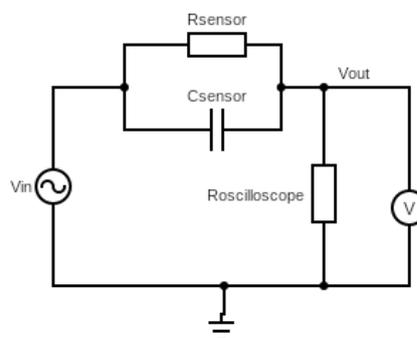


Figura 14: Circuito elétrico correspondente ao modelo básico de sensor piezoelétrico

### 3.1.1 Fonte de Tensão Elétrica

#### 3.1.1.1 Modelo Físico

O modelo físico utilizado neste trabalho faz a descrição da propagação de ondas de tensão mecânica longitudinais em uma barra fina metálica. Tal situação física, primeiramente descrita por Kotian *et al* (2013), considerada um sensor de PVDF conectado a uma barra metálica fina com uma extremidade exposta a uma força uniformemente distribuída e outra extremidade fixa, conforme apresentado na Figura (15).

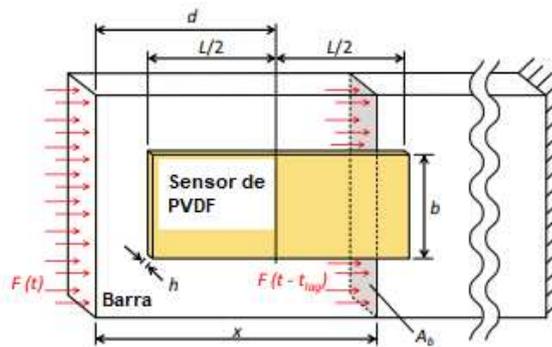


Figura 15: Modelo físico de filme fino de PVDF exposto à ondas compressivas longitudinais propagantes. Adaptado de Kotian *et al* (2013)

Para obter uma equação matemática que descreva uma onda de tensão mecânica longitudinal uni-dimensional que se propaga em uma barra metálica, estes autores assumiram uma série de considerações. A primeira delas foi de que tanto o material da barra quanto do PVDF comportam-se de maneira perfeitamente elástica, com a relação entre a tensão e deformação mecânica dos mesmos feita pelo módulo de Young ( $Y$ ) dos respectivos materiais. É também assumido que a rigidez do PVDF é significativamente inferior à rigidez da barra. Como consequência direta, assume-se que a rigidez do sensor não afeta a rigidez global do sistema. O acoplamento entre o sensor de PVDF e a barra é considerado perfeito, de forma que a deformação mecânica sofrida pela barra devido à solicitação mecânica externa é

igual à deformação sofrida pelo sensor de PVDF. Considera-se ainda que a força externa é aplicada na extremidade livre da barra, sendo uniformemente distribuída pela seção transversal da mesma. Esta força externa não gera nenhum esforço cisalhante ou fletor na barra. Por fim, desconsidera-se qualquer reflexão da onda de tensão propagante nas extremidades da barra. Usando estas considerações na situação física proposta, Kotian *et al* (2013) desenvolve uma relação matemática que indica que da onda de tensão mecânica atuante na seção transversal da barra, no ponto  $x$ , no instante  $t$ , tem sua amplitude dada pela Equação (23):

$$T_{\text{barra}}(x, t) = \frac{F}{A_{\text{barra}}} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot f \left(t - \frac{x}{c_0}\right)\right) = \frac{F}{A_{\text{barra}}} \cdot \sin\omega \left(t - \frac{x}{c_0}\right) = \sigma_{\text{barra}} \cdot \sin\omega \left(t - \frac{x}{c_0}\right) \quad (23)$$

onde  $F$  é a amplitude da força externa,  $A_{\text{barra}}$  é a seção transversal da barra na direção longitudinal,  $f$  é a frequência da onda de tensão mecânica,  $t$  é o instante de tempo,  $x$  é a distância entre a extremidade livre e a frente de onda,  $c_0$  é a velocidade de propagação da onda no material e  $\omega$  é a frequência circular da onda.

### 3.1.1.2 Comportamento piezoelétrico do sensor de PVDF

Para descrever o comportamento piezoelétrico do sensor de PVDF, um dos relevantes elementos de análise é a direção de aplicação do esforço mecânico e também a direção de medição da resposta piezoelétrica do sensor. A Figura (16) apresenta um filme de PVDF posicionado sobre um sistema de coordenadas cartesiano composto por três direções ortogonais. O comprimento do filme é paralelo à direção longitudinal (1), a largura é paralela à direção transversal (2) e a espessura é paralela à direção normal (3).

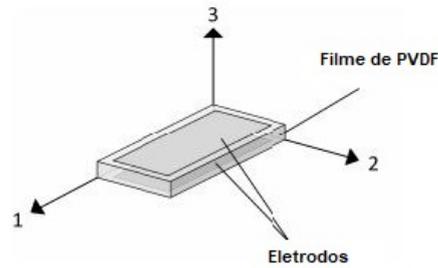


Figura 16: Diagrama mostrando os eixos principais cartesianos e o correspondente posicionamento do sensor de filme de PVDF. Adaptado de Kotian *et al*, 2013

Considerando a Figura (16), um dos conjuntos de equações constitutivas piezoelétricas linearizadas que pode ser utilizado para descrição das relações físico-matemáticas entre Deformação mecânica (S), Tensão mecânica (T), Campo elétrico (E) e Deslocamento Elétrico (D) apresentado por um material piezoelétrico é, segundo Kotian *et al* (2013), o seguinte:

$$S_p = s_{pq}^D T_q + g_{kp} D_k, \quad (24)$$

$$E_i = g_{iq} T_q + \beta_{ik}^T D_k, \quad (25)$$

Onde  $s_{pq}$  representam elementos da matriz de flexibilidade,  $g_{kp}$  são elementos de matriz de coeficientes piezoelétricos de tensão elétrica e  $\beta_{ik}$  são elementos que representam uma matriz ligada à constante dielétrica do material. Os sobrescritos D e T referem-se a condições específicas de medição de s ( $s^D$  – flexibilidade medida com deslocamento elétrico nulo) e  $\beta$  ( $\beta^T$  – o inverso da constante dielétrica medida com tensão mecânica nula). Os subscritos p e q são notações matriciais que podem assumir valores de 1 a 6, representando as direções 11, 22, 33, 23 ou 32, 31 ou 13 e 21 ou 12. Os subscritos i e k são notações matriciais que podem assumir valores de 1 a 3, representando as direções principais 1, 2 e 3, como definido na Figura (16).

O conjunto de equações constitutivas apresentado nas Equações (24) e (25) pode ser simplificado devido à simetria estrutural apresentada por materiais piezoelétricos. Devido a este fator, muitos coeficientes piezoelétricos ( $g_{ip}$ ), dielétricos ( $\beta_{ik}$ ) e de flexibilidade ( $s_{pq}$ ) tornam-se nulos (Gusarov, 2015). Maior simplificação do

conjunto de equações é obtida a partir de características induzidas no filme de PVDF durante o processo de fabricação. Considerando que os filmes comerciais de PVDF apresentam, em sua estrutura, orientação preferencial biaxial, apenas os coeficientes piezoelétricos de tensão elétrica  $g_{31}$ ,  $g_{32}$ ,  $g_{33}$ ,  $g_{15}$  e  $g_{24}$  tem valor não nulo (Harrison e Ounaies, 2001). Após estas simplificações, a deformação mecânica ao longo da direção longitudinal ( $S_1$ ) e campo elétrico ao longo da direção normal ( $D_3$ ) são relacionados pelas Equações (26) e (27).

$$S_1 = s_{11}^D T_1 + s_{12}^D T_2 + s_{13}^D T_3 + g_{13} D_3, \quad (26)$$

$$E_3 = g_{31} T_1 + g_{32} T_2 + g_{33} T_3 + \beta_{33}^T D_3, \quad (27)$$

Considerando agora que o campo elétrico vai ser medido ao longo da direção de espessura do filme de PVDF ( $E_3$ ) com resistência elétrica suficientemente alta para evitar fluxo de corrente através dos eletrodos, o deslocamento elétrico na direção normal ( $D_3$ ) ao sensor pode ser considerado nulo e as Equações (3) e (4) são simplificadas e resultam nas Equações (28) e (29):

$$S_1 = s_{11}^D T_1 + s_{12}^D T_2 + s_{13}^D T_3, \quad (28)$$

$$E_3 = g_{31} T_1 + g_{32} T_2 + g_{33} T_3, \quad (29)$$

Considerando que a espessura do filme de PVDF é algumas ordens de amplitude menor do que sua largura e comprimento, a relação entre o campo elétrico existente entre as faces do sensor com direção normal ( $E_3$ ) e a tensão elétrica ( $V_3$ ) existente entre as faces pode ser expressa pelo modelo do capacitor de placas paralelas, indicada na Equação (30).

$$E_3 = \frac{V_3}{h}, \quad (30)$$

onde  $h$  corresponde à distância entre as faces do sensor na direção normal. Neste caso, esta distância equivale à espessura do filme de PVDF. A aplicação da relação apresentada na Equação (30) na Equação (29) gera uma relação que correlaciona a tensão mecânica ( $T_i$ ) que atua nos filmes de PVDF e a tensão elétrica gerada entre as faces do sensor na direção normal ( $V_3$ ) :

$$V_3 = h \cdot (g_{31}T_1 + g_{32}T_2 + g_{33}T_3), \quad (31)$$

Se a sollicitação mecânica apresentar esforços apenas no plano longitudinal, tensões mecânicas na direção normal podem ser consideradas nulas e a Equação (31) é simplificada e torna-se a Equação (32).

$$V_3 = h \cdot (g_{31}T_1 + g_{32}T_2), \quad (32)$$

### 3.1.1.3 Tensão elétrica média em área gerada pelo sensor de PVDF

Os resultados obtidos até agora indicam que a tensão elétrica gerada entre os eletrodos colocados nas faces do sensor cona direção normal ( $V_3$ ) é proporcional à amplitude de tensão mecânica atuando no sensor nas direções longitudinal ( $T_1$ ) e transversal ( $T_2$ ). Equações desenvolvidas nas seções anteriores são inicialmente locais, válidas para cada ponto compreendido dentro da região do sensor. Considerando que a resposta piezoelétrica dos sensores de PVDF à sollicitação mecânica ocorre em todo seu volume, um modelo que represente a fonte de tensão elétrica equivalente deve considerar o somatório da resposta piezoelétrica do PVDF a sollicitações mecânicas atuando no sensor. Alguns autores (Zhang *et al* (1993) e Kotian *et al* (2013)) modelam a resposta piezoelétrica do sensor de PVDF como um sinal elétrico proporcional ao valor médio (em área) das deformações mecânicas detectadas pelo sensor de PVDF na área em que está acoplado à estrutura.

Se tal análise for aplicada ao modelo físico adotado nesta dissertação (Figura (15)), torna-se necessário correlacionar os parâmetros da onda de tensão mecânica apresentados na Equação (23) com as relações piezoelétricas entre a tensão

mecânica e tensão elétrica no sensor, apresentada pela Equação (32) e avaliar a solução analítica sobre a área coberta pelo sensor.

Para tanto, uma equação analítica para descrever a tensão mecânica atuante no sensor piezoelétrico é obtida (Equação (33)):

$$T_{\text{sensor}}(x, t) = \sigma_{\text{sensor}} \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) = \varepsilon_{\text{sensor}} \cdot Y_{\text{sensor}} \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) = \frac{\sigma_{\text{bar}}}{Y_{\text{bar}}} \cdot Y_{\text{sensor}} \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) \quad (33)$$

Substituindo a Equação (33) na Equação (32), é obtida a tensão elétrica local gerada pelo sensor de PVDF devido à solicitação da onda de tensão mecânica propagando na barra.

$$V_3(x, t) = \left( \frac{h \cdot g_{31} \cdot Y_{\text{sensor}} \cdot F}{Y_{\text{bar}} \cdot A_{\text{bar}}} \right) \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) \quad (34)$$

Para obter o valor da tensão elétrica média em área gerada pelo sensor de PVDF, uma operação de integração de área é conduzida na Equação (34), com seus limites definidos pelos parâmetros geométricos do próprio sensor de PVDF (largura e comprimento). Sua representação formal pode ser vista na Equação (35).

$$V_{3\text{médio}}(t) \cdot A_{\text{sensor}} = \iint \left( \frac{h \cdot g_{31} \cdot Y_{\text{sensor}} \cdot F}{Y_{\text{barra}} \cdot A_{\text{barra}}} \right) \cdot \sin \omega \left( t - \frac{x}{c_0} \right) \cdot dA_{\text{sensor}}, \quad (35)$$

Para a geometria retangular, a solução analítica da Equação (35), que representa a tensão elétrica média em área gerada pelo sensor de PVDF quando exposto à solicitação mecânica de uma onda de tensão mecânica propagante, pode ser obtida por técnicas de integração por substituição e posterior substituição de identidades trigonométricas. O resultado final pode ser visto na Equação (36).

$$V_{3\text{médio}}(t) = \left( \frac{h \cdot g_{31} \cdot E_{\text{sensor}} \cdot F \cdot c_0}{E_{\text{barra}} \cdot A_{\text{barra}} \cdot \pi \cdot f \cdot L} \right) \sin \left( \frac{\pi \cdot f \cdot L}{c_0} \right) \sin \omega \left( t - \frac{d}{c_0} \right), \quad (36)$$

### 3.1.2 Elemento Capacitivo

Em manual técnico da Measurement Specialties (1999), o modelo equivalente utilizado para descrever a capacitância elétrica do sensor de PVDF é o modelo de capacitor de placas planas. A aplicação deste modelo nos sensores de PVDF considera que os eletrodos depositados sobre as faces da espessura do sensor como as placas paralelas do capacitor, enquanto o filme fino de PVDF é considerado como o dielétrico isolando as duas faces. O diagrama equivalente desta capacitância é apresentado na Figura (17).

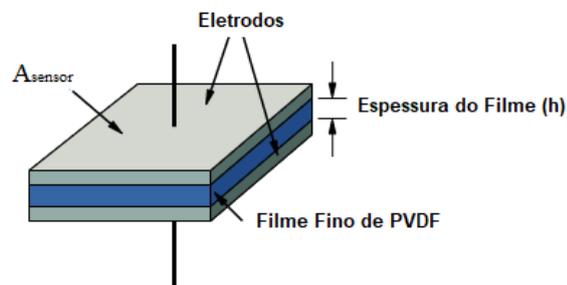


Figura 17: Capacitor de Placas paralelas constituído por filme fino de PVDF revestido por tinta condutiva de prata

A equação matemática que correlaciona os parâmetros geométricos dos filmes finos de PVDF com sua capacitância elétrica é, pelo uso deste modelo, equivalente à relação apresentada pela Equação (37).

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot A_{\text{sensor}}}{h} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot w}{h}, \quad (37)$$

onde  $\varepsilon$  refere-se à permissividade relativa do PVDF,  $\varepsilon_0$  refere-se à permissividade do vácuo,  $h$  refere-se à espessura do filme de PVDF e  $A_{\text{SENSOR}}$  refere-se à área coberta pelos eletrodos, cujas dimensões correspondem à largura  $w$  e comprimento  $L$ .

### 3.1.2.1 Validação Experimental de Modelo de Capacitância

De forma a validar o modelo matemático de cálculo de capacitância elétrica de sensor do PVDF apresentado na seção anterior, buscou-se trabalhos experimentais para comparação. Neste sentido, os resultados experimentais foram extraídos de trabalho de Gusarov et al(2013). Neste, os autores investigaram o comportamento de descarga elétrica de filmes de PVDF após serem expostos a deformações mecânicas iniciais e terem o valor de tensão elétrica aferido por osciloscópios com impedância de entrada finita (1 M $\Omega$  e 10M $\Omega$ ). Tal medição foi feita através da montagem elétrica apresentada na Figura (18), em que a tensão elétrica foi aferida :

- a) por voltímetro eletrostático, sem contato físico entre o equipamento de medição e o filme de PVDF, em que uma chave normalmente aberta foi conectada a uma resistência de carga (1 M $\Omega$ ). A medição é feita continuamente, captando potencial elétrico do sensor antes, durante e após o fechamento da chave;
- b) por um osciloscópio ligado diretamente às extremidades do sensor. A resistência de carga do circuito corresponde a resistência de entrada do próprio osciloscópio (10 M $\Omega$ );
- c) por um osciloscópio ligado através de uma chave normalmente aberta às extremidades do sensor. Apenas em momento controlado, a chave elétrica é fechada e a medição é feita. Novamente, a resistência de carga corresponde à resistência de entrada do próprio osciloscópio (10 M $\Omega$ ).

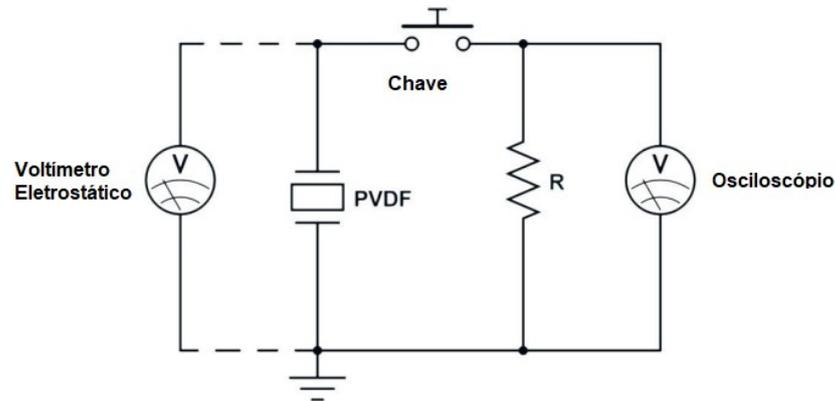


Figura 18: Diagrama de montagem elétrica utilizada para aferir tensão elétrica gerada pela deformação de filme de PVDF. Adaptado de Gusarov et al, 2013

Em teste experimental, quando a estrutura à qual o filme de PVDF estava acoplado foi submetida a um esforço mecânico com características de sinal degrau, o filme de PVDF apresentou, como resposta piezoelétrica, um sinal de tensão elétrica. Para os casos de medição do tipo **a** e **c**, estes sinais de tensão elétrica apresentaram um perfil de decaimento exponencial ao longo do tempo, conforme pode ser visto na Figura (19). Tais resultados experimentais, correspondentes à curva vermelha (caso **a**) e à curva azul (caso **c**), revelam um comportamento da tensão elétrica similar ao apresentado por um capacitor elétrico cuja carga acumulada está sendo descarregada através de uma resistência elétrica.

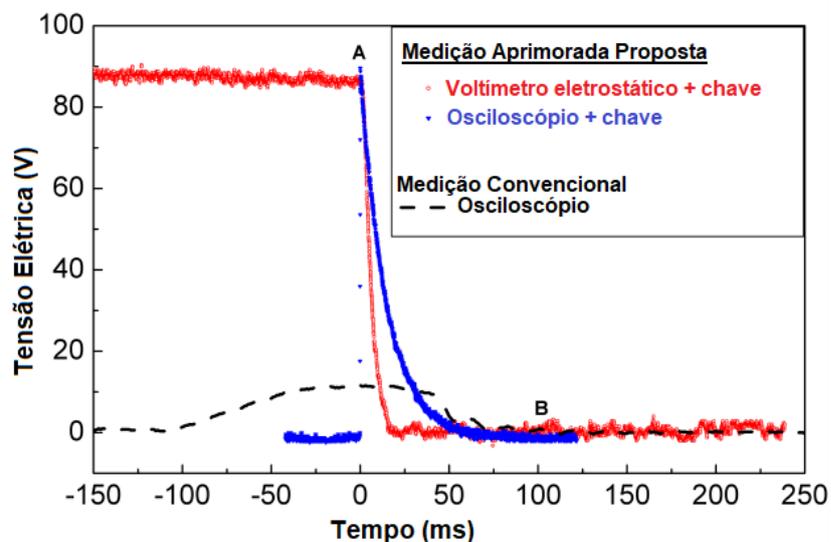


Figura 19: Curvas típicas de descarga de filmes de PVDF expostos a deformação mecânica de 0,5 %. Adaptado de GUSAROV et al, 2013

Conforme explicado pelo próprio autor, estas curvas de descarga ocorrem devido à corrente de fuga de cargas armazenadas no próprio filme de PVDF através do equipamento de medição. Esta corrente de fuga flui através da resistência elétrica do equipamento de medição. Considerando que, para esta situação experimental, o modelo equivalente de circuito de medição equivale a um circuito RC série em descarga, em que o capacitor  $C_{sensor}$ , equivalente à capacitância de saída do filme de PVDF, descarrega a carga acumulada através da resistência  $R_{oscilloscope}$ , equivalente à impedância de entrada puramente resistiva do equipamento de medição, a constante de tempo destas curvas de descarga é determinada tanto pelo valor de capacitância do filme de PVDF quanto pelo valor de resistência elétrica de entrada do sistema de medição.

A extração do valor de capacitância elétrica do filme de PVDF pode ser feita através do uso destas curvas experimentais. Tendo como referência o valor conhecido da resistência de carga ( $R_{oscilloscope}$ ) para cada uma destas curvas (equivalente à impedância de entrada do equipamento de medição), é possível, através da consideração da constante de tempo de um circuito RC série, calcular o valor de capacitância do sistema. Para isso, o circuito representado na Figura (18) deve ser revisitado. Para tal modelo equivalente com a chave que conecta o sensor ao equipamento de medição fechada, a tensão elétrica lida pelo equipamento de medição ( $V_{out}$ ) ao longo do tempo segue a correlação de tensão elétrica em um resistor de um circuito RC série quando o capacitor está em descarregamento, conforme apresentado pela Equação (38):

$$V_{out} = V_{in} \cdot \exp\left(\frac{-t}{R \cdot C}\right), \quad (38)$$

Se o objetivo for extrair o valor da capacitância elétrica do filme de PVDF das curvas experimentais apresentadas na Figura (19), é necessário isolar o parâmetro  $C_{sensor}$  da Equação (38) e substituir todos os outros parâmetros por valores representados na própria curva experimental. Se a curva de medição tipo **c** for utilizada para obtenção de parâmetros, tem-se que um deles, o valor  $R_{oscilloscope}$ , já é conhecido, pois representa a resistência de entrada do próprio equipamento de

medição (10 M $\Omega$ ). Para determinação do valor de  $C_{sensor}$ , considera-se que  $t$  tem um valor igual a uma constante de tempo do sistema. Para esta situação específica no circuito RC série equivalente, a tensão  $V_{out}$  tem seu módulo igual a 37,2% do valor de  $V_{in}$  e o valor numérico de  $t$  vale ( $R_{oscilloscope} \cdot C_{sensor}$ ). A análise gráfica da curva permite estimar a constante de tempo desta curva de medição com o valor de 15ms, aproximadamente. Considerando a Equação (39),

$$\tau = R \cdot C, \quad (39)$$

tem-se que a capacitância equivalente do filme de PVDF será igual a :

$$C = \frac{\tau}{R}, \quad (40)$$

Para a curva de medição do tipo **c**, a constante de tempo lida foi de 15 ms e a resistência de carga equivalente à resistência de entrada do osciloscópio é de 10 M $\Omega$ . Utilizando a Equação (40), obtém-se o valor de capacitância equivalente igual à

$$C = 1.5 nF,$$

A verificação da adequação do modelo matemático para cálculo da capacitância elétrica apresentado pela Equação (40) pode ser feita a partir da comparação entre o valor calculado, utilizando as informações técnicas do filme de PVDF LDT1-028K, apresentadas na Tabela 1, o valor de capacitância elétrica do filme extraído da curva experimental **c** da Figura (19) e, por fim, o valor de capacitância do sensor de PVDF LDT1-028K informado pela própria fabricante Measurement Specialties (1999) em seu manual técnico.

