

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO DE DISPOSITIVOS DE COLHEITA DE ENERGIA
COMPOSTOS POR ELEMENTOS PIEZELÉTRICOS ACOPLADOS A VIGAS EM
BALANÇO**

Lucas Geoffroy de Souza e Mateus da Silva de Carvalho Queiroz

Rio de Janeiro - RJ

2020

DIMENSIONAMENTO DE DISPOSITIVOS DE COLHEITA DE ENERGIA COMPOSTOS
POR ELEMENTOS PIEZELÉTRICOS ACOPLADOS A VIGAS EM BALANÇO

Lucas Geoffroy de Souza e Mateus da Silva de Carvalho Queiroz

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, como requisito para recebimento do Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco.

Co-Orientador: Arthur Adeodato

Rio de Janeiro – RJ

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S729 Souza, Lucas Geoffroy de
Dimensionamento de dispositivos de colheita de energia
compostos por elementos piezelétricos acoplados a vigas
em balanço / Lucas Geoffroy de Souza [e] Mateus da Silva
de Carvalho Queiroz — 2020.

63f.+ apêndice: il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2020.

Bibliografia : f. 59-63

Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Coorientador: Arthur Adeodato

1. Engenharia mecânica. 2. Geração de energia . 3. Energia –
Fontes alternativas. 4. Materiais inteligentes. I. Queiroz, Mateus da
Silva de Carvalho II. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.).
II. Adeodato, Arthur (Coorient.) Título.

CDD 621

DEDICATÓRIA

Eu, Lucas Geoffroy de Souza, dedico este trabalho a Deus por ter me agraciado com a oportunidade de viver o sonho de me formar como engenheiro e aos meus pais, Ricardo e Suzana, por todo amor, carinho e apoio durante toda minha história.

Eu, Mateus da Silva de Carvalho Queiroz, dedico este trabalho a Jesus Cristo, minha maior inspiração, e aos meus pais, Cristiano e Fatima Queiroz, por todo amor e cuidado ao longo de minha trajetória.

AGRADECIMENTOS

Ao CEFET/RJ, por todo o conhecimento transmitido e oportunidades de crescimento ao longo dos anos de formação.

À CAPES e ao CNPq por todo o suporte e incentivo à pesquisa do tema abordado neste trabalho.

Ao professor D.Sc. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco e ao M.Sc. Arthur Adeodato, orientador e coorientador deste trabalho, por todo o conhecimento, prontidão, amizade, e dedicação demonstrados durante a elaboração deste projeto.

RESUMO

Nos últimos anos tem crescido significativamente o interesse pela pesquisa em dispositivos de colheita de energia devido à crescente demanda por fontes limpas e renováveis como alternativas às tradicionais, com o intuito de fornecer energia elétrica a sensores eletrônicos de baixa potência e sensores sem fio. Este trabalho estuda o comportamento de um dispositivo sujeito a excitação harmônica de base que consiste em uma viga monoengastada, simétrica, bimorfa, com as camadas de material piezelétrico conectadas em série e atuando no modo 3-1. É apresentada uma ferramenta de cálculo em linguagem VBA (*Visual Basics for Applications*) que permite ao usuário, uma vez tendo fornecido dimensões, materiais empregados no projeto e condições de trabalho, obter respostas no domínio da frequência, bem como otimizações e dados sobre eficiência com base em valores de resistência externa. É analisada a influência dos parâmetros dimensionais (espessura das camadas, largura e comprimento da viga) sobre parâmetros das equações de movimento (termo de acoplamento eletromecânico e capacitância) sobre a resposta do sistema (deslocamentos relativos à base, tensão elétrica e potência) e também a influência dos valores de resistência externa sobre a eficiência do dispositivo. Por fim, são discutidas as limitações do modelo analítico.

Palavras-Chave: Colheita de energia, materiais piezelétricos, materiais inteligentes, análise analítica.

ABSTRACT

Interest in research on energy harvesting devices has been growing significantly due to the growing demand for clean and sustainable energy as alternatives to traditional ones, to power electronic sensors and wireless sensors. This work studies the behavior of a bimorph and symmetrical piezoelectric element in a cantilever beam configuration, submitted to harmonic base vibration, with layers of piezoelectric material connected in series and acting in the 3-1 mode. A calculation tool was developed in VBA (Visual Basics for Applications) that allows the user, once having provided dimensions, materials used in the project and working conditions, obtain answers in the frequency domain, as well as optimizations and efficiency data based on external resistance values. The influence of dimensional parameters (layer thickness, beam width and length) on parameters of the motion equations (electromechanical coupling term and capacitance) and on the system response (displacements relative to the base, voltage) is analyzed. In addition, the influence of external resistance values on the efficiency of the device is analyzed. Finally, the limitations of the analytical model used are discussed and the conclusions