Tabela 2: Lista de filmes de PVDF comerciais com respectivas dimensões geométricas, propriedades piezoelétricas e mecânicas. Gusarov et al, 2013.

Nome	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)	$d_{31}$ (pm/V)	$g_{31}$ (Vm/N)	$k_{31}$ (%)	Y (MPa)
LDT1	30	12.19	0,03	23	0,22	12	2-4
PVDF	20	15	0.04	6+10%	0,06 +20%	10-15	2,5 + 20%
P(PVDF-TrFE)	20	15	0.05	6+20%	0,09+20%	10-15	1 + 20%

Tal comparação, que pode ser feita a partir da Tabela (3), mostra que o modelo teórico de capacitância de placas planas, cuja relação matemática está apresentada na Equação (37), mostra-se adequado para estimativa da capacitância do sensor de PVDF.

Tabela 3: Comparação de capacitância elétrica do filme de PVDF LDT1-028K obtido por diferentes formas

Modelo	Análise Gráfica	Modelo teórico de Capacitância de placas planas paralelas	Dados do Fabricante
Capacitância do Filme de PVDF LDT1 – 028 K – Measurement Specialities	1,5nF	1,38nF	1,3 nF

Há uma diferença de 6% entre o valor calculado pelo modelo teórico e o valor informado pelo fabricante. Tal diferença pode ser atribuída a não consideração, no modelo teórico, da área destinada à conexão dos eletrodos como área ativa de capacitância. O modelamento de capacitância elétrica desta área é mais complexo, uma vez que esta é uma região ativa do sensor não sobreposta por revestimento na face oposta e, desta forma, escapa ao modelo simplificado de capacitor de placas planas paralelas. Há uma diferença maior entre o valor estimado a partir da análise gráfica de resultados experimentais e o valor calculado pelo modelo teórico (15%). Esta diferença pode ser atribuída a limitação da própria análise gráfica, uma vez que a extração de dados a partir do gráfico pode incorrer em incertezas maiores.

### 3.1.3 Elemento Resistivo

O elemento resistivo da impedância do sensor de filme de PVDF ( $R_{SENSOR}$ ) apresentado na Figura (14) está relacionado à corrente de fuga que flui através do próprio elemento sensor devido à sua resistência de isolamento finita. De forma a estimar a resistência elétrica equivalente deste sensor, a segunda Lei de Ohm foi utilizada e o resultado foi confrontado com dados experimentais apresentados em trabalhos de Chang *et al* (2013) e Gusarov (2015). Foi observado que, para as dimensões apresentadas pelo sensor comercial LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialities, o modelo teórico e experimentos apresentam valores com

mesma ordem de grandeza. A segunda Lei de Ohm é apresentada a seguir, na Equação (41).

$$R_{\text{Sensor}} = \frac{\rho \cdot h}{L \cdot w}, \quad (41)$$

### 3.1.3.1 Verificação de Modelo de Resistência Elétrica de isolamento

Para verificação do modelo físico-matemático como método de estimativa da resistência de isolamento do filme de PVDF, o resultado calculado foi confrontado com valores experimentais. A base experimental utilizada foi o estudo de auto descarga de filmes de PVDF comerciais conduzido por Gusarov em trabalho de 2015 e trabalho experimental de Chang *et al* (2013). No trabalho de Gusarov, os filmes de PVDF foram carregados com altos valores de tensão elétrica e o decaimento da tensão elétrica entre faces da sua espessura foi monitorado através de equipamento de medição sem contato (eletrômetro). Para este experimento, o diagrama elétrico equivalente aproxima-se do apresentado na Figura (14). Neste caso, o elemento  $C_{\text{SENSOR}}$  é conhecido pela informação técnica do filme comercial de PVDF testado (LDT1-028K),  $R_{\text{OSCILLOSCOPE}}$  é considerada elevada (teoricamente infinita), uma vez que a medição de potencial elétrico é feita sem contato, de forma que não haja qualquer fluxo de cargas elétricas oriundas do sensor fluindo pelo equipamento de medição,  $V_{in}$  é considerada nula, uma vez que o filme de PVDF está livre de qualquer esforço mecânico externo e  $R_{\text{SENSOR}}$  é desconhecido, a ser determinado por valores experimentais e modelo de descarregamento de capacitor. Usando estas considerações no diagrama apresentado na Figura (14), o fluxo de cargas elétricas armazenadas no sensor pode ocorrer apenas pela resistência de isolamento de próprio sensor. Para este caso, o modelo equivalente de circuito será o de um circuito RC série em regime de descarga. A tensão elétrica existente no capacitor terá, qualitativamente, o mesmo comportamento descrito pela Equação (38). Neste caso, a capacitância do circuito RC será a própria capacitância do sensor ( $C_{\text{SENSOR}}$ ), enquanto a resistência será a resistência do próprio sensor ( $R_{\text{SENSOR}}$ ).

A partir do modelo equivalente de circuito elétrico como RC série em regime de descarga, o cálculo da resistência do sensor pode ser feita de forma indireta, de maneira similar a já utilizada para cálculo da capacitância elétrica do sensor na seção anterior. Para calcular tal parâmetro, deve-se considerar novamente a equação de constante de tempo de um circuito RC série em regime de descarga (Equação (38)). Se, nesta equação, isolarmos o termo de resistência, podemos calculá-la através da relação expressa na Equação (42).

$$R_{SENSOR} = \frac{\tau}{C_{SENSOR}}, \quad (42)$$

Gusarov levantou, para vários valores de tensão elétrica aplicada nos filmes de PVDF (LDT1-028K), as correspondentes constantes de tempo das curvas de descarga elétrica do sensor. A curva com resultados experimentais pode ser vista na Figura (20).

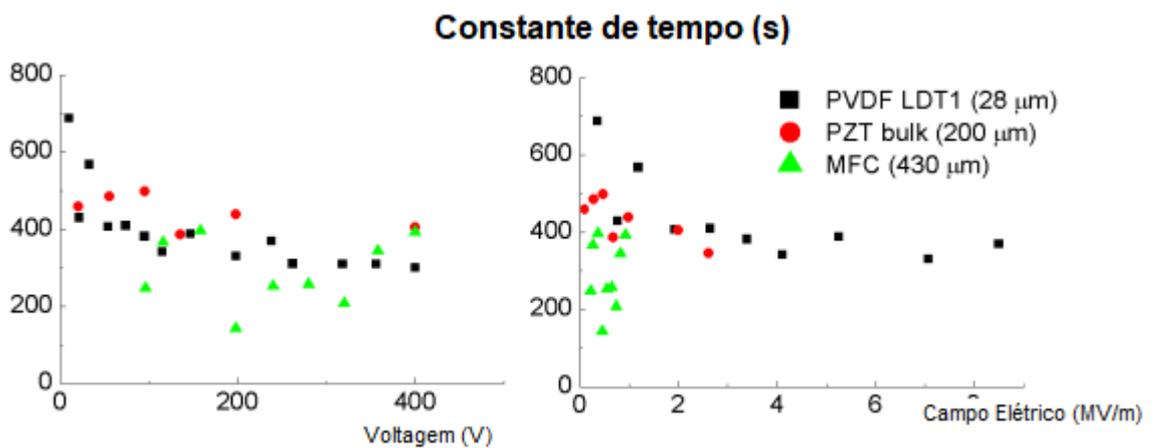


Figura 20: Constante de tempo para auto descarga dos elementos piezoelétricos ( PVDF, PZT e MFC) para vários valores de tensão elétrica inicial. Adaptado de Gusarov, 2015

Para o filme de PVDF LDT1-028K, da Measurement Specialties, a constante de tempo  $\tau$ , pela análise da Figura (20), valor compreendido entre 700 s e 300 s. Para uma capacitância especificada pelo próprio fabricante como 1,3 nF, a utilização da Equação (42) apresenta um resultado de resistência muito elevada, conforme pode ser visto abaixo:

$$2.3 \times 10^{11} \Omega \leq R_{\text{SENSOR}} \leq 5.38 \times 10^{11} \Omega,$$

Em estudos conduzidos por Chang *et al* (2013) para avaliação da corrente de fuga apresentada por filmes de PVDF fabricados pela Measurement Specialties e com dimensões e propriedades similares às do filme LDT1-028K, apresentadas na Tabela 1, foram encontrados valores de resistências de isolamento com ordens de grandeza similar aos resultados experimentais obtidos por Gusarov (2015). Utilizando uma metodologia de medição de correntes de fuga, em que o filme de PVDF é inicialmente carregado por uma tensão elétrica de valor conhecido e, após interrupção do carregamento, os eletrodos do filme são curto circuitados e a corrente de curto circuito aferida por picoamperímetro, tais autores encontraram, para tensões de 8 V, correntes médias de fuga de 73 pA. A correlação dos dois dados pela Lei de Ohm tem como resistência elétrica equivalente de  $1,1 \times 10^{11} \Omega$ .

Se a segunda lei de Ohm, apresentada na Equação (41), for utilizada para modelar a resistência de isolamento do sensor, obtem-se um valor com mesma ordem de grandeza dos obtidos a partir de dados experimentais de Gusarov (2015) e Chang *et al*(2013), conforme pode ser visto na Tabela (4).

Tabela 4– Comparação de capacitância elétrica do filme de PVDF LDT1 obtido por diferentes formas

Fonte	Resultados de Gusarov <i>et al</i> (2013)	Resultados de Cheng <i>et al</i> (2013)	2ª Lei de Ohm (Propriedades obtidas através de datasheet da Measurement Specialties)
Resistência de Isolamento do Filme de PVDF LDT1 - 028k – Measurement Specialities	$2,3 \cdot 10^{11} \Omega < R_{\text{SENSOR}} < 5,38 \cdot 10^{11} \Omega$	$1,1 \cdot 10^{11} \Omega$	$7,7 \cdot 10^{11} \Omega$

### 3.1.4 Circuito Elétrico Alternado Equivalente

Se os resultados apresentados nas seções anteriores são unificados usando o modelo elétrico proposto por Karki (2001), é possível usar o mesmo para simular a resposta do sensor de PVDF a ondas de tensão longitudinal com amplitude e frequência especificadas. Para tanto, uma análise de circuito de corrente alternada

vai ser adotada. Para avaliar a tensão elétrica lida pelo osciloscópio, vai ser assumido que o regime transiente devido a condições iniciais já decaiu. Neste caso, a solução pode ser utilizada para estimar a tensão de saída ( $V_{out}$ ) baseando-se no divisor de tensão do circuito de medição formado pela interação entre a impedância do sensor e a impedância do equipamento de medição. Para analisar magnitude e fase, o método vai utilizar representação por fasores. Com este método, a tensão gerada pelo sensor piezoelétrico ( $V_{in}$ ) vai ser representada como:

$$V_{in} = |V_{3.Avg}| \angle -w \cdot \frac{d}{c} = |V| \angle \theta, \quad (43)$$

enquanto resistências e reatâncias capacitivas vão ser representadas pelas Equações (44), (45) e (46):

$$R_{Oscilloscope} = |R_{Oscilloscope}| \angle 0^\circ, \quad (44)$$

$$R_{sensor} = |R_{sensor}| \angle 0^\circ, \quad (45)$$

$$Z_c = \left| \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \right| \angle -90^\circ = |X_c| \angle -90^\circ, \quad (46)$$

Usando as notações apresentadas nas equações (44), (45) e (46) no circuito elétrico equivalente (Figura (1)), a impedância elétrica do sensor,  $Z_s$ , pode ser representada como :

$$Z_s = R_{sensor} // Z_c = \left( \frac{1}{R_{sensor}} + \frac{1}{Z_c} \right)^{-1}, \quad (47)$$

enquanto a tensão elétrica aferida pelo equipamento de medição,  $V_{out}$ , é:

$$|V_{out}| \angle \phi = \frac{V_{in} \cdot R_{Oscilloscope}}{R_{Oscilloscope} + Z_s}, \quad (48)$$

## 4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados de simulações do modelo físico matemático adotado neste trabalho para calcular a resposta em frequência de sistema de medição (formado por sensor de PVDF e osciloscópio) a ondas de tensão mecânica longitudinal propagantes em barra metálica fina.

Ela é estruturada de maneira a apresentar, inicialmente, a variação da impedância elétrica de saída do sensor em função da frequência da solicitação mecânica. Posteriormente, são geradas curvas de resposta em frequência do sistema de medição formado pelo sensor LDT1-028K e osciloscópio padrão e de sistemas de medição formados por sensores com diferentes dimensões geométricas e equipamento de medição com diferente impedância de entrada. A análise da diferença entre as curvas de resposta em frequência e de carga do sistema é conduzida a partir do limiar de resposta em frequência de -3dB, definido na revisão bibliográfica, e justificado a partir da análise da variação da impedância elétrica de saída do sensor e do “stress averaging effect” apresentado por Kotian *et al* (2013).

### 4.1 Efeito de frequência de excitação mecânica na impedância

Nesta seção, é desenvolvido o estudo de impedância elétrica de saída do sensor em função da frequência de excitação. O objetivo da mesma é permitir identificar em que faixas de frequência a impedância de saída do sensor é mais significativa e pode afetar significativamente a resposta em frequência do sistema de medição. As curvas de impedância elétrica do sensor apresentadas nesta subseção foram geradas a partir de conjunto de equações que descreve a reatância capacitiva (Equação (46)), a resistência elétrica (Equação (41)) e a impedância elétrica do sensor de PVDF como função da frequência do sinal de excitação (Equação (47)).

O circuito elétrico equivalente de medição, representado pela Figura (14), tem seu comportamento diretamente relacionado à frequência da excitação mecânica atuante no sensor. A reatância capacitiva do sensor tem seu módulo expresso pela Equação (46). Pela mesma, é possível identificar uma relação inversa entre a

frequência de excitação e a impedância capacitiva apresentada pelo sensor. A Figura (21) apresenta a relação entre a reatância capacitiva de um filme de PVDF (sensor LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialities) e a frequência da excitação mecânica, com faixa de frequência entre 0,1 Hz e 1MHz.

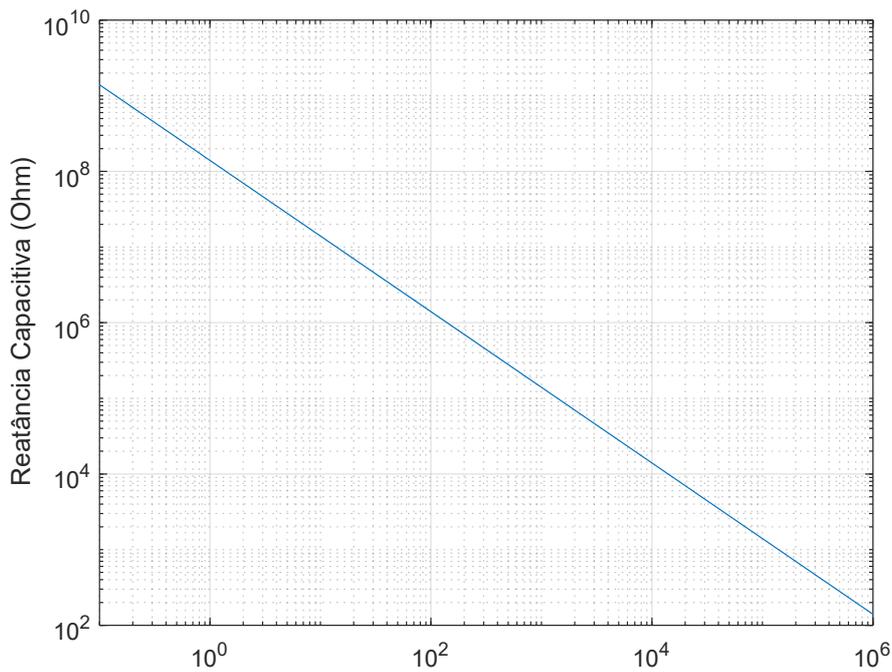


Figura 21: Reatância Capacitiva do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação

Observa-se nesta figura uma grande variação de reatância capacitiva na faixa da frequência avaliada. Para o limite inferior de 0,1 Hz, temos uma reatância capacitiva com módulo próximo à  $10^9$  Ohm, enquanto que, para o limite superior de 1 MHz, temos uma reatância capacitiva pequena, com módulo aproximado de 100  $\Omega$ . Em baixas frequências, tal valor de reatância capacitiva pode ter influência significativa na amplitude do sinal coletado pelo equipamento de medição, cuja impedância de entrada ( $10^7 \Omega$ ) chega a ser cem vezes menor. Em altas frequências, tal reatância capacitiva chega a valores tão baixos que seu efeito na amplitude do sinal elétrico coletado é desprezível.

O modelo matemático adotado neste trabalho para a resistência elétrica do sensor considera que a frequência de excitação do sensor não afeta o valor da resistência elétrica. Tal modelo, representado pela Equação (41), indica que a resistência elétrica do sensor terá seu valor definido por características do material (resistividade volumétrica do material) e pela geometria do sensor. Tal valor apresenta-se constante ao longo de todo o espectro de frequência, conforme representado pela Figura (23), e tem sua amplitude calculada a partir da consideração de sensor com mesmas características que o sensor LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialties.

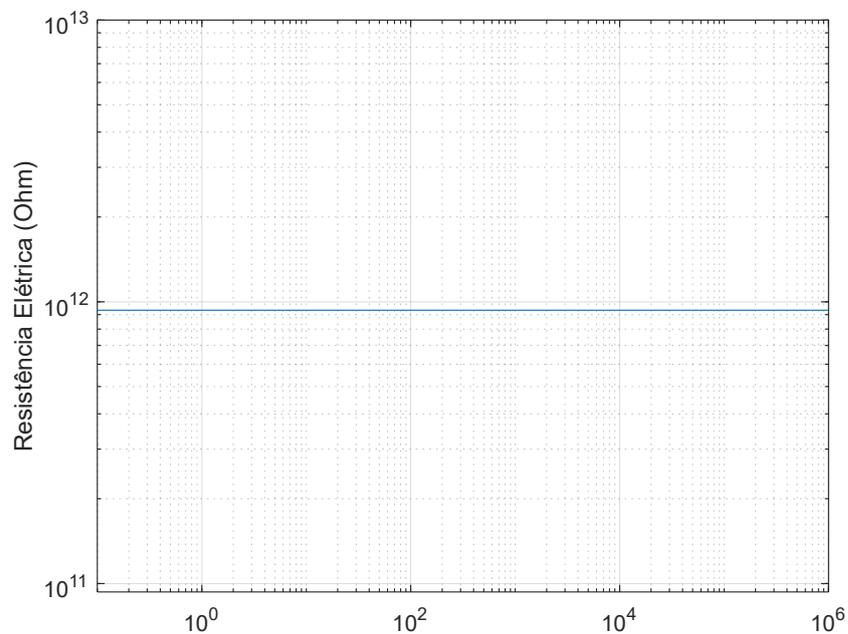


Figura 23: Resistência Elétrica do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação

Nesta figura, o ponto a ser destacado é o alto valor de resistência elétrica calculado para o sensor. Observa-se no mesmo um valor próximo à  $10^{12}$ , maior do que a reatância capacitiva do mesmo ( $10^9$ ) no limite inferior de frequência (0,1 Hz). A impedância de saída equivalente do sensor corresponde à associação paralela entre a reatância capacitiva e a resistência elétrica do sensor. O módulo da impedância equivalente em função da frequência segue na Figura (24).

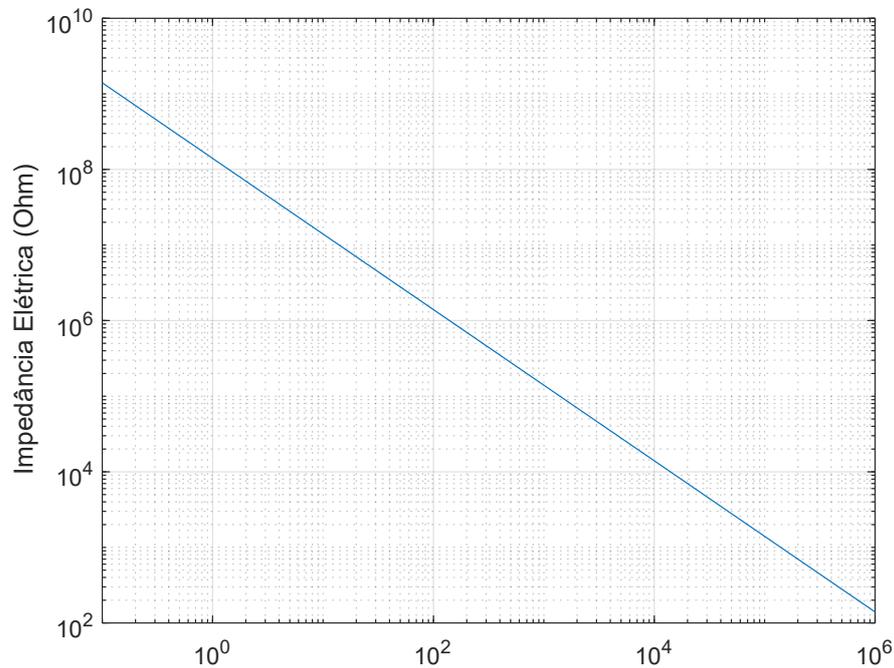


Figura 24: Impedância Elétrica Equivalente do Sensor de filme de PVDF em função da frequência de excitação

A Figura (24), que apresenta o módulo da impedância elétrica equivalente do sensor ao longo da faixa de frequência analisada. O perfil obtido é similar ao da reatância capacitiva ao longo da faixa de frequência, apresentada na Figura (20). Tal resultado pode ser atribuído à associação paralela entre a resistência elétrica e a reatância capacitiva do sensor, apresentado pela Figura (14). Nesta associação, a amplitude da resistência elétrica do sensor de filme de PVDF é significativamente superior à amplitude da reatância capacitiva do sensor. Se estes dois parâmetros forem calculados no limite inferior de frequência, em que a reatância capacitiva apresenta o maior valor, a resistência elétrica do sensor é três ordens de grandeza superior à reatância capacitiva. Para frequências maiores, esta diferença de amplitude ficará ainda mais acentuada. Considerando o módulo dos elementos elétricos supracitados, a tendência de variação dos mesmos em função da frequência e a associação em paralelo dos mesmos, o valor de impedância elétrica de saída do sensor se aproximará do elemento com menor módulo. Desta forma, a impedância equivalente do sensor será muito próxima da reatância capacitiva do mesmo.

## 4.2 Resposta em frequência para sensor de filme de PVDF

Nesta seção, é desenvolvido o estudo da curva de resposta em frequência de um sistema de medição constituído por um sensor de filme de PVDF com dimensões similares às do sensor LDT1-028K fabricado pela Measurement Specialties e equipamento de medição com impedância de entrada de  $10\text{ M}\Omega$ . O objetivo da mesma é permitir identificar as faixas de frequência em que o sinal coletado pelo sistema sofre atenuação e em qual faixa de frequência o mesmo é adequado para utilização, segundo o limiar de atenuação de  $-3\text{dB}$  apresentado na revisão bibliográfica.

O modelo matemático de circuito elétrico equivalente, apresentado na metodologia, permite o estudo de resposta do sistema de medição a partir de análise no domínio da frequência. Através de considerações relativas a dimensões geométricas e propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas do sensor, equivalente ao sensor comercial LDT1-028K (Measurement Specialties), e da impedância de entrada do equipamento de medição, considerado aqui como um osciloscópio com impedância de entrada puramente resistiva de  $10\text{ M}\Omega$ , é possível gerar a curva de resposta em frequência deste sistema em uma longa faixa de frequência (0.1 Hz a 1 MHz). A mesma foi obtida a partir da solução da Equação (48) para uma vasta faixa de frequências de excitação mecânica (0,1 Hz a 1 MHz). Os resultados foram plotados como curva de resposta em frequência, como pode ser visto na Figura (25).

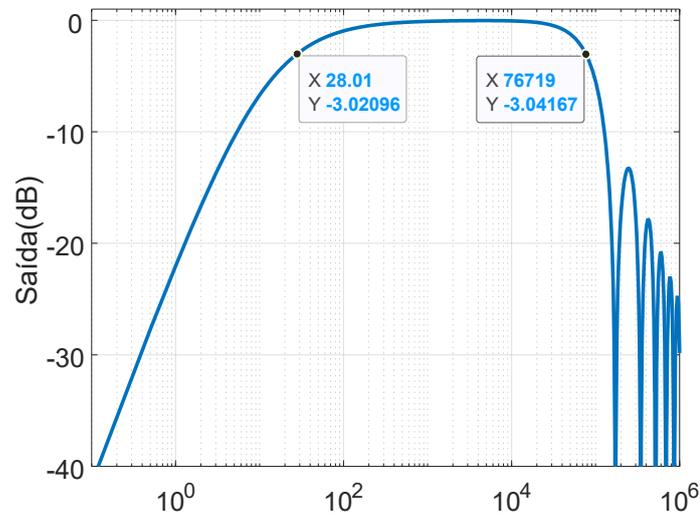


Figura 25: Curva de resposta em frequência para o sensor de filme de PVDF com espessura de 28 $\mu$ m, comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de 10M $\Omega$

Para analisar esta curva, utiliza-se como base a definição de uma amplitude de referência e sua respectiva frequência. Assumindo a amplitude de referência como aquela em que o sinal apresenta uma atenuação de -3dB em relação ao valor máximo, serão indicadas na curva pontos em que esta atenuação ocorre e as frequências características associadas a estes pontos serão denominadas frequências de corte. Adotando esta referência na Figura (25), foram identificados dois pontos e, conseqüentemente, duas frequências de corte (28 Hz e 76,7 kHz). A partir destes pontos, a curva de resposta em frequência do sistema pode ser dividida em três diferentes regiões: A primeira região, situada entre o limite inferior de frequência simulado (0,1 Hz) e a frequência de corte inferior (28 Hz), representa uma região de atenuação da resposta criada pela alta impedância elétrica de saída do sensor de PVDF em baixas frequências. Tal impedância de saída pode ser maior que a própria impedância do equipamento de medição, o que gera uma atenuação relevante na resposta piezoelétrica do sensor às solicitações mecânicas. A segunda região, a intermediária, localizada entre a primeira (28,01 Hz) e a segunda frequência de corte (76,7 kHz), representa uma região na qual a atenuação relativa do sinal do sensor piezoelétrico é baixa, com módulo de atenuação inferior a 3 dB. Esta é a região de frequências mais adequada para uso do sistema para medição,

uma vez que a atenuação da resposta é significativamente baixa. A terceira região, localizada após a segunda frequência de corte (76,7 kHz), representa a região de atenuação devido ao “stress averaging effect” estudado por Kotian *et al* (2013). Esta atenuação, inicialmente observada por Brown (1990) e posteriormente apresentada matematicamente por Kotian (2013), existe devido à interação entre a geometria do sensor e o comprimento da onda de tensão/deformação propagante na estrutura mecânica. A compreensão da atenuação gerada pela interação entre estes fatores pode ser aprimorada a partir da análise da Equação (36). Esta equação representa a tensão elétrica gerada entre os eletrodos do sensor de filme de PVDF como função da média das amplitudes da onda de tensão mecânica atuando ao longo do comprimento do sensor. A integração analítica destas amplitudes ao longo do comprimento do sensor tem como resultado a função sinc normalizada “ $\text{sinc}(\pi fL/c_0)$ ”. Esta função tem, como característica básica, seus zeros localizados onde o argumento é um inteiro. No modelo físico proposto por Kotian *et al* (2013), o argumento desta função será um inteiro quando o comprimento do sensor for igual ou um múltiplo inteiro do comprimento de onda de tensão que se propaga na barra. Se a onda de tensão/deformação propagante na estrutura tiver o comprimento de onda próximo do valor do comprimento do sensor, o sinal elétrico gerado pelo sensor será muito atenuado. Para propósito de uso do filme de PVDF como elemento sensor de ondas de tensão mecânica propagantes, esta região deve ser evitada, uma vez que a sensibilidade do sistema de medição a ondas de tensão/deformação mecânica nesta região de frequência variará intensamente, sendo nula em alguns pontos.

### **4.3 Estudo comparativo entre as curvas de resposta em frequência**

Nesta seção, as curvas de resposta em frequência geradas a partir do modelo de Kotian *et al* (2013) e do modelo complementar (que considera a impedância de saída do sensor e a impedância de entrada do equipamento de medição) apresentado na seção de metodologia desta dissertação são comparadas. O objetivo da mesma é mostrar a contribuição básica que a consideração de impedância elétrica de saída do sensor e impedância elétrica de entrada do

equipamento de medição trazem ao modelo apresentado por Kotian *et al* (2013). Ambas as curvas foram geradas considerando-se um sensor de filme de PVDF com mesmas dimensões geométricas e propriedades que o sensor LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialties. Quanto à impedância de entrada do equipamento de medição, Kotian *et al* (2013) consideram a mesma infinita. No modelo utilizado nesta dissertação, é considerado um equipamento de medição com impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . A comparação entre os modelos foi desenvolvida a partir da geração e comparação de curvas de resposta em frequência, para um sensor de filme de PVDF similar ao LDT1-028K, a partir do modelo original de Kotian *et al* (2013), expresso pela Equação (36), e pelo modelo complementar, cuja relação físico matemática está indicada pela Equação (48). A Figura (26) apresenta a plotagem das curvas de resposta em frequência para o sistema de medição considerando os dois modelos.

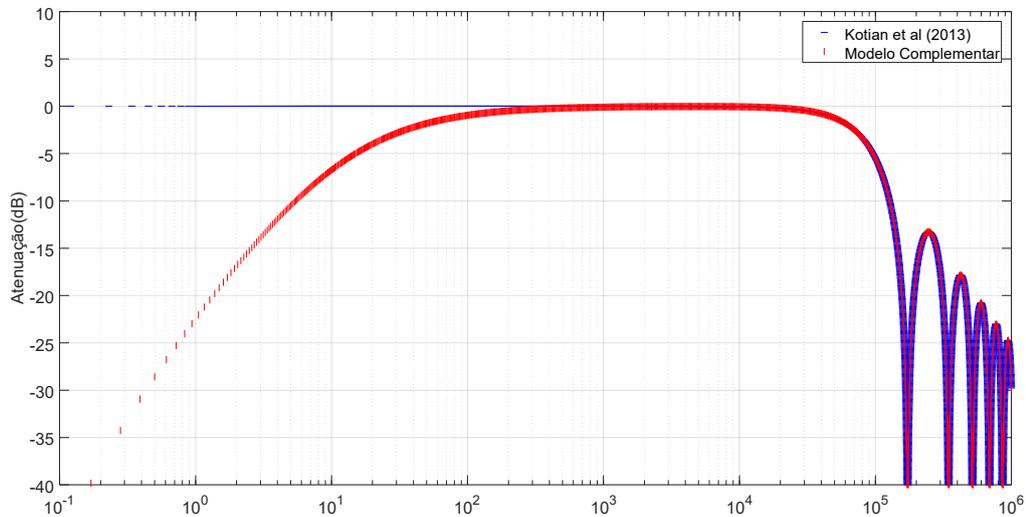


Figura 26: Comparação de curvas de resposta em frequência previstas pelo modelo de Kotian *et al* (2013) e modelo complementar

A análise das curvas de respostas em frequência plotadas nesta figura indica que, para o modelo de Kotian *et al*(2013), a atenuação da amplitude do sinal coletado pelo sistema de medição acontece apenas para altas frequências. Tal atenuação está ligada ao “stress averaging effect” investigado pelos mesmos autores. Quando se compara a curva de resposta em frequência gerada a partir deste modelo com a curva gerada a partir do modelo complementar, observa-se

grande diferença de atenuação do sinal de resposta na faixa de baixas frequências. A atenuação do mesmo em baixas frequências não é prevista pelo modelo de Kotian *et al* (2013) pelo mesmo considerar a impedância de entrada do equipamento de medição *infinita*, de forma que todo o sinal de resposta gerado pelo sensor é transmitido para o equipamento de medição. Desta forma, o efeito de alta impedância elétrica de saída do sensor é completamente ignorado. Tal consideração pode ser válida para ondas de tensão/deformação com altas frequências. Entretanto, para excitações mecânicas com frequências menores, tal consideração pode gerar erros de medição do fenômeno físico. Se considerarmos o limite inferior de frequência simulado (0,1 Hz), a atenuação relativa é próxima a - 40 dB, o que representa uma amplitude de resposta do sistema mais de 100 vezes inferior à respostas do sistema de medição para estímulos com mesma amplitude e frequência mais elevada. Observa-se, por fim, uma sobreposição das curvas de resposta em frequência a partir de uma frequência intermediária. Tal comportamento é consequência da relação entre ambos os modelos. A componente de amplitude de tensão elétrica apresentada pelo modelo matemático adotado nesta dissertação, representado pela Equação (48), é o próprio modelo de resposta do sensor apresentado por Kotian *et al* (2013), indicado pela Equação (36). Como a impedância elétrica do sensor, de natureza resistivo-capacitiva, altera apenas a resposta do sistema em baixas frequências, é esperado que a resposta em médias/altas frequências dos dois modelos sejam equivalentes.

#### **4.4 Influência do comprimento do sensor na resposta em frequência**

Nesta seção, é desenvolvido o estudo da influência do comprimento do sensor na resposta em frequência de um sistema de medição constituído por um sensor de filme de PVDF com dimensões similares às do sensor LDT1-028K fabricado pela Measurement Specialties e equipamento de medição com impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . O objetivo da mesma é identificar como a variação deste parâmetro geométrico altera as frequências de corte do sistema e a largura das faixas de frequência em que o sinal coletado pelo sistema sofre atenuação e em qual faixa de frequência o mesmo é adequado para utilização, segundo o limiar de

atenuação de -3dB apresentado na revisão bibliográfica. Para conduzir tal estudo, são geradas curvas de impedância elétrica de saída do sensor em função do comprimento do sensor e da frequência de excitação através das Equações (37), (41), (46) e (47). Posteriormente, a influência global do comprimento do sensor na resposta em frequência do sistema é avaliada através da solução da Equação (48) para ampla faixa de frequência e comprimentos do sensor.

O circuito equivalente do sistema de medição, representado pela Figura (14), tem os parâmetros  $V_{in}$ ,  $C_{SENSOR}$  e  $R_{SENSOR}$  dependentes do comprimento do sensor ( $L$ ). Por tal relação, esta dimensão geométrica pode ter significativa relevância nas curvas de resposta em frequência de sensores constituídos por filmes de PVDF revestidos por material condutivo. Considerando-se os parâmetros elétricos do sensor apresentados na Figura (14), a variação de comprimento do sensor afeta a capacitância e resistência elétrica de formas opostas. A capacitância elétrica, expressa pela Equação (37), tem uma relação diretamente proporcional com o comprimento do sensor. Desta forma, haverá uma relação linear entre ambos. A resistência elétrica, por sua vez, tem uma relação proporcional inversa dada pela Equação (41). Considerando um sensor de filme PVDF com mesmas propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas que o elemento sensor LDT1-028K e mesmas dimensões geométricas, excetuando o comprimento, que será variado dentro da faixa de 1 a 100 mm, foram geradas curvas que representam a variação de capacitância e resistência elétrica em função do comprimento do sensor. Tais curvas seguem nas Figuras (27) e (28), respectivamente.

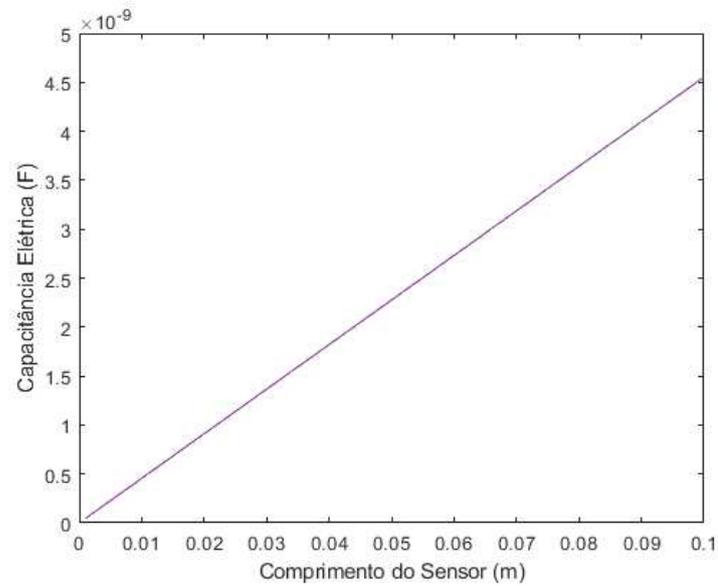


Figura 27: Variação da capacitância elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de seu comprimento

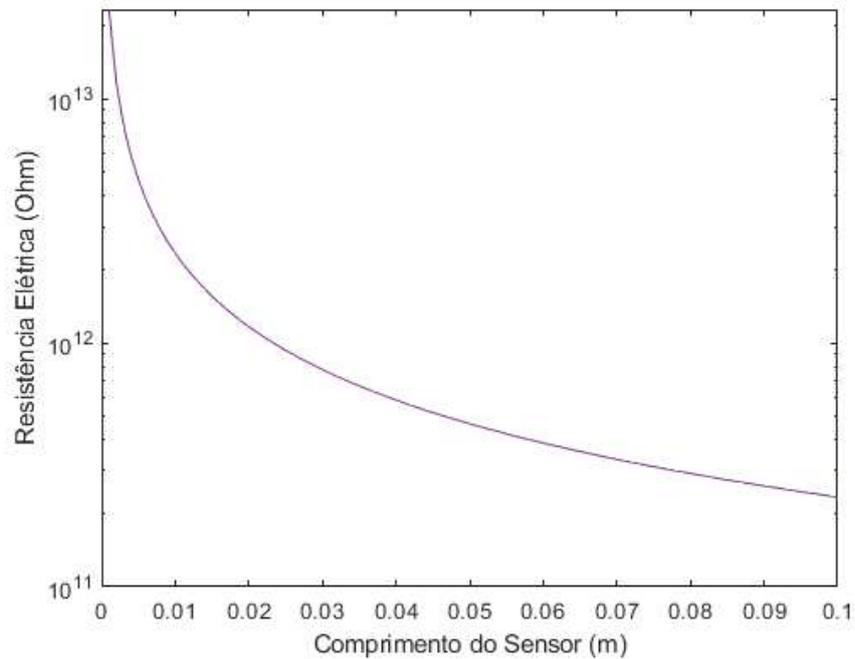


Figura 28: Variação da resistência elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de seu comprimento

Na Figura (28), observa-se a variação significativa da resistência elétrica com o comprimento do sensor. Há a redução de duas ordens de grandeza ( $10^{13}$  para  $10^{11}$ )

$\Omega$ ). A variação do valor de capacitância elétrica é mais discreta. Com o mesmo intervalo de variação de dimensão geométrica, ocorre o incremento da capacitância em apenas uma ordem de grandeza ( $10^{-10}$  F para  $10^{-9}$  F).

Para consideração da relação entre a tensão elétrica gerada pelo sensor, dada pela Equação (36) e a tensão elétrica lida pelo equipamento de medição, dada pela Equação (48), é necessário calcular a reatância capacitiva, dada pela Equação (46). A solução da desta equação para vários comprimentos (1 mm a 100 mm) e frequências (1 Hz a 100kHz) pode ser vista na Figura (27), que apresenta as relações de variação da reatância capacitiva do sensor em função da frequência do sinal de excitação e do comprimento do sensor.

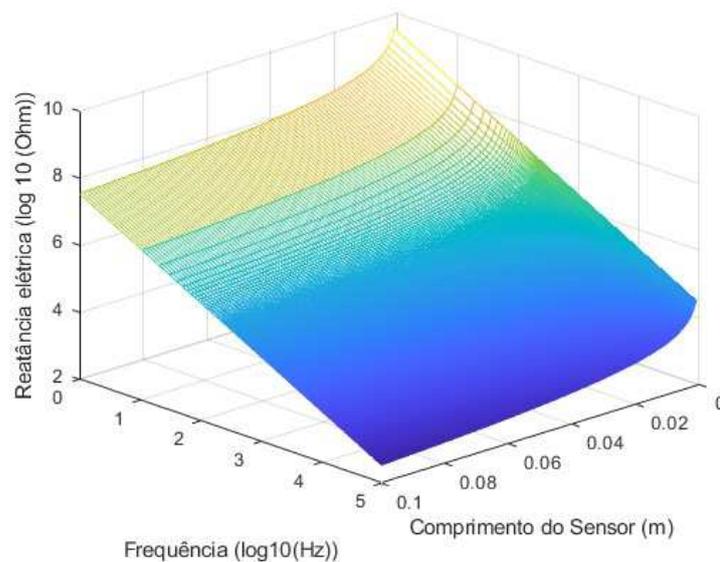


Figura 29: Variação do módulo da Reatância Capacitiva do sensor de filme de PVDF em função de seu comprimento e frequência do sinal de excitação

Com relação à frequência de excitação do sensor, a relação de proporcionalidade inversa com a reatância capacitiva é clara, dada pela Equação (46). No caso de comprimento, é necessário considerar que a capacitância elétrica é diretamente proporcional ao comprimento do sensor, conforme indicado pela Equação (37). Como a capacitância, por sua vez, tem relação de proporcionalidade inversa com a reatância capacitiva, o incremento da capacitância gerará a redução da reatância capacitiva. Desta forma, tanto a frequência do sinal quanto o comprimento do sensor são inversamente proporcionais à reatância capacitiva do

sensor. Cabe observar que, devido ao comportamento matemático assintótico de tal relação, a reatância capacitiva do sensor incrementará bruscamente quanto o comprimento e/ou frequência de excitação tornarem-se muito inferiores à unidade.

A associação elétrica em paralelo entre a reatância capacitiva do sensor (Figura (29)) e a resistência elétrica, apresentada (Figura (28)), dá origem à impedância elétrica total do sensor. A Equação (47), que representa esta associação, foi calculada para a faixa de comprimentos (1 mm a 100 mm) e faixa de frequência (1 Hz a  $10^5$  Hz). O resultado de tal relação segue representado na Figura (30).

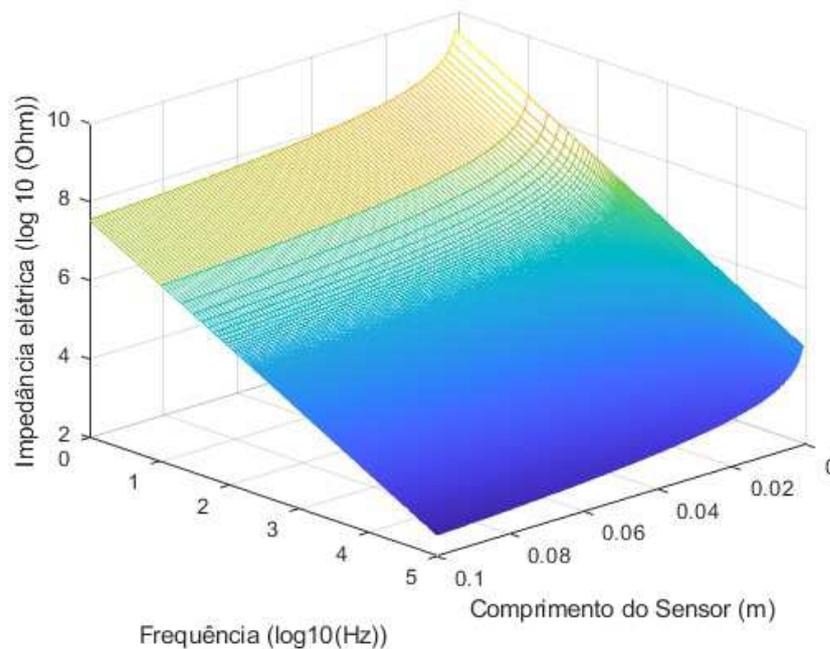


Figura 30: Variação do módulo da Impedância Elétrica do sensor de filme de PVDF em função de seu comprimento e frequência

A Figura (30) assemelha-se à curva de reatância capacitiva (Figura (29)) calculada nos mesmos intervalos de frequência de excitação e comprimento do sensor. Tal resultado justifica-se pela associação paralela da resistência elétrica e reatância capacitiva, sendo o módulo do primeiro muito superior ao do outro. Ao comparar-se o módulo destas duas componentes de impedância a partir das Figuras (28) e (29), percebe-se que a resistência elétrica tem módulo significativamente superior à reatância capacitiva. Desta forma, a associação paralela das mesmas, para todas as frequências e comprimentos simulados, terá sua natureza

determinada pela reatância capacitiva, que tem menor módulo na associação elétrica paralela.

Uma vez que a impedância elétrica do sensor foi avaliada para vários comprimentos e frequências, procede-se agora a avaliação de efeito da variação do comprimento do sensor de filme de PVDF na curva de resposta em frequência do sistema de medição. O sensor aqui considerado tem propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas idênticas ao sensor comercial LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialties. Suas dimensões geométricas também coincidem, com exceção do comprimento, que é variado de 1 mm a 100 mm. O equipamento de medição considerado é um osciloscópio comercial, com típica impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . Para estas condições indicadas, curvas de resposta em frequência foram geradas para alguns comprimentos específicos utilizando a Equação (48). Como pode ser visto nas Figuras (31) e (32), a largura da faixa de frequência localizada entre as frequências de corte é sensivelmente alterada com a variação do comprimento do sensor. Na Figura (31), onde o sensor simulado tem seu comprimento reduzido para 10,6 mm (um terço do comprimento padrão), as frequências de corte foram incrementadas de 28 Hz e 76,7 kHz (Figura (25)) para 84,51 Hz e 229,9 kHz, respectivamente. Como consequência direta, a faixa de frequência em que este sensor pode ser utilizado sem significativa atenuação do sinal é ampliada em relação ao sensor LDT1-028K (Figura (25)). Para a Figura (32), onde o sensor simulado tem seu comprimento incrementado para 96 mm (três vezes seu tamanho original), as frequências de corte são reduzidas de 28 Hz para 9,51 Hz e de 76,7 kHz para 25,5 kHz. Para este caso, a largura da faixa de frequência onde não há atenuação significativa do sinal é reduzida para um terço da largura da faixa de frequência do sensor padrão.

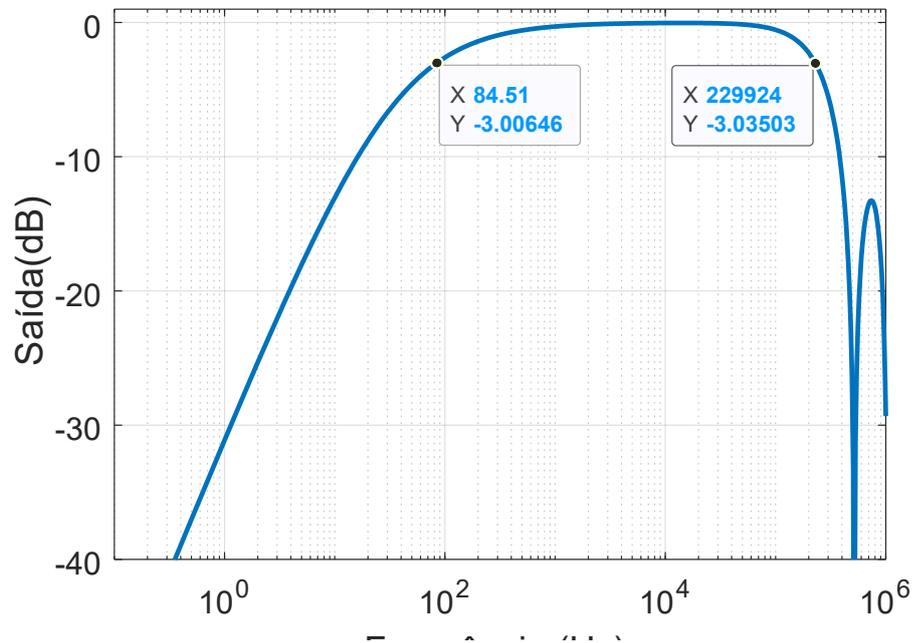


Figura 31: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$ , comprimento de 10 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.

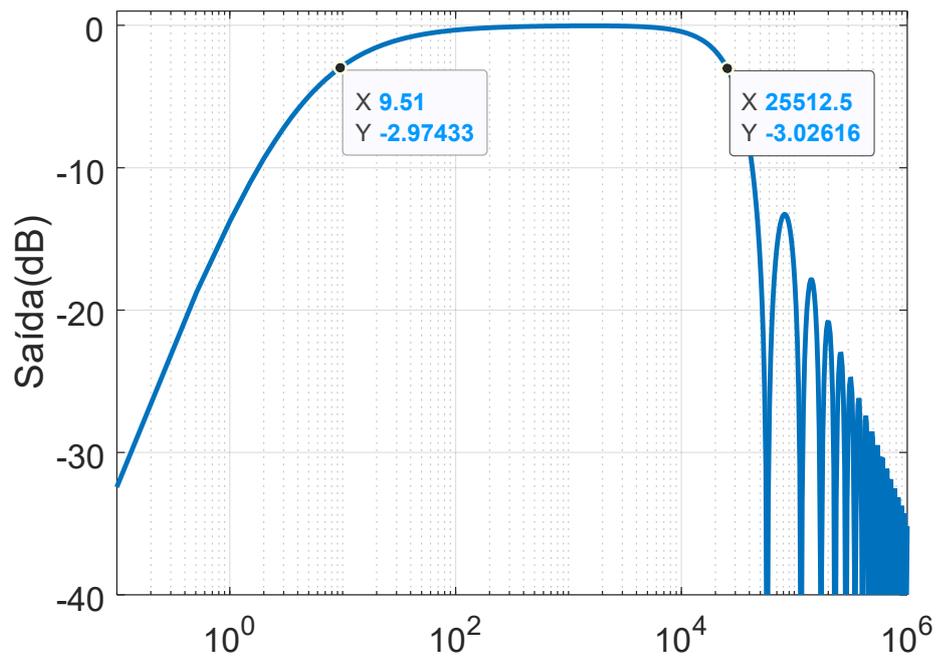


Figura 32: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$ , comprimento de 96 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.

A comparação entre as Figuras (25), (31) e (32) permite identificar algumas tendências relevantes. A primeira delas é a existência de uma relação inversa entre o comprimento do sensor e os valores absolutos das frequências de corte do sistema. Sensores com comprimentos menor ao sensor adotado como referência (LDT1-028K) têm suas frequências de corte superiores às frequências de corte do sensor com comprimento padrão. Sensores com comprimento maior do que o adotado como referência (LDT1-028K), por sua vez, apresentam frequências de corte com valores absolutos menores do que as do sensor com comprimento padrão. Isto significa que sensores com maiores comprimentos apresentam menor atenuação de sinal a baixas frequências. A segunda tendência identificada está ligada à relação inversa entre o comprimento do sensor e a largura da faixa de frequência do sistema. Sensores com menores comprimentos apresentaram curvas de resposta em frequência (Figura (31)) com maior largura de faixa de frequência entre as frequências de corte do que sensores com maior comprimento (Figura (32)). Isto significa que sensores com menores comprimentos apresentam possibilidade de uso em maior espectro de frequência, com destaque pra altas frequências, onde sensores com maiores comprimentos já apresentam sinal de resposta atenuado pelo “stress averaging effect”.

Para avaliar a influência do comprimento do sensor de filme de PVDF na curva de resposta em frequência do sistema de medição de forma ampliada, soluções da Equação (48) para uma faixa de comprimentos do sensor (1 mm a 100 mm) e ampla faixa de frequência de ondas mecânicas foram plotadas, conforme apresentam as Figuras (33) e (36).

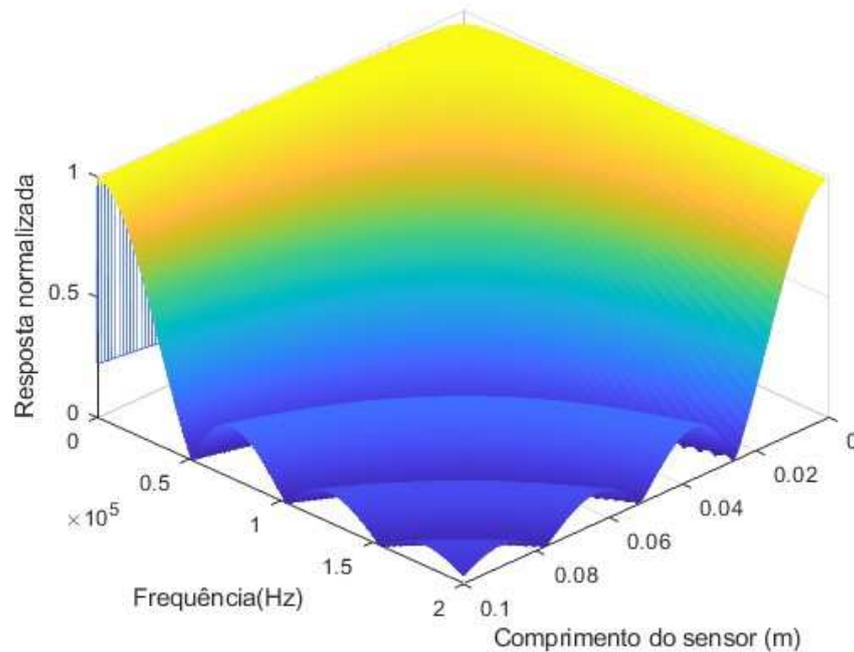


Figura 33: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Comprimento variado entre 1 mm e 100 mm. Faixa de frequência entre 1 Hz e 200kHz

Na Figura (33), é possível identificar uma significativa influência do comprimento do sensor na resposta em frequência do sistema de medição. É possível identificar, na faixa de altas frequências, a diferença de amplitude de resposta entre sensores com variados comprimentos. Percebe-se que, para sensores com menores comprimentos, a amplitude da resposta nesta faixa de frequência é pouco atenuada; para sensores com maiores comprimentos, a resposta do sensor sofre significativa atenuação, tendendo a ser nula em alguns pontos. Esta percepção de influência do comprimento do sensor pode ser aprimorada a partir de vistas em corte da curva de Resposta em Frequência apresentada na Figura (33). Estas vistas em corte, apresentadas para as frequências de excitação de 100 kHz e 200 kHz nas Figuras (34) e (35), respectivamente, mostram que o incremento do comprimento do sensor atenua a amplitude de resposta do sistema. A comparação entre as duas figuras revela ainda que esta atenuação de resposta torna-se mais severa e mais abrangente em relação aos comprimentos do sensor conforme a frequência de excitação aumenta.

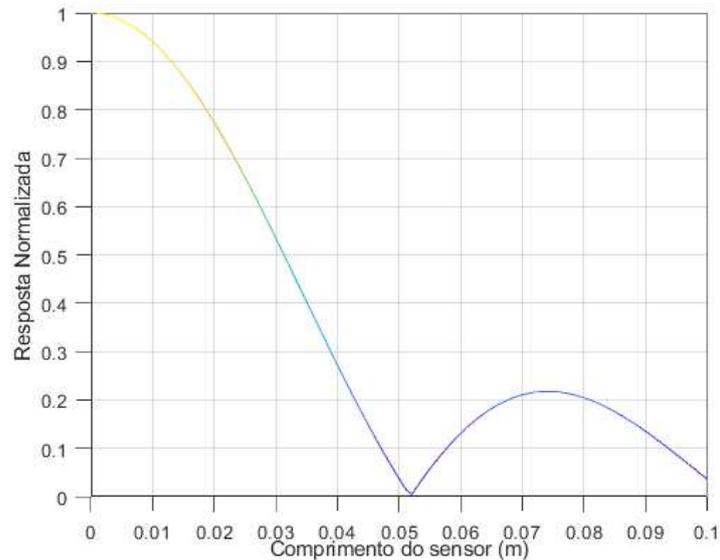


Figura 34: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 100 kHz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.

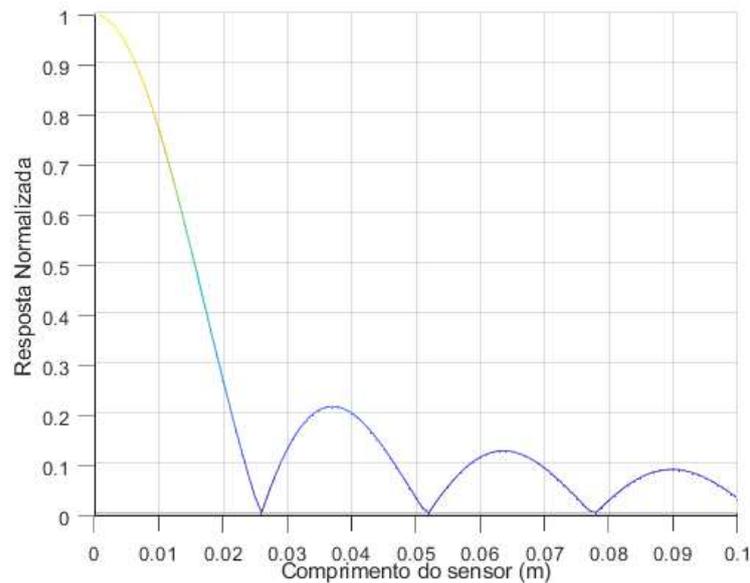


Figura 35: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 200 kHz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.

Tal variação no conjunto de respostas em frequência do sistema para sensores com diferentes comprimentos está relacionada ao já discutido “stress

averaging effect”, definido por Kotian *et al* (2013). Este efeito tem como consequência uma atenuação do sinal piezoelétrico gerado pelo sensor em situações em que o comprimento do sensor seja igual ou múltiplo do comprimento da onda propagante na estrutura. Considerando a teoria da física de ondas, a relação entre o comprimento de onda propagante e a frequência da mesma é proporcional inversa ( $c = \lambda.f$ ) : ondas propagantes com maiores frequências terão menores comprimentos de onda; ondas propagantes com menores frequências terão maiores comprimentos de onda. Correlacionando o “stress averaging effect” com esta relação física de ondas, sensores com maiores comprimentos começarão a apresentar o “stress averaging effect” quando estiverem expostos a ondas mecânicas com maiores comprimentos de ondas, o que significa, pela relação física mencionada, ondas com menores frequências. Sensores com comprimentos menores, por sua vez, apresentarão o “ stress averaging effect”, quando forem expostas a ondas propagantes com menores comprimentos de ondas, o que significa, pela relação física mencionada, ondas com maiores frequências.

No campo das baixas frequências, a influência do comprimento do sensor também é significativa. Na Figura (36), gerada a partir da solução da Equação (48) para a faixa de frequência de 1 Hz a 200 Hz (escolhida arbitrariamente) que os sistemas constituídos por sensores com menores comprimentos apresentam significativa atenuação do sinal coletado.

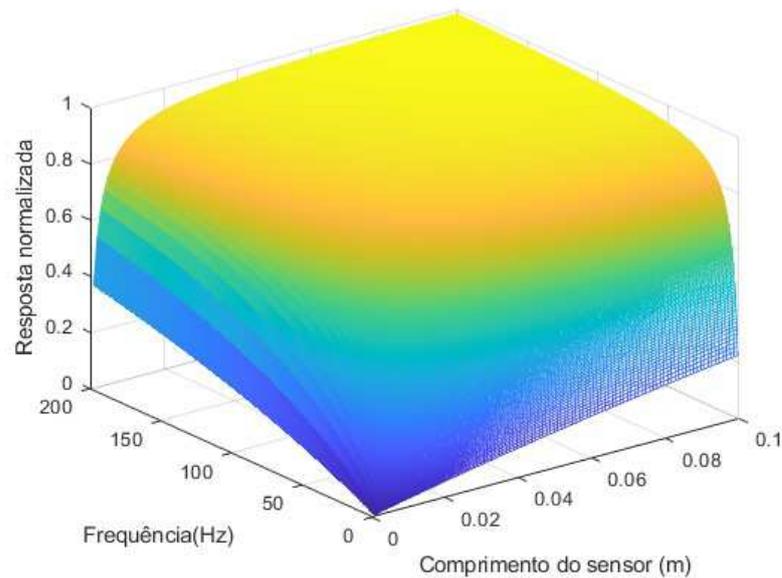


Figura 36: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Comprimento variado entre 1 mm e 100 mm. Faixa de frequência entre 1 Hz e 200 Hz

Nas faixas extremas de frequência (1 e 200 Hz), que podem ser vistas nas vistas em corte apresentadas pelas Figuras (37) e (38), é possível observar a diferença da amplitude de resposta do sistema de medição constituídos por sensores de filme de PVDF com vários comprimentos. A vista em corte da curva de resposta em frequência do sistema, gerada para limite inferior de frequência (1 Hz), apresentada na Figura (37), mostra uma variação de amplitude de resposta do sistema em função do comprimento próxima a uma reta, em que a magnitude da resposta aumenta com o aumento do comprimento do sensor. O baixo valor de resposta para todos os comprimentos simulados está atrelado à baixa frequência e, como consequência, alta reatância capacitiva de saída do sensor, Tal reatância capacitiva, pela relação expressa pela Equação (48), faz com que a amplitude do sinal coletado seja relativamente pequena.

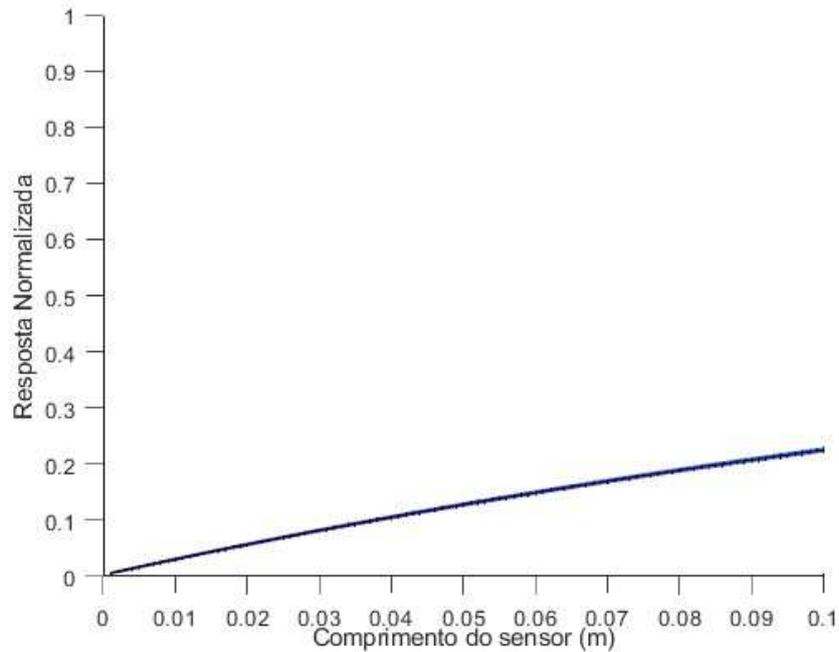


Figura 37: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 1 Hz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.

A vista em corte da curva de resposta em frequência do sistema, gerada para limite inferior de frequência (200 Hz), apresentada na Figura (38), mostra uma variação de amplitude de resposta em função do comprimento mais abrupta. Sensores com menores comprimentos, por apresentarem menor capacitância e, conseqüentemente, apresentarem maior reatância capacitiva, reduzem a amplitude de resposta do sistema enquanto sensores com maiores comprimentos, por terem maior capacitância e, conseqüentemente, menor reatância capacitiva, geram uma amplitude de resposta maior.

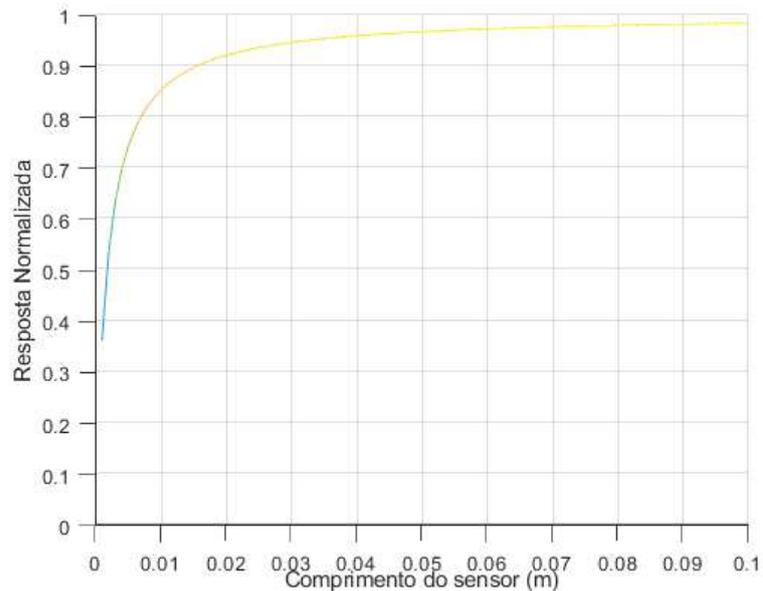


Figura 38: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura de 12mm e equipamento de medição com entrada de 10 Mohm para excitação com frequência de 200 Hz. Comprimento do sensor variado entre 1 mm e 100 mm.

Tal conjunto de resultados podem ser usados como guia básico na escolha de comprimento do sensor de filme de PVDF para medição de amplitude de ondas de tensão/deformação mecânica propagantes na estrutura com variada faixas de frequência. Para o estudo de ondas de tensão/deformação mecânica longitudinal com menores frequências, pode ser interessante usar sensores com maiores comprimentos, uma vez que os mesmos geram menor atenuação do sinal coletado pelo sistema de medição em baixas frequências. Para o estudo de ondas de tensão/deformação mecânica caracterizadas por maiores frequências, sensores com menores comprimentos podem ser mais adequados, uma vez que eles geram menor atenuação da resposta do sistema de medição pelo “stress averaging effect” .

#### 4.5 Influência da largura do sensor na resposta em frequência

Nesta seção, é desenvolvido o estudo da influência de largura do sensor na resposta em frequência de um sistema de medição constituído por um sensor de filme de PVDF com dimensões similares às do sensor LDT1-028K fabricado pela Measurement Specialties e equipamento de medição com impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . O objetivo da mesma é identificar como a variação deste parâmetro geométrico altera as frequências de corte do sistema e a largura das faixas de frequência em que o sinal coletado pelo sistema sofre atenuação e em qual faixa de frequência o mesmo é adequado para utilização, segundo o limiar de atenuação de -3dB apresentado na revisão bibliográfica. Para conduzir tal estudo, são geradas curvas de impedância elétrica de saída do sensor em função da largura do sensor e da frequência de excitação através das Equações (37), (41), (46) e (47). Posteriormente, a influência global do comprimento do sensor na resposta em frequência do sistema é avaliada através da solução da Equação (48) para ampla faixa de frequência e larguras do sensor.

O circuito equivalente do sistema de medição, representado pela Figura (14), tem os parâmetros  $C_{\text{SENSOR}}$  e  $R_{\text{SENSOR}}$  dependentes da largura do sensor ( $w$ ). Por tal relação, este parâmetro pode ter relevância nas curvas de resposta em frequência de sistemas de medição constituídos por sensores de filmes de PVDF.

Considerando-se os parâmetros elétricos de capacitância e resistência do sensor, apresentados na Figura (14), a variação de largura do sensor afeta a capacitância e resistência elétrica de formas opostas. A capacitância elétrica, expressa pela Equação (37), tem uma relação diretamente proporcional com a largura do sensor. Desta forma, haverá uma relação linear entre ambos. A resistência elétrica, por sua vez, tem uma relação proporcional inversa dada pela Equação (41). Considerando um sensor de filme PVDF com mesmas propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas que o elemento sensor LDT1-028K e mesmas dimensões geométricas, excetuando a largura, que foi variada dentro da faixa de 1 a 50 mm, foram geradas curvas que representam a variação de capacitância e resistência elétrica em função da largura do sensor. Tais resultados foram apresentados nas Figuras (39) e (40). Conforme apresentado na Figura (39), há uma

relação diretamente proporcional entre a largura e a capacitância elétrica do sensor. A relação físico-matemática existente entre a resistência elétrica e largura é proporcional inversa, conforme a Figura (40) mostra. É importante notar que a variação da resistência elétrica em função da largura do sensor é muito mais significativa do que a variação da capacitância elétrica em função do mesmo parâmetro.

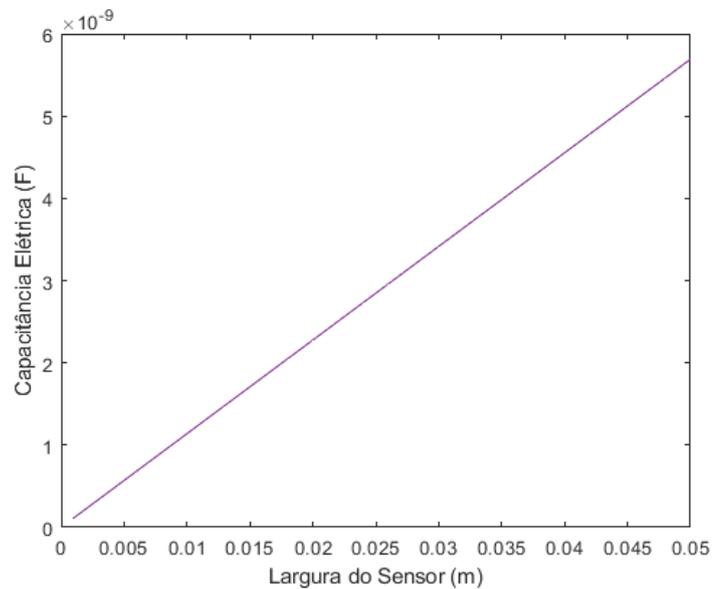


Figura 39: Variação da capacitância elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua largura

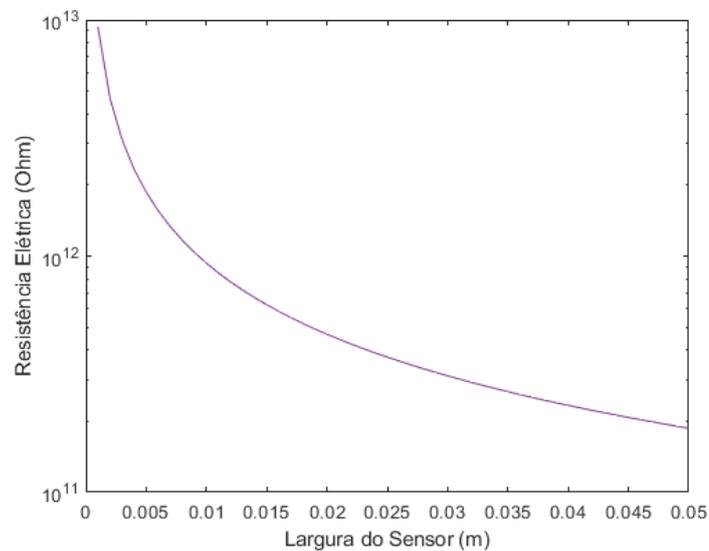


Figura 40: Variação da resistência elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua largura

De forma a averiguar a variação de reatância capacitiva dos sensores de filme de PVDF em função tanto da largura do sensor quanto do espectro de frequências da onda de tensão/deformação mecânica atuante na estrutura, solucionou-se a Equação (46) para sensores de filme de PVDF similares ao sensor LDT1-028 K, com comprimento de 30 mm, espessura de 28  $\mu\text{m}$  e largura variada entre 1 mm e 50 mm. A frequência simulada variou de 1 Hz a 1 MHz. Os resultados seguem na Figura (41).

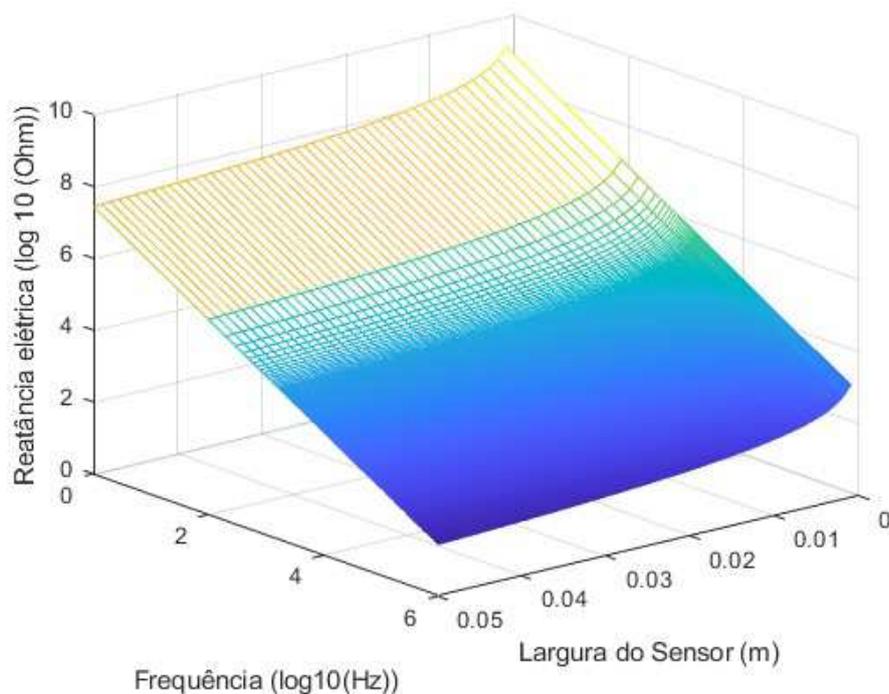


Figura 41: Variação do módulo da Reatância Capacitiva do sensor de filme de PVDF em função de sua largura e frequência

A partir da Figura (41) é possível perceber que a reatância capacitiva do sensor diminui tanto com o aumento da largura do mesmo quanto com o aumento da frequência da onda de tensão/deformação mecânica atuante na estrutura. Se a reatância capacitiva dos sensores for analisada para a faixa de larguras de sensor simuladas em um valor de frequência constante, a variação de reatância capacitiva entre os sensores não é tão significativa. Se for analisada a reatância capacitiva do sensor para uma frequência de 100 Hz, o valor máximo será de  $10^7 \Omega$  para um sensor com largura de 1 mm e o valor mínimo será de  $10^5 \Omega$  para um sensor com largura de 50 mm. Considerando, por outro lado, sensores com uma largura

determinada, a variação de reatância capacitiva será muito significativa. Se for analisada a impedância de um sensor com largura de 50 mm, a reatância capacitiva máxima ocorrerá para a frequência de 1 Hz, com valor deste parâmetro superior a  $10^7 \Omega$ . A reatância capacitiva mínima ocorrerá para a frequência de 1 MHz, com valor próximo à  $10^1 \Omega$ .

A associação elétrica em paralelo entre a reatância capacitiva do sensor e a resistência elétrica, indicada na Figura (42), dá origem à impedância elétrica total de saída do sensor. Este parâmetro foi calculado a partir da Equação (47) para a faixa de largura (1 mm a 50 mm) e faixa de frequência (1 Hz à  $10^6$  Hz), Na Figura (42) são apresentados os resultados obtidos..

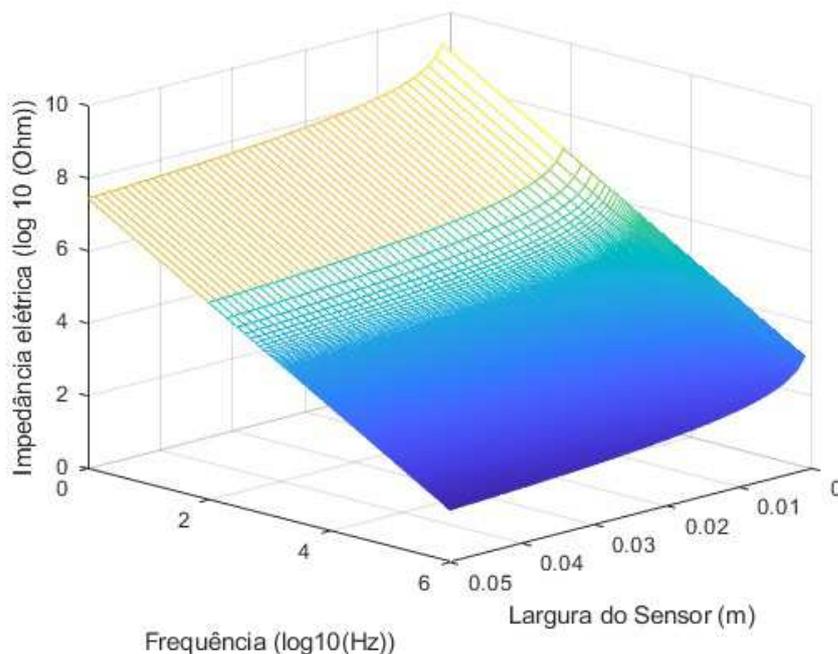


Figura 42: Variação do módulo da impedância elétrica do sensor de filme de PVDF em função de sua largura e frequência

A curva de variação da impedância elétrica do sensor em função de sua largura e frequência, apresentada na Figura (42), tem comportamento similar à curva de reatância capacitiva representada pela Figura (41). Tal similaridade entre curvas explica-se pela associação paralela entre as componentes elétricas de resistência e capacitância elétrica no circuito elétrico de medição apresentado pela Figura (40). A magnitude da resistência elétrica, apresentada na Figura (40) é ordens de grandeza

superior à reatância capacitiva do sensor em todas as larguras e frequências simuladas, apresentada na Figura (41). Por esta relação de magnitude entre os dois parâmetros elétricos e a associação paralela dos mesmos no modelo equivalente, a impedância elétrica do sensor, para todas as frequências e larguras simuladas, comporta-se como a reatância capacitiva do sensor.

Uma vez que a impedância elétrica do sensor foi avaliada para várias larguras e frequências, procede-se agora a avaliação do efeito da variação de largura do sensor de filme de PVDF na curva de resposta em frequência do sistema de medição. O sensor aqui considerado tem propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas idênticas ao sensor comercial LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialties. Suas dimensões geométricas também coincidem, com exceção da largura, que é variado de 1 mm a 50 mm. O equipamento de medição considerado é um osciloscópio comercial, com típica impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . Para estas condições indicadas, curvas de resposta em frequência foram geradas para algumas larguras específicas. Como pode ser visto nas Figuras (43) e (44), a variação da largura do sensor gera mudança na amplitude de sistema do sistema a entradas com baixas frequências. Na Figura (43), onde o sensor simulado tem sua largura reduzida para 4 mm (um terço da largura padrão), a frequência de corte inferior foi incrementada de 28 Hz para 84,5 Hz. Para a Figura (44), onde o sensor simulado tem sua largura incrementada para 36 mm (três vezes seu tamanho original), a frequência de corte inferior foi reduzida de 28 Hz para 9,51 Hz. Para este caso, a frequência de corte do sistema é reduzida para um terço da frequência de corte do sensor com largura original.

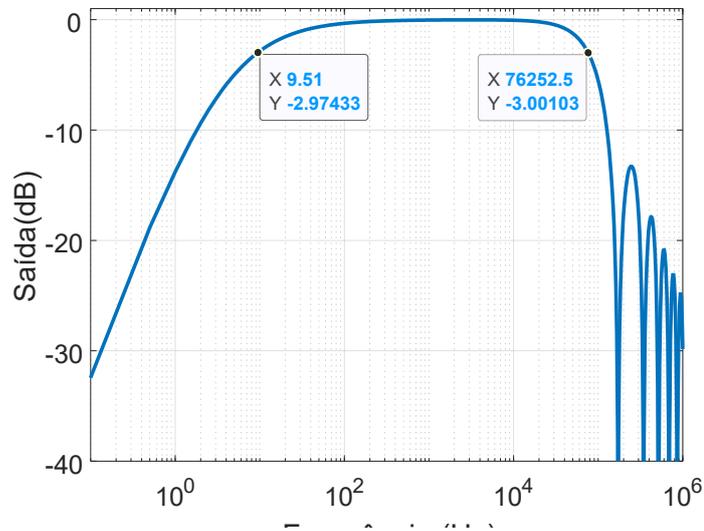


Figura 43: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 µm, comprimento de 30 mm e largura de 36 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.

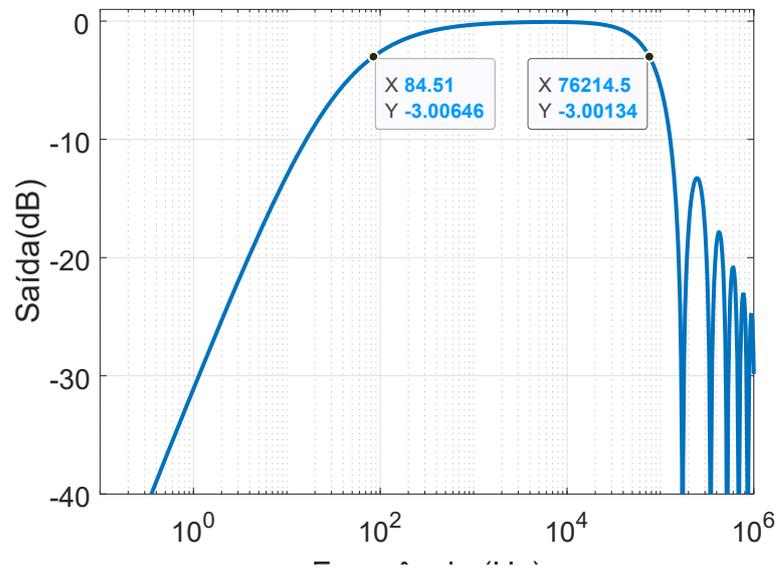


Figura 44: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28 µm, comprimento de 30 mm e largura de 4 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.

De forma a avaliar o efeito da variação de largura do sensor na amplitude de resposta do sistema de medição, a Equação (48) foi solucionada para diferentes larguras de sensor (1 a 50 mm) e frequências de ondas de tensão/deformação atuantes na estrutura (1 Hz a 200 Hz) (Figura (44)).

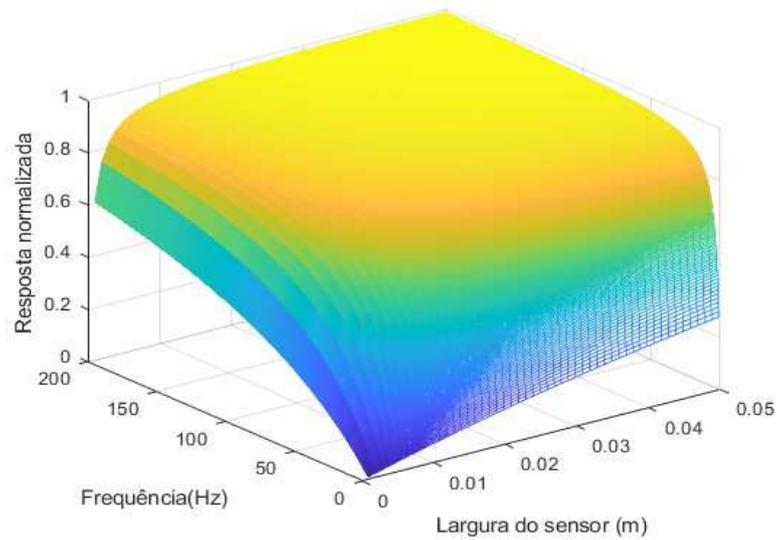


Figura 45: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e comprimento de 32 mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Largura variada entre 1 mm e 100 mm. Faixa de frequência variada entre 1 Hz e 200 Hz

Nas faixas extremas de frequência (1 e 200 Hz), que podem ser vistas nas vistas em corte apresentadas pelas Figuras (46) e (47), é possível observar a diferença da amplitude de resposta do sistema de medição constituídos por sensores de filme de PVDF com várias larguras.

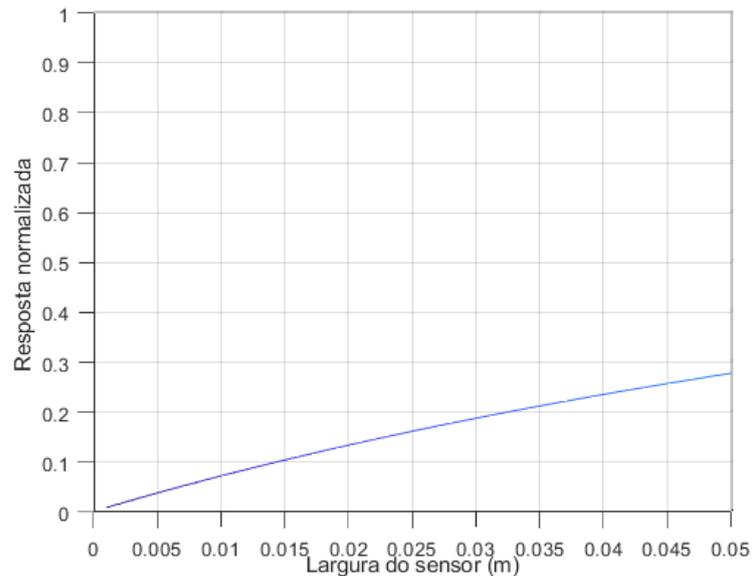


Figura 46: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e comprimento de 30 mm. Largura do sensor variado entre 1 mm e 50 mm. Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 1 Hz.

A vista em corte da curva de resposta em frequência do sistema, gerada para limite inferior de frequência (1 Hz), apresentada na Figura (46), mostra uma variação de amplitude de resposta do sistema em função da largura próxima a uma reta, em que a magnitude da resposta aumenta com o aumento da largura do sensor. O baixo valor de resposta para todas as larguras simuladas está atrelado à baixa frequência e, como consequência, alta reatância capacitiva de saída do sensor, Tal reatância capacitiva, pela relação expressa pela Equação (48), faz com que a amplitude do sinal coletado seja relativamente pequena.

A vista em corte da curva de resposta em frequência do sistema, gerada para limite superior de frequência (200 Hz), apresentada na Figura (47), mostra uma variação de amplitude de resposta do sistema mais abrupta em função da largura do sensor. Sensores com menores larguras, por apresentarem menor capacitância e, conseqüentemente, apresentarem maior reatância capacitiva, reduzem a amplitude de resposta do sistema enquanto sensores com maiores larguras, por terem maior capacitância e, conseqüentemente, menor reatância capacitiva, geram uma amplitude de resposta maior do sistema.

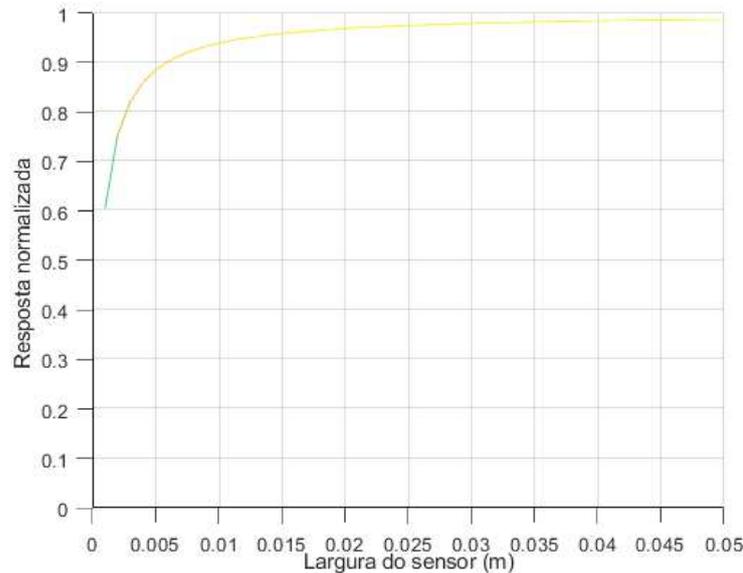


Figura 47: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$  e comprimento de 30 mm. Largura do sensor variado entre 1 mm e 50 mm. Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 200 Hz.

Para esta frequência, sensores com larguras entre 1 mm e 3 mm geram atenuação do sinal de resposta mais significativa. Para valores maiores de largura, a resposta do sistema de medição aproxima-se do valor máximo, sendo a atenuação pouco relevante. Se considerarmos o sensor com maiores larguras, a atenuação da resposta do sistema é mais significativa nas menores frequências, sendo a faixa de frequências em que tal comportamento deve ser considerado é cada vez menor.

Este conjunto de resultados em baixa frequência está relacionado à própria amplitude da impedância elétrica do sensor. Conforme apresentado na Figura (42), sensores de menor largura expostos a sinais com menores frequências apresentam elevada reatância capacitiva. Tal valor de reatância capacitiva faz com que o sinal coletado pelo equipamento de medição seja inferior ao sinal gerado pelo sensor de filme de PVDF.

#### 4.6 Influência da espessura do sensor na resposta em frequência

Nesta seção, é desenvolvido o estudo da influência da espessura do sensor na resposta em frequência de um sistema de medição constituído por um sensor de filme de PVDF com dimensões similares às do sensor LDT1-028K fabricado pela Measurement Specialties e equipamento de medição com impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . O objetivo da mesma é identificar como a variação deste parâmetro geométrico altera as frequências de corte do sistema e a largura das faixas de frequência em que o sinal coletado pelo sistema sofre atenuação e em qual faixa de frequência o mesmo é adequado para utilização, segundo o limiar de atenuação de -3dB apresentado na revisão bibliográfica. Para conduzir tal estudo, são geradas curvas de impedância elétrica de saída do sensor em função da espessura do sensor e da frequência de excitação através das Equações (37), (41), (46) e (47). Posteriormente, a influência global da espessura do sensor na resposta em frequência do sistema é avaliada através da solução da Equação (48) para ampla faixa de frequência e comprimentos do sensor.

O circuito equivalente do sistema de medição, representado pela Figura (14), tem os parâmetros  $V_{in}$ ,  $C_{SENSOR}$  e  $R_{SENSOR}$  dependentes da espessura do sensor ( $h$ ). Por tal relação, este parâmetro pode ter significativa relevância nas curvas de resposta em frequência do sistema de medição constituído por filmes de PVDF e equipamento de medição de parâmetros elétricos. Considerando-se os parâmetros elétricos do sensor apresentados na Figura (14), a variação da espessura do sensor afeta a capacitância e resistência elétrica de formas opostas. A capacitância elétrica, expressa pela Equação (37), tem uma relação proporcional inversa com a espessura do sensor. A resistência elétrica, expressa pela Equação (41), tem uma relação proporcional direta com tal parâmetro geométrico. A avaliação matemática destas relações pode ser feita a partir da plotagem da solução destas equações para um intervalo contínuo de espessuras. Considerando um sensor de filme de PVDF com mesmas propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas que o elemento sensor LDT1-028K e mesmas dimensões geométricas, excetuando a espessura, que será variado dentro da faixa de 1 um a 100 um, a variação de capacitância e resistência

elétrica em função da espessura do sensor são dadas pelas Figuras (48) e (49), respectivamente.

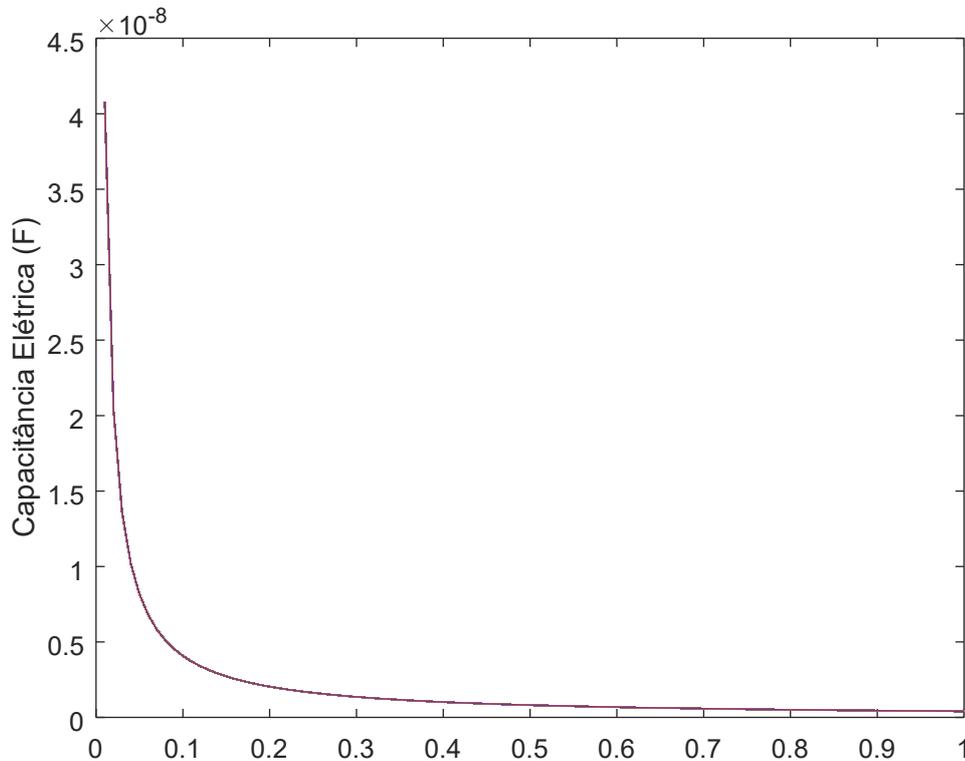


Figura 48: Variação da capacitância elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua espessura

Na Figura (48), observa-se a variação significativa da capacitância elétrica do sensor com a espessura do sensor. Há a redução de duas ordens de grandeza ( $10^{-8}$  para  $10^{-10}$  F). A forma de variação da capacitância em função da espessura apresentada pela Figura (48) é assintótica, típica de uma relação proporcional inversa, expressa pela Equação (37).

Na Figura (49), observa-se a variação do valor de resistência elétrica em função da espessura do sensor. Ocorre o incremento de apenas uma ordem de grandeza ( $10^{11}$  para  $10^{12}$   $\Omega$ ). A forma da variação da resistência elétrica em função da espessura, é linear, típica de uma relação proporcional direta, como expressa pela Equação (41).

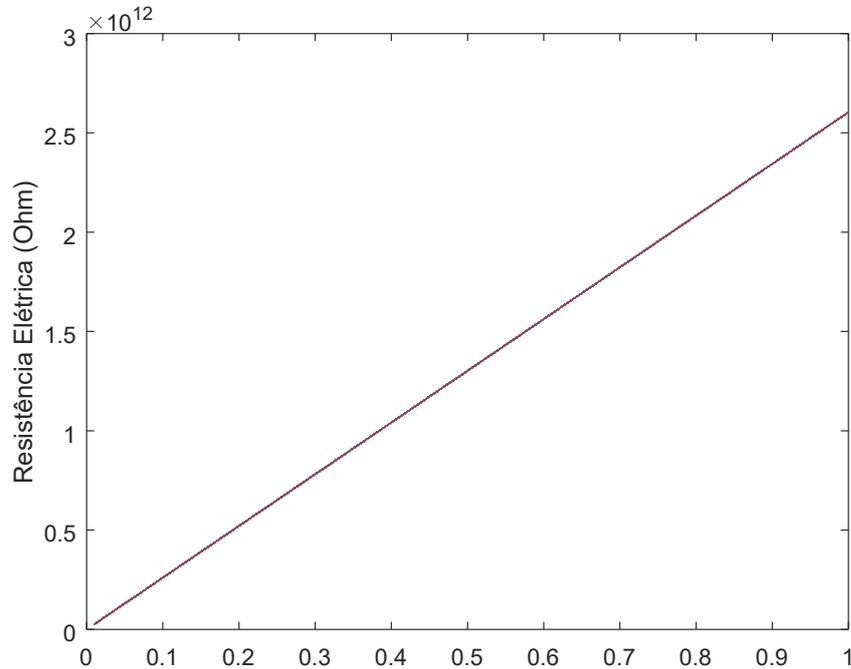


Figura 49: Variação da resistência elétrica do sensor do filme de PVDF em função da variação de sua espessura

Para consideração da relação entre a tensão elétrica gerada pelo sensor e a tensão elétrica lida pelo equipamento de medição, dada pela Equação (48), é necessário calcular a reatância capacitiva, dada pela Equação (46). A solução da desta equação para várias espessuras (1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ) e frequências (1 Hz a 1MHz) pode ser vista na Figura (50).

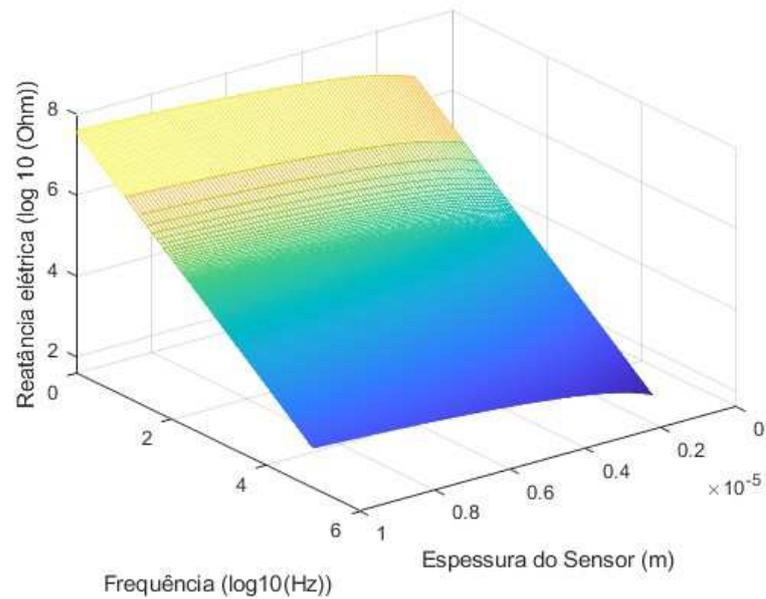


Figura 50: Variação do módulo da reatância capacitiva do sensor de filme de PVDF em função de sua espessura e frequência

Para a frequência de excitação do sensor, a relação de proporcionalidade inversa é clara, dada pela Equação (46). Para a espessura, é necessário considerar que a capacitância elétrica é inversamente proporcional à espessura do sensor, conforme apresentado pela Equação (37). Como a capacitância, por sua vez, também tem relação de proporcionalidade inversa com a reatância capacitiva, conforme indicado pela Equação (46), o incremento da espessura gerará o incremento da reatância capacitiva. A variação de cada um destes parâmetros terá efeitos opostos.

A associação elétrica em paralelo entre a reatância capacitiva do sensor, apresentada na Figura (50) e a resistência elétrica, apresentada na Figura (49), dá origem à impedância elétrica total do sensor. A Equação (47), que representa esta associação, foi calculada para a faixa de espessuras (1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ) e faixa de frequência (1 Hz a 10<sup>5</sup> Hz). O resultado de tal cálculo aparece representado na Figura (51).

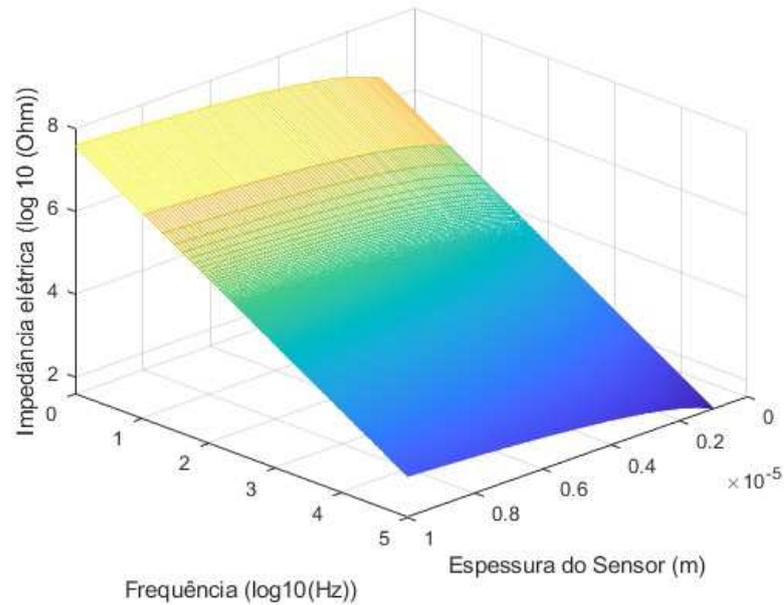


Figura 51: Variação do módulo da impedância elétrica do sensor de filme de PVDF em função de sua espessura e frequência

A curva de variação da impedância elétrica do sensor em função da espessura do sensor e frequência do sinal tem comportamento similar à curva de reatância capacitiva representada pela Figura (50). Tal similaridade explica-se pela associação paralela entre as componentes de resistência e capacitância no circuito elétrico de medição apresentado pela Figura (14). Conforme já discutido da subseção anterior, a magnitude superior da resistência elétrica (duas ordens de grandeza superior) frente a reatância capacitiva do sensor, junto a associação em paralelo dos dois parâmetros, torna a reatância capacitiva o fator determinante da impedância elétrica do sensor, para todas as frequências e espessuras simuladas. Desta forma, a impedância elétrica de saída do sensor comporta-se como a reatância capacitiva.

Uma vez que a impedância elétrica do sensor foi avaliada para várias espessuras e frequências, procede-se agora a avaliação de efeito da variação de espessura do sensor de filme de PVDF na curva de resposta em frequência do sistema de medição de ondas de tensão/deformação formado por este mesmo sensor acoplado a um equipamento de medição. O sensor aqui considerado tem

propriedades mecânicas, elétricas e piezoelétricas idênticas ao sensor comercial LDT1-028K, fabricado pela Measurement Specialties. Suas dimensões geométricas também coincidem, com exceção da espessura, que é variada entre 1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . O equipamento de medição considerado é um osciloscópio comercial, com típica impedância de entrada de 10 M $\Omega$ . Para estas condições indicadas, curvas de resposta em frequência foram geradas para algumas espessuras específicas. Como pode ser visto nas Figuras (52) e (53), ocorre mudança na amplitude de resposta do sistema de medição em função da variação da espessura do sensor, principalmente em baixas frequências. Para o caso em que o sensor simulado tem sua espessura ampliada para 84  $\mu\text{m}$  (o triplo da espessura padrão), a frequência de corte inferior foi incrementada de 28 Hz (Figura (25)) para 84,51 Hz (Figura (52)). Para o caso em que o sensor simulado tem sua espessura reduzida para 9  $\mu\text{m}$  (um terço da espessura padrão), a frequências de corte inferior foi reduzida de 28 Hz (Figura (25)) para 9,01 Hz (Figura (53)).

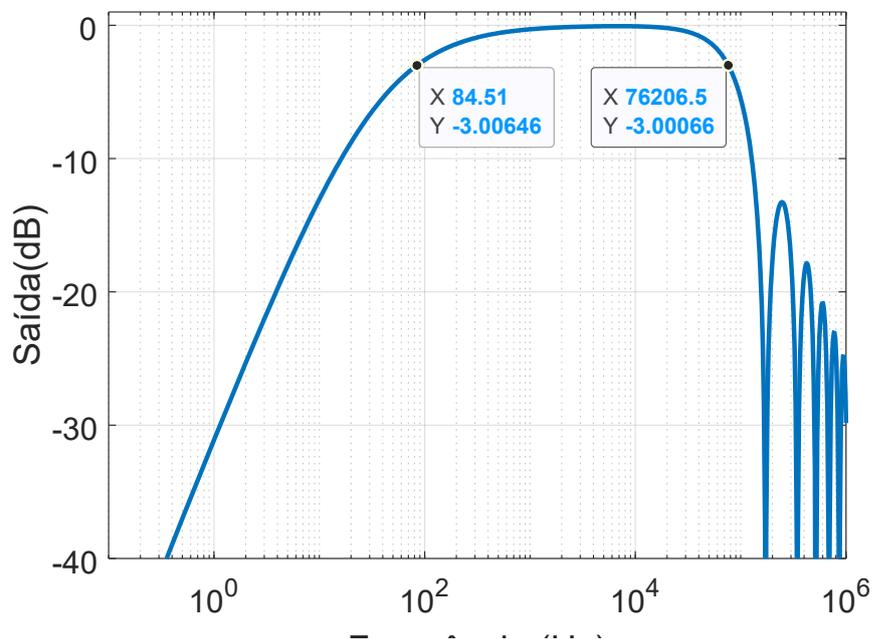


Figura 52: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 84  $\mu\text{m}$ , comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 M $\Omega$ .

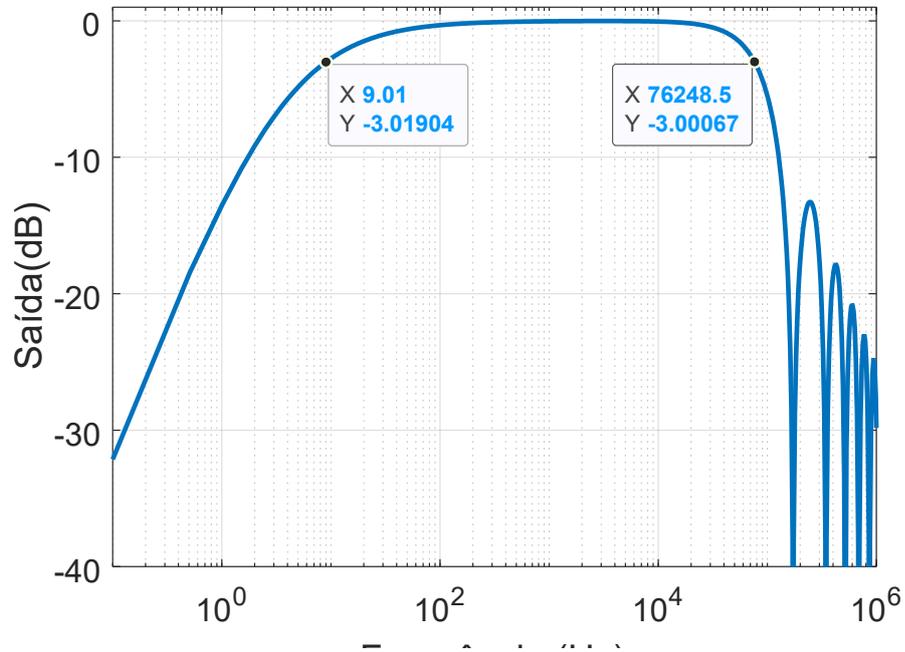


Figura 53: Curva de Resposta em Frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 9  $\mu\text{m}$ , comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 10 MOhm.

De forma a avaliar esta tendência para um conjunto maior de espessuras e frequências, a Equação (48) é solucionada para um conjunto de espessuras de sensor (1  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ ) e frequências de ondas de tensão/deformação atuantes na estrutura (1 Hz a 200 Hz).

No campo das baixas frequências, a influência da espessura do sensor na resposta em frequência do sistema é significativa. Na Figura (54), gerada a partir da solução da Equação (48) para a faixa de frequência de 1 Hz a 200 Hz (escolhida arbitrariamente), observa-se que os sistemas constituídos por sensores com maiores espessuras apresentam significativa atenuação do sinal coletado.

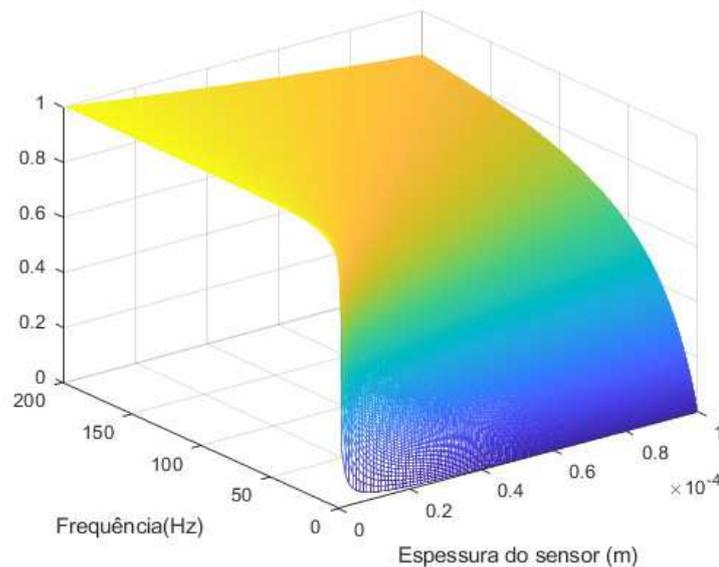


Figura 54: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 mm , comprimento de 30 mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Espessura variada entre 1um e 100 um. Faixa de frequência variada entre 1 Hz e 100 Hz

Nas faixas extremas de frequência (1 e 200 Hz), que podem ser observadas nas vistas em corte apresentadas pelas Figuras (55) e (56), é possível observar a diferença da amplitude de resposta do sistema de medição constituídos por sensores de filme de PVDF com diferentes espessuras. A vista em corte da curva de resposta em frequência do sistema, gerada para limite inferior de frequência (1 Hz), apresentada na Figura (55), mostra uma variação de amplitude de resposta do sistema muito abrupta em função da espessura do sensor, em que a magnitude da resposta aumenta drasticamente com a redução da espessura do sensor. Esta variação drástica de amplitude de resposta do sistema está atrelada à relação direta entre a espessura do sensor e sua impedância elétrica, apresentada pela Figura (55) e a relação inversa entre a impedância elétrica do sensor e a amplitude de resposta do sistema, expressa pela Equação (48). Conforme a impedância elétrica de saída do sensor é reduzida, maior será a amplitude do sinal coletado pelo sistema. Para menores valores de espessura, a atenuação do sinal será pequena a baixas frequências. Para maiores valores de espessura, a atenuação do sinal coletado será mais elevada.

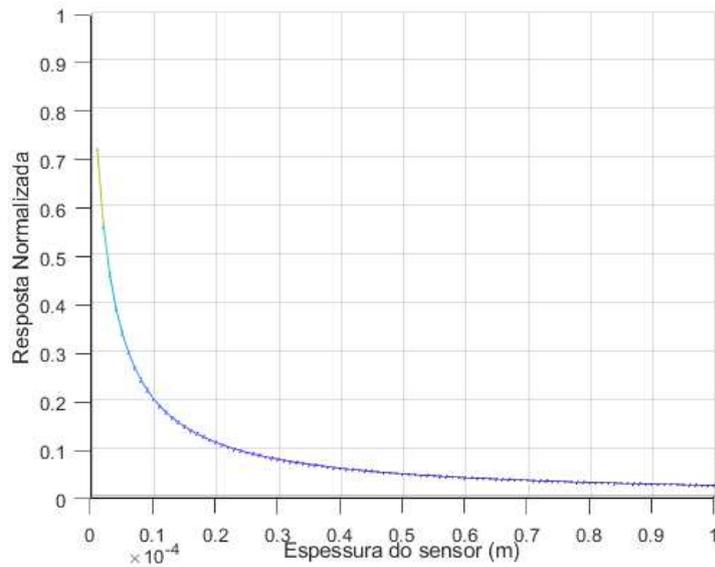


Figura 55: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12  $\mu\text{m}$  e comprimento de 30 mm. Espessura do sensor variada entre 1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . Equipamento de medição com entrada de 10 M $\Omega$ . Excitação mecânica com frequência de 1 Hz.

A vista em corte da curva de resposta em frequência do sistema, gerada para limite superior de frequência (200 Hz), apresentada na Figura (56), mostra uma variação de amplitude de resposta do sistema linear em função da espessura do sensor. Nesta faixa de frequência, a impedância de saída do sensor já tem valores inferiores à impedância de entrada de equipamento de medição para todos os valores de espessura. Desta forma, o efeito da impedância de saída do sensor na amplitude do sinal coletado pelo equipamento de medição, expresso pela Equação (48), é reduzido e a atenuação do sinal é pequena.

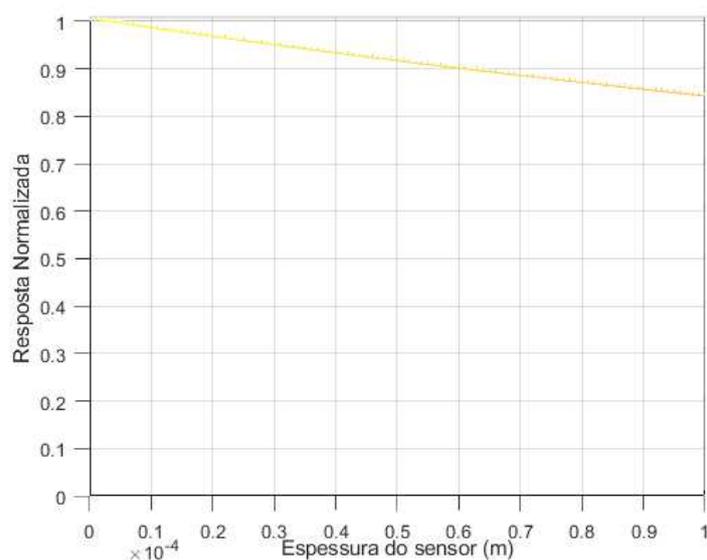


Figura 56: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12  $\mu\text{m}$  e comprimento de 30 mm. Espessura do sensor variada entre 1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ . Equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Excitação mecânica com frequência de 200 Hz.

Tal conjunto de resultados mostra que a espessura do sensor afeta significativamente a resposta do sistema de medição, principalmente nas mais baixas frequências.

#### **4.7 Influência da impedância de entrada do equipamento de medição na resposta em frequência**

Em um processo de medição, o acoplamento adequado entre o sensor e o equipamento de medição é necessário para a qualidade da própria medição. Um dos vários fatores que pode afetar este acoplamento e, conseqüentemente, o sinal medido, é a impedância de entrada do equipamento de medição. Este parâmetro interage com o sensor através de um fator conhecido como efeito de carga. Este efeito ocorre devido à interação entre o sinal elétrico gerado, a impedância de saída do sensor e a impedância de entrada do equipamento de medição. Dependendo do valor numérico destes parâmetros, a amplitude do sinal coletado pelo equipamento de medição pode ser muito inferior ao sinal gerado pelo próprio sensor. Em experimentos de laboratório ou aplicações de engenharia, tal efeito pode gerar o mascaramento das reais solicitações mecânicas pelas quais a estrutura está sendo exposta. Para estudar este efeito e a relevância da impedância de entrada do equipamento na amplitude do sinal medido, a Equação (48) foi utilizada como relação numérica entre os parâmetros apresentados anteriormente. Para avaliar a influência da impedância de entrada na amplitude do sinal medido em ampla faixa de frequência, a Equação (48) foi calculada para o sensor com dimensões geométricas e propriedades iguais às do sensor comercial LDT1-028K enquanto valores de impedância de entrada do equipamento de medição foram variados entre  $1\text{M}\Omega$ ,  $100\text{M}\Omega$  e  $1\text{G}\Omega$ . Os resultados foram apresentados nas Figuras (57), (58) e (59). Para a menor impedância de entrada considerada ( $1\text{M}\Omega$ ), a atenuação prevista para o sinal com frequência de 1 Hz (indicada na Figura (57)) é aproximadamente -40dB e a frequência de corte inferior tem valor de 282 Hz. Para impedâncias de entrada de  $10\text{M}\Omega$  (Figura (57)) e  $100\text{M}\Omega$  (Figura (58)), a atenuação a 1 Hz é -22 dB e -6 dB, respectivamente. A menor frequência de corte é, para estas impedâncias de entrada, 3,01 Hz e 0,4 Hz. Para a maior impedância de entrada considerada,  $1\text{G}\Omega$  (Figura (59)), a atenuação a 1 Hz é praticamente desprezível: -1dB. A frequência de corte inferior para esta configuração tem valor próximo à 0,2 Hz. Tal conjunto de resultados indica que a resposta do sistema de medição é significativamente afetada pela impedância de entrada do equipamento de medição

em baixas frequências. Comparação entre as Figuras (23), (57), (58) e (59) permite observar a redução da frequência de corte inferior do sistema para casos em que o equipamento de medição tem maior impedância de entrada. De um ponto de vista prático, isto mostra a necessidade de considerar a impedância de entrada do equipamento de medição como fator de seleção para condução de experimentos usando este sensor, uma vez que o efeito de carga pode atenuar sinais que tenham baixas frequências.

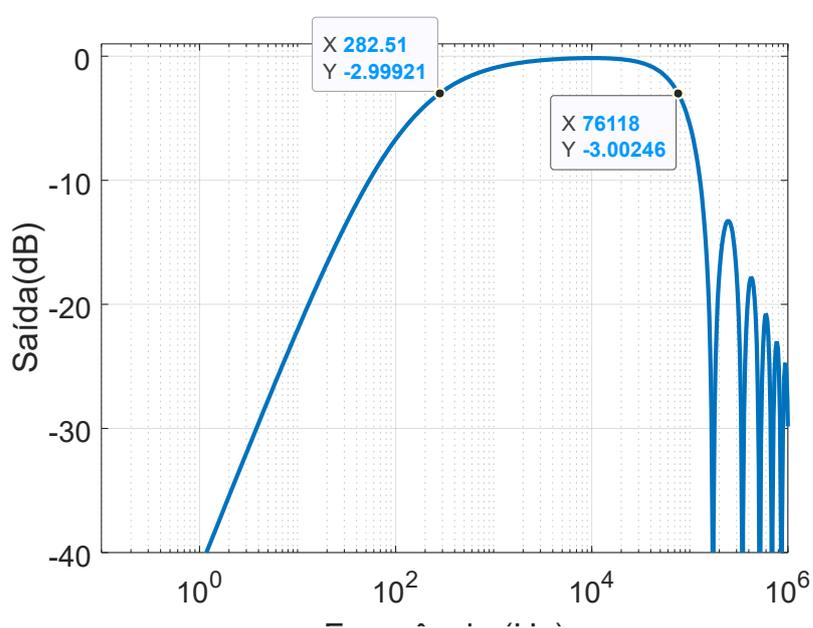


Figura 57: Curva de resposta em frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$ , comprimento de 32 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 1 MOhm

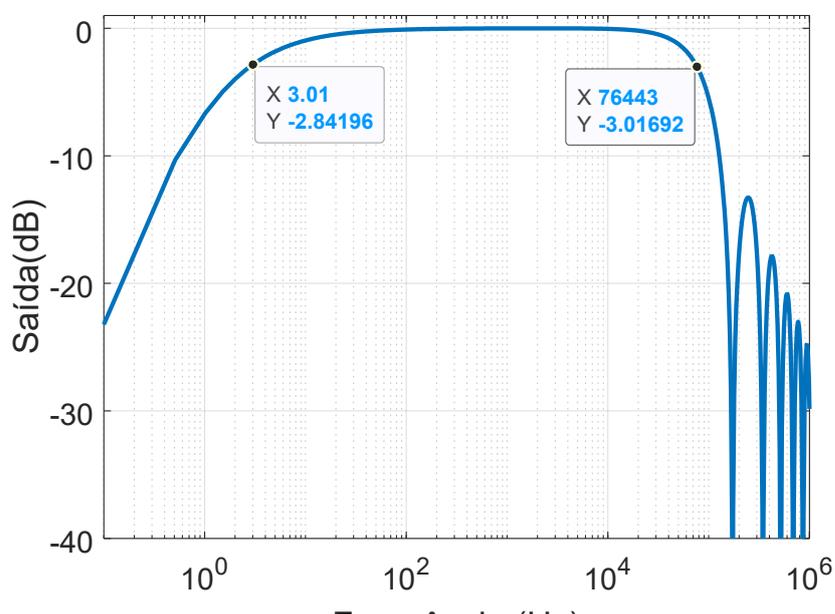


Figura 58: Curva de resposta em frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$ , comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 100 MOhm

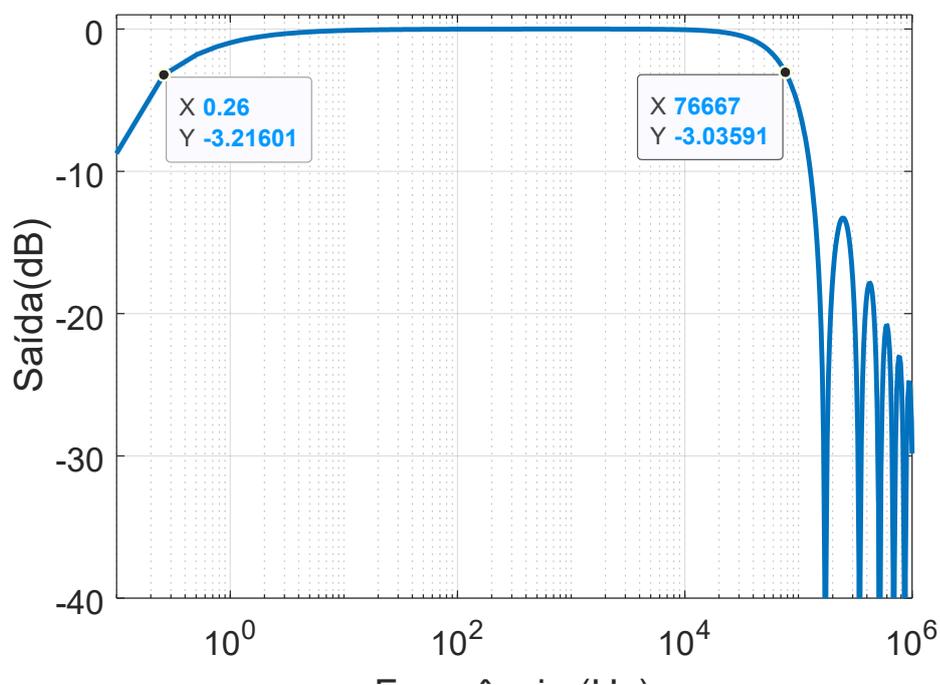


Figura 59: Curva de resposta em frequência teórica para sensor de filme de PVDF com espessura de 28  $\mu\text{m}$ , comprimento de 30 mm e largura de 12 mm. Impedância de entrada do equipamento de medição de 1 GOhm

De forma a avaliar o efeito da variação da impedância de entrada do equipamento de medição na amplitude do sinal aferido pelo sistema de medição para um conjunto maior de impedâncias elétricas e frequências, a Equação (48) foi solucionada para um conjunto de impedâncias ( $1\text{M}\Omega$  a  $1\text{G}\Omega$ ) e frequências de ondas de tensão/deformação atuantes na estrutura (1 Hz a 200 Hz). Os resultados obtido apresentados na Figura (60).

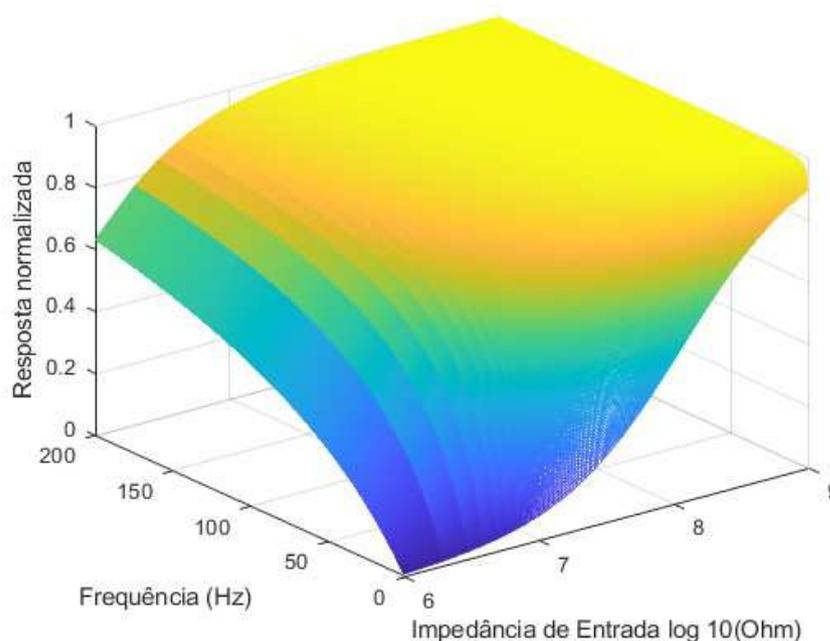


Figura 60: Curva de Resposta em frequência de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12 mm , comprimento de 30 mm e equipamento de medição com entrada de 10 MOhm. Espessura variada entre 1um e 100 um. Faixa de frequência variada entre 1 Hz e 200 Hz

Para frequências próximas ao limite inferior simulado (1 Hz), a atenuação do sinal de resposta em função da impedância de entrada é significativa. A Figura (61), que apresenta a vista de corte da curva de resposta do sistema para uma excitação mecânica com frequência de 1 Hz, mostra que, para equipamentos de medição como osciloscópios comerciais comuns, cuja impedância de entrada aproxima-se de  $10\text{M}\Omega$ , o sinal é reduzido a um décimo de sua amplitude original. Para medições fidedignas nesta frequência, são necessários equipamentos de medição com impedância de entrada muito mais elevada, próxima a  $1\text{G}\Omega$ , para que a atenuação do sinal de resposta seja pequena.

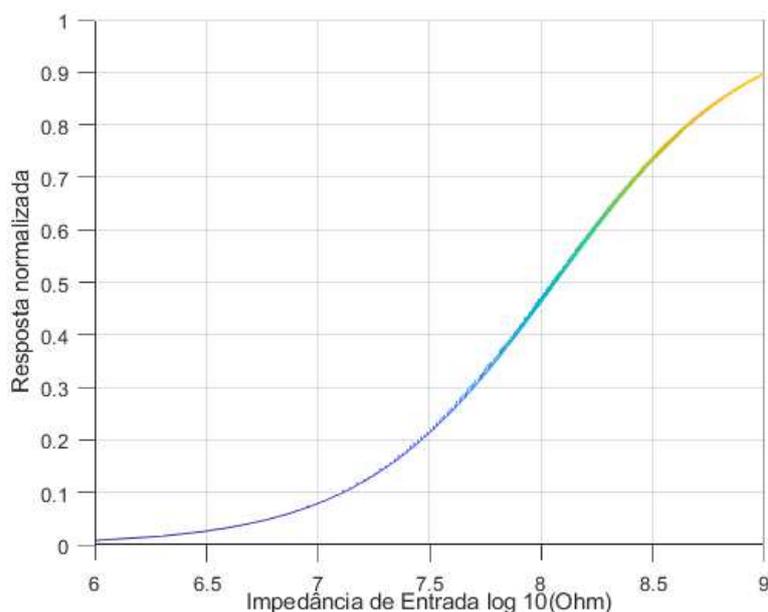


Figura 61: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12  $\mu\text{m}$ , comprimento de 30 mm e espessura de 28  $\mu\text{m}$ . Equipamento de medição com impedância de entrada variando entre 1 Mohm e 1 GOhm. Excitação mecânica com frequência de 1 Hz.

Para frequências próximas ao limite superior simulado (200 Hz), a atenuação do sinal é relevante apenas para os menores valores de impedância (próximos a 1 M $\Omega$ ). A Figura (62), que apresenta a vista de corte da curva de resposta do sistema para uma excitação mecânica com frequência de 200 Hz, mostra que, a atenuação do sinal nesta faixa de frequência é relevante apenas para equipamentos com menores valores de impedância de entrada (1 M $\Omega$ ).

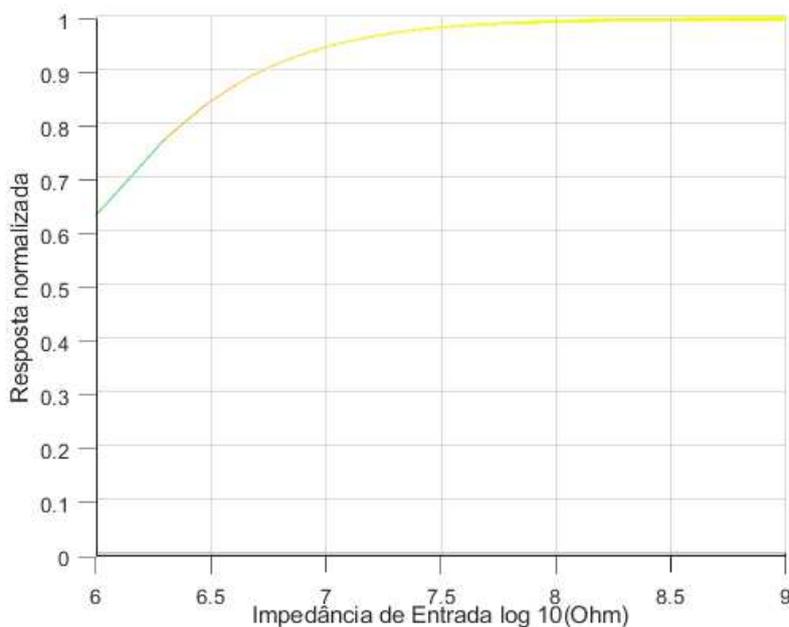


Figura 62: Vista em corte da curva de Resposta de sistema de medição constituído por sensor de filme de PVDF com largura de 12  $\mu\text{m}$ , comprimento de 30 mm e espessura de 28  $\mu\text{m}$ . Equipamento de medição com impedância de entrada variando entre 1 Mohm e 1 GOhm. Excitação mecânica com frequência de 200 Hz.

Tal conjunto de resultados mostra que, assim como a geometria do sensor, o equipamento de medição deve ser escolhido de forma a adequar-se ao espectro de frequência das ondas mecânicas a serem monitoradas. Caso as ondas de tensão/deformação mecânica sejam caracterizadas por baixas frequências, esta recomendação se torna mais forte, uma vez que a atenuação do sinal coletado pode ser significativa para equipamentos de medição com impedância de entrada menores.

## 5 CONCLUSÃO

O conjunto de resultados apresentados nesta dissertação mostra a influência dos parâmetros geométricos dos sensores de PVDF na resposta em frequência um sistema de medição de ondas de tensão longitudinal propagantes em estruturas. O modelo adotado para descrever o comportamento do sensor permitiu gerar curvas de resposta em frequência do sistema de medição e avaliar teoricamente sua capacidade de detecção de ondas de tensão mecânica a partir deste sensor.

Foi realizado um estudo paramétrico da resposta normalizada do sistema em função da frequência das ondas de tensão mecânica e das dimensões do sensor. A partir desta análise, observou-se que:

O comprimento do sensor tem significativa influência na resposta em frequência do sistema de medição. A variação de tal parâmetro geométrico afeta a resposta do sistema tanto em baixas quanto em altas frequências. No caso de baixas frequências, o aumento de tal parâmetro reduz a impedância elétrica de saída do sensor de filme de PVDF, reduzindo a frequência de corte inferior do sistema de medição e viabilizando a detecção de ondas de tensão mecânica propagantes na estrutura que tenham menor frequência. No caso de altas frequências, a redução de comprimento do sensor aumenta o valor da frequência de corte superior da curva de resposta, determinada pelo início da atenuação do sinal coletado pelo “averaging stress effect”. A redução do comprimento do sensor aumenta a faixa de frequência utilizável do sensor e, conseqüentemente, do sistema de medição. Em uma abordagem de dimensionamento do sensor, tais resultados podem servir de diretriz para seleção do comprimento do sensor a partir da faixa de frequências de ondas de tensão longitudinais que deseja-se monitorar.

A largura do sensor tem influência na faixa de baixas frequências da curva de resposta em frequência do sistema de medição. De maneira análoga ao comprimento do sensor, a variação da largura gera uma variação na impedância de saída do sensor de filme de PVDF. Quando este parâmetro geométrico é aumentado, ocorre redução da impedância elétrica de saída do sensor, o que reduz a frequência de corte inferior do sistema de medição e viabiliza a detecção de ondas de tensão mecânica propagantes caracterizadas por menor frequência.

A espessura do sensor tem influência na faixa de baixas frequências da curva de resposta em frequência do sistema de medição. A variação deste parâmetro geométrico afeta a curva de resposta em frequência do sistema de medição de maneira oposta à variação do comprimento e da largura do sensor. Quando a espessura do sensor é aumentada, ocorre aumento da impedância elétrica de saída do sensor, o que aumenta a frequência de corte inferior do sistema de medição e dificulta a detecção de ondas de tensão mecânicas propagantes caracterizadas por menores frequências.

A impedância de entrada do equipamento de medição tem influência significativa na curva de resposta em frequência do sistema de medição. Em baixas frequências, observou-se uma redução significativa da frequência de corte inferior do sistema de medição a partir do incremento deste parâmetro elétrico. Desta forma, a detecção de ondas de tensão de baixas frequências pelo sistema de medição é aprimorada a partir do aumento de impedância de entrada do equipamento de medição. Este resultado corrobora com resultados já publicados por fabricantes deste tipo de sensor (Measurement Specialties), que ressalta a alta impedância de saída do sensor a baixas frequências e a consequente resposta atenuada da medição pelo efeito de carga.

Os resultados apresentados neste trabalho pode ser utilizado por técnicos e profissionais da área de sensoramento de deformações como referência básica para a seleção das dimensões geométricos de sensores de filme de PVDF para medição de ondas de tensão longitudinal propagantes em estruturas.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ACHENBACH, J.D. *Wave Propagation in Solids*. Elsevier:2° Edition. 1975.

BARBOZA, T. D. *Influência da taxa de carregamento no comportamento mecânico do Polifluoreto de Vinilideno (PVDF)*. Dissertação (Mestrado).UFF, Niterói, 2015.

BRANCIFORTI, M.C., SENCADAS, V., LANCEROS-MENDEZ, S. and GREGORIO, R., Jr. (2007), New technique of processing highly oriented poly(vinylidene fluoride) films exclusively in the  $\beta$  phase. J. Polym. Sci. B Polym. Phys., 45: 2793-2801. <https://doi-org.ez27.periodicos.capes.gov.br/10.1002/polb.21239>

BROADHURST, M.G. , DAVIS, G.T. *Piezo and pyroelectric properties*. IN: SESSLER,G.M. *Electrets*. 2. ed. Springer-Verlag, 1987.

BROWN, R. H. *Piezo Films: Form and Function*. Sensors and Actuators A: Physical, v. 22, p.- 729 – 733, 1990.

CANEVAROLO Jr., S. V. *Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. 2.ed. São Paulo. Artliber, 2006.

CHANG, W.Y, HSU, C.H., TSAI, C. H. *Leakage and Fatigue Characteristics of Polyvinylidene Fluoride Film*. Applied Mechanics and Materials. 2013, Vols. 284-287, pp. 158-162.

FERREIRA, P. A. V. Notas de Aula: Princípios de Controle e Servomecanismo. 2006, UNICAMP. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/54090881/Acervotecnico-com-Br-Controle-e-Servomecanismos-UNICAMP>>. Acesso em 16/12/2021.

FOTOUHI, S., AKRAMI, R., FERREIRA-GREEN, K., NASER, G.A.M, FOTOUHI, M., FRAGASSA, C. *Piezoelectric PVDF sensor as a reliable device for strain/load monitoring of engineering devices*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 659 012085

GREGORIO R., CESTARI M. *Effect of crystallization temperature on the crystalline phase content and morphology of poly(vinylidene fluoride)*. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. v. 32, p. 859–870, 1994.

GU, H., ZHAO, Y., WANG, M. L. *A wireless smart PVDF sensor for structural health monitoring*. *Structural Control and Health Monitoring*. v. 12, p. 329-343, 2005

GUSAROV, B. *PVDF piezoelectric polymers: characterization and application to thermal energy harvesting*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Grenoble-Alpes.

HARRISON J.S., OUNAIES Z. *Piezoelectric Polymers*. Hampton, Virginia; 2001. NASA/CR-2001-211422.

HE, Z.; RAULT, F.; LEWANDOWSKI, M.; MOHSENZADEH, E.; SALAUN, F. *Electrospun PVDF Nanofibers for Piezoelectric Applications: A Review of the Influence of Electrospinning Parameters on the  $\beta$  Phase and Crystallinity Enhancement*. *Polymers*. 2021, 13, 174. <https://doi.org/10.3390/polym13020174>

Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control society, *IEEE Standard on Piezoelectricity*, Nova York, 1987.

JORDAN T.L., OUNAIES Z. *Piezoelectric Ceramics Characterization*. Hampton, Virginia; 2001. NASA/CR-2001-211225.

KARKI, J. *Signal Conditioning Piezoelectric Sensors*. Application Report. Texas Instruments, 2000.

KESTER, W., WURCER, S., Kitchin. *High Impedance Sensors* In: JUNG, W. (editor) . *Op Amp Applications Handbook*. Elsevier, 2005, p. 26 – p. 28

LEÃO, S. G. *Desenvolvimento e Caracterização Morfológica e Cristalina de Nanomembranas Piezoelétricas de Poli(Fluoreto de Vinilideno) HFP e TRFE*

*Dopadas com nanotubos de carbono*. Dissertação (Mestrado). UFMG, Belo Horizonte , 2018

LYNCH, C.S. *Polyvinilidene fluoride elastic, piezoelectric, pyroelectric and dielectric coefficients and their non linearities*. *Ferroelectrics*, v. 150, p. 331-342,1993.

MA, L., MELKOTE, S. N., MOREHOUSE, J.B., CASTLE, J. B, FONDA, J.W, JOHNSON, M. A. *Design of thin-film polyvinylidene fluoride sensor rosettes for isolation of various strain components*. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. v. 13, p. 1119-1130, 2012.

MATSUMOTO, E., BIWA, S., KATSUMI,K. , OMOTO, Y., IGUCHI, K., SHIBATA. *Surface strain sensing with polymer piezoelectric film*. *NDT & E International*, v. 37, p- 57-64, 2004

MEASUREMENT SPECIALTIES. *Piezo Film Sensors Technical Manual*. 1999

MENEZES, N.C.F. *Desenvolvimento de Nanomembranas poliméricas piezoelétricas com adição de nanotubos de carbono*. Dissertação (mestrado). UFMG, Belo Horizonte, 2017.

MOHAMMADI B., YOUSEFI A. A., BELLAH S. M., *Effect of tensile strain rate and elongation on crystalline structure and piezoelectric properties of PVDF thin films*, *Polymer Testing*, Volume 26, Issue 1, 2007, Pages 42-50, ISSN 0142-9418, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.08.003>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941806001620>)

ODIAN, G. *Principles of Polymerization*. 4. ed. Nova York. John Wiley & Sons.2004

PIEZOTECH S.A.S. *Piezoelectric Films Technical Information*

SENCADAS, V. , GREGORIO Jr., R. , LANCEROS-MENDEZ, S. (2009)  $\alpha$  to  $\beta$  Phase Transformation and Microstructural Changes of PVDF Films Induced by Uniaxial

Stretch, Journal of Macromolecular Science, Part B, 48:3, 514-525, DOI: [10.1080/00222340902837527](https://doi.org/10.1080/00222340902837527)

SIROHI J., CHOPRA I. Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. v.11(4), p. 246-257, 2000

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Standard on Piezoelectricity*. Nova York, 1983.

THOMPSON, M.L. *On the Material Properties and Constitutive Equations of Piezoelectric PolyVinylidene Fluoride (PVDF)*. 2002. Tese ( Doutorado ) – Drexel University

ZHANG, H., GALEA, S. C., CHIU, W. K, LAM, Y. C. *An Investigation of thin PVDF films as fluctuating strain measuring and damage monitoring devices*. *Smart Materials Structures*, v. 2, p. 208 – 216, 1993

## 7 ANEXO

### Código 1 – Avaliação da variação da impedância de saída do sensor de PVDF em função da Frequência

```
%% Código utilizado para avaliar impedância elétrica
% de saída do sensor de PVDF em função da Frequência
```

```
clear all;
close all;
```

```
%% Constantes
```

```
R2 = 1e7;
comprimento=0.030;
largura=0.012;
espessura=28e-6;
er=12;
e0= 8.854e-12;
rhoe=10^13;
```

```
%% Cálculos
```

```
A=comprimento*largura;
C1 = e0*er*A/espessura;
R1= rhoe*espessura/A;
```

```
%% Vetores
```

```
f=0.1:0.1:1000000;
omega= 2*pi.*f;
```

```
%% Impedância
```

```
X_C1= 1./(1i.*omega*C1);
Z_C1=(1./((1/R1)+(1./X_C1)));
Z_C2=1./((1/R2));
```

```
%% Gráficos
```

```
%% Reatância Elétrica Capacitiva
```

```
ModuloC = abs(X_C1);
figure
loglog(f,ModuloC);
grid on;
xlim ([0.1 10^6]);
xlabel ('Frequência (Hz)');
ylabel ('Reatância Capacitiva (Ohm)');
```

```
%% Resistência Elétrica
```

```
figure
ModuloR = R1*ones(1,length(f));
loglog(f,ModuloR)
grid on;
xlim ([0.1 10^6]);
```

```

xlabel ('Frequência (Hz)');
ylabel ('Resistência Elétrica (Ohm)');

%% Impedância Total Elétrica
figure
loglog(f,abs(Z_C1));
grid on;
xlim ([0.1 10^6]);
xlabel ('Frequência (Hz)');
ylabel ('Impedância Elétrica (Ohm)');

```

## Código 2 – Avaliação da influência do Comprimento do sensor na impedância elétrica de saída do sensor e na resposta em frequência do sistema de medição

```

%% Este programa é destinado a simular, através de modelo adotado na
%% dissertação, a influência do comprimento do sensor na impedância
%% elétrica de saída do sensor e do sinal coletado pelo equipamento de
%% medição

%Declaração de Constantes

F=2000; % [N] Inserção do valor de força longitudinal
(compressão)
Ab=150*10^(-6); % [m²] Inserção do valor da área transversal da
barra
Eb= 210*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade da barra
Es= 3*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade do sensor
rhob=7850; % [kg/m³] Inserção do valor da densidade da
barra
g31=0.216; % [V/m]/[N/m²] Inserção da constante
piezoelétrica de tensão do filme
espessura = 28*10^(-6); % [m] Inserção de espessura do sensor
comprimento = 30*10^(-3); % [m]Inserção do comprimento do sensor
largura = 12*10^(-3); % [m]Inserção da largura do sensor
d = 0.15; % [m] Inserção da distância entre o ponto de
aplicação da força e o ponto médio do sensor
rhoe=10^13; % [Omega] Inserção da resistividade
característica do material do sensor
R2 = 1e7; % [Omega] Inserção da resistência característica
de entrada do equipamento medidor
er=12; % [-] Inserção da permissividade relativa do PVDF
e0= 8.854e-12; % [F/m] Inserção da permissividade absoluta do
vácuo

%Declaração de Variáveis globais
c0=sqrt(Eb/rhob); % [m/s] Velocidade de propagação da onda na
barra

%Declaração de Equações
%Item 1 - Análise de curvas de resposta em frequência com variação de
%comprimento

```

%Fasor de amplitude

```
[A,B]=meshgrid(0.1:0.1:201,0.001:0.001:0.1);
modulo1=(2*(F/Ab)*Es*g31*espessura*c0)/(B.*Eb*2*pi().*A);
modulo2=sin(2*pi().*A.*B./(2*c0));
amp=modulo1.*modulo2;
ampnorm=abs(amp./((F/Ab)*Es*g31*espessura/Eb));
dbampnorm=mag2db(ampnorm);
mesh(B,A,ampnorm);
ylabel('Frequência(Hz)');
xlim([0 101*10^-3]);
xlabel('Comprimento do sensor (m)');
zlabel('Resposta normalizada');
```

%% Fasor de impedância

```
fasorRs = rhoe*espessura./(largura.*B);
do filme de PVDF
```

% [Ohm] cálculo de resistência elétrica

```
% figure;
```

```
% semilogy(B,fasorRs);
```

```
% xlabel('Comprimento do Sensor (m)');
```

```
% ylabel('Resistência Elétrica (Ohm)');
```

```
fasorRosc = R2 ;
```

% [m²] Cálculo do valor da capacitância

```
C1 = e0*er*(largura.*B)/espessura;
```

```
equivalente do sensor
```

```
% % figure;
```

```
% % plot(B,C1);
```

```
% % xlabel('Comprimento do Sensor (m)');
```

```
% % ylabel('Capacitância Elétrica (F)');
```

```
XC1s = 1./(2*C1.*pi().*A);
```

```
% % figure;
```

```
% % mesh(B,log10(A),log10(XC1s));
```

```
% % xlabel('Comprimento do Sensor (m)');
```

```
% % ylabel('Frequência (log10(Hz))');
```

```
% % zlabel('Reatância elétrica (log 10 (Ohm))');
```

```
fasorYRs=1./fasorRs;
```

```
fasorYCs=1./XC1s;
```

```
fasorYs=sqrt(fasorYRs.^2+fasorYCs.^2);
```

```
ampZs= 1./fasorYs;
```

```
% % figure;
```

```
% % mesh(B,log10(A),log10(ampZs));
```

```
% % xlabel('Comprimento do Sensor (m)');
```

```
% % ylabel('Frequência (log10(Hz))');
```

```
% % zlabel('Impedância elétrica (log 10 (Ohm))');
```

```
Efeitoimpent=R2./(R2+ampZs);
```

```
% %
```

```
% %Efeito de impedância de entrada do equipamento de medição e frequência
```

```
% % %Curva final
```

```
modfinal=ampnorm.*Efeitoimpent;
```

```
dB = mag2db(modfinal);
```

```
figure;
```

```
mesh(B,A,modfinal)
```

```
ylabel('Frequência (Hz)');
```

```
ylim([199.99 200.01]);
```

```
xlim([0 100*10^-3]);
```

```
xlabel('Comprimento do sensor (m)');
```

```
zlabel('Resposta normalizada');
```

### Código 3 - Avaliação da influência da largura do sensor na impedância elétrica de saída do sensor e na resposta em frequência do sistema de medição

```

%% Este programa é destinado a simular, através de modelo adotado na
%% dissertação, a influência do largura do sensor na impedância
%% elétrica de saída do sensor e do sinal coletado pelo equipamento de
%% medição

%Declaração de Constantes

F=2000; % [N] Inserção do valor de força longitudinal
(compressão)
Ab=150*10^(-6); % [m²] Inserção do valor da área transversal da
barra
Eb= 210*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade da barra
Es= 3*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade do sensor
rhob=7850; % [kg/m³] Inserção do valor da densidade da
barra
g31=0.216; % [V/m]/[N/m²] Inserção da constante
piezoelétrica de tensão do filme
espessura = 28*10^(-6); % [m] Inserção de espessura do sensor
comprimento = 32*10^(-3); % [m]Inserção do comprimento do sensor
largura = 12*10^(-3); % [m]Inserção da largura do sensor
d = 0.15; % [m] Inserção da distância entre o ponto de
aplicação da força e o ponto médio do sensor
rhoe=10^13; % [Omega] Inserção da resistividade
característica do material do sensor
R2 = 1e7; % [Omega] Inserção da resistência característica
de entrada do equipamento medidor
er=12; % [-] Inserção da permissividade relativa do PVDF
e0= 8.854e-12; % [F/m] Inserção da permissividade absoluta do
vácuo

%Declaração de Variáveis globais
c0=sqrt(Eb/rhob); % [m/s] Velocidade de propagação da onda na
barra

%Declaração de Equações
%Item 1 - Análise de curvas de resposta em frequência com variação de
%largura

%Fasor de amplitude
[A,B]=meshgrid(1:0.11:2*10^2,0.001:0.001:0.05);
modulo1=(2*(F/Ab)*Es*g31*espessura*c0)./(comprimento.*Eb*2*pi().*A);
modulo2=sin(2*pi().*A.*comprimento./(2*c0));
amp=modulo1.*modulo2;
ampnorm=abs(amp./((F/Ab)*Es*g31*espessura/Eb));
dbampnorm=mag2db(ampnorm);

%Fasor de impedância

```

```

fasorRs = rhoe*espessura./(B.*comprimento);           % [Ohm] cálculo de resistência
elétrica do filme de PVDF
% figure;
% plot(B,fasorRs);
% xlabel('Largura do Sensor (m)');
% ylabel('Resistência Elétrica (Ohm)');
fasorRosc = R2 ;
C1 = e0*er*(B.*comprimento)/espessura;             % [m²] Cálculo do valor da
capacitância equivalente do sensor
% figure;
% plot(B,C1);
% xlabel('Largura do Sensor (m)');
% ylabel('Capacitância Elétrica (F)');
XCcs = 1./(2*C1.*pi().*A);
% figure;
% figure;
% mesh(B,log10(A),log10(XCs));
% xlabel('Largura do Sensor (m)');
% ylabel('Frequência (log10(Hz))');
% zlabel('Reatância elétrica (log 10 (Ohm))');
fasorYRs=1./fasorRs;
fasorYCs=1./XCcs;
fasorYs=sqrt(fasorYRs.^2+fasorYCs.^2);
ampZs= 1./fasorYs;
% figure;
% mesh(B,log10(A),log10(ampZs));
% xlabel('Largura do Sensor (m)');
% ylabel('Frequência (log10(Hz))');
% zlabel('Impedância elétrica (log 10 (Ohm))');
Efeitoimpent=R2./(R2+ampZs);
%Efeito de impedância de entrada do equipamento de medição e frequência
%Curva final
modfinal=ampnorm.*Efeitoimpent;
lgmodfinal = mag2db(modfinal);
figure;
mesh(B,A,modfinal);
ylim([0.99 1.01]);
ylabel('Frequência(Hz)');
xlim([0 50*10^-3]);
xlabel('Largura do sensor (m)');
zlabel('Resposta normalizada ');

```

#### Código 4 - Avaliação da influência da espessura do sensor na impedância elétrica de saída do sensor e na resposta em frequência do sistema de medição

```

%% Este programa é destinado a simular, através de modelo adotado na
%% dissertação, a influência do espessura do sensor na impedância
%% elétrica de saída do sensor e do sinal coletado pelo equipamento de
%% medição

```

```

%Declaração de Constantes

```

```

F=2000;
(compressão)

```

```

% [N] Inserção do valor de força longitudinal

```

```

Ab=150*10^(-6); % [m²] Inserção do valor da área transversal da
barra
Eb= 210*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade da barra
Es= 3*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade do sensor
rhob=7850; % [kg/m³] Inserção do valor da densidade da
barra
g31=0.216; % [V/m]/[N/m²] Inserção da constante
piezoelétrica de tensão do filme
espessura = 28*10^(-6); % [m] Inserção de espessura do sensor
comprimento = 32*10^(-3); % [m]Inserção do comprimento do sensor
largura = 12*10^(-3); % [m]Inserção da largura do sensor
d = 0.15; % [m] Inserção da distância entre o ponto de
aplicação da força e o ponto médio do sensor
rhoe=10^13; % [Omega] Inserção da resistividade
característica do material do sensor
R2 = 1e7; % [Omega] Inserção da resistência característica
de entrada do equipamento medidor
er=12; % [-] Inserção da permissividade relativa do PVDF
e0= 8.854e-12; % [F/m] Inserção da permissividade absoluta do
vácuo

%Declaração de Vetores

%Declaração de Variáveis globais
c0=sqrt(Eb/rhob); % [m/s] Velocidade de propagação da onda na
barra

%Declaração de Equações
%Item 1 - Análise de curvas de resposta em frequência com variação de
%espessura

%Fasor de amplitude
[A,B]=meshgrid(0.1:0.1:200,1*10^(-6):1*10^(-6):1*10^(-4));
modulo1=(2*(F/Ab)*Es*g31.*B*c0)./(comprimento.*Eb*2*pi().*A);
modulo2=sin(2*pi().*A.*comprimento./(2*c0));
amp=modulo1.*modulo2;
ampnorm=abs(amp./((F/Ab)*Es*g31.*B/Eb));
dbampnorm=mag2db(ampnorm);
% figure;
% mesh(B,A,ampnorm);
% xlabel('Espessura do Sensor (m)');
% ylabel('Frequência (Hz)');
% zlabel('Resposta Normalizada');

%Fasor de impedância

fasorRs = rhoe.*B/(largura*comprimento); % [Ohm] cálculo de resistência
elétrica do filme de PVDF
% figure;
% plot(B,fasorRs);
% xlabel('Espessura do Sensor (m)');
% ylabel('Resistência Elétrica (Ohm)');
fasorRosc = R2 ;
C1 = e0*er*(largura*comprimento)./B; % [m²] Cálculo do valor da
capacitância equivalente do sensor
% figure;

```

```

% plot(B,C1);
% xlabel('Espessura do Sensor (m)');
% ylabel('Capacitância Elétrica (F)');
XCs = 1./(2*C1.*pi().*A);
% % figure;
% % mesh(B,A,log10(XCs));
% % xlabel('Espessura do Sensor (m)');
% % ylabel('Frequência (log10(Hz))');
% % zlabel('Reatância elétrica (log 10 (Ohm))');
fasorYRs=1./fasorRs;
fasorYCs=1./XCs;
fasorYs=sqrt(fasorYRs.^2+fasorYCs.^2);
ampZs= 1./fasorYs;
% % figure;
% % mesh(B,A,log10(ampZs));
% % xlabel('Largura do Sensor (m)');
% % ylabel('Frequência (log10(Hz))');
% % zlabel('Impedância elétrica (log 10 (Ohm))');
Efeitoimpent=R2./(R2+ampZs);
%
% %%Efeito de impedância de entrada do equipamento de medição e frequência
% %%Curva final
modfinal=ampnorm.*Efeitoimpent;
lgmodfinal = mag2db(modfinal);
figure;
mesh(B,A,modfinal);
ylim([199.95 200.05]);
ylabel('Frequência(Hz)');
xlim([0 10^(-4)]);
xlabel('Espessura do sensor (m)');
% zlabel('Resposta normalizada ');

```

### **Código 5 - Avaliação da influência da impedância de entrada do equipamento de medição na resposta em frequência do sistema de medição**

```

%% Este programa é destinado a simular, através de modelo adotado na
%% dissertação, a influência da impedância de entrada do equipamento de
%% medição no sinal apresentado pelo sistema de medição

```

```

%Setup dos gráficos
alldatacursors = findall(gcf,'type','hggroup')
set(alldatacursors,'FontSize',14)
set(alldatacursors,'FontName','Times')
set(alldatacursors, 'FontWeight', 'bold')

```

```

%Declaração de Constantes

```

```

F=2000; % [N] Inserção do valor de força longitudinal
(compressão)
Ab=150*10^(-6); % [m²] Inserção do valor da área transversal da
barra
Eb= 210*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade da barra

```

```

Es= 3*10^9; % [N/m²] Inserção do valor do módulo de
Elasticidade do sensor
rhob=7850; % [kg/m³] Inserção do valor da densidade da
barra
g31=0.216; % [V/m]/[N/m²] Inserção da constante
piezoelétrica de tensão do filme
espessura = 28*10^(-6); % [m] Inserção de espessura do sensor
comprimento = 30*10^(-3); % [m]Inserção do comprimento do sensor
largura = 12*10^(-3); % [m]Inserção da largura do sensor
d = 0.15; % [m] Inserção da distância entre o ponto de
aplicação da força e o ponto médio do sensor
rhoe=10^13; % [Omega] Inserção da resistividade
característica do material do sensor
R2 = 1e6; % [Omega] Inserção da resistência característica
de entrada do equipamento medidor
er=12; % [-] Inserção da permissividade relativa do PVDF
e0= 8.854e-12; % [F/m] Inserção da permissividade absoluta do
vácuo

%Declaração de Variáveis globais
c0=sqrt(Eb/rhob); % [m/s] Velocidade de propagação da onda na
barra

%Declaração de Equações
%Item 1 - Análise de curvas de resposta em frequência com variação de
%comprimento

%Fasor de amplitude
[A,B]=meshgrid(1:0.1:200,10^6:10^6:10^9);
modulo1=(2*(F/Ab)*Es*g31*espessura*c0)./(comprimento.*Eb*2*pi().*A);
modulo2=sin(A.*comprimento./(2*c0));
amp=modulo1.*modulo2;
ampnorm=abs(2*pi()*amp./((F/Ab)*Es*g31*espessura/Eb));
dbampnorm=mag2db(ampnorm)

%Fasor de impedância
fasorRs = rhoe*espessura./(largura*comprimento); % [Ohm] cálculo de
resistência elétrica do filme de PVDF
fasorRosc = B ; % [m²] Cálculo do
C1 = e0*er*(largura*comprimento)/espessura;
valor da capacitância equivalente do sensor
XCs = 1./(2*C1.*pi().*A);
fasorYRs=1./fasorRs;
fasorYCs=1./XCs;
fasorYs=sqrt(fasorYRs.^2+fasorYCs.^2);
ampZs= 1./fasorYs;
Efeitoimpent=B./(B+ampZs);

%%Efeito de impedância de entrada do equipamento de medição e frequência
%%Curva final
modfinal=ampnorm.*Efeitoimpent;
dB = mag2db(modfinal);
mesh(log10(B),A,modfinal)
ylabel('Frequência (Hz)');
ylim([0 200.05]);
xlabel('Impedância de Entrada log 10(Ohm)');

```

```
xlim([6 9]);  
xlabel('Resposta normalizada');
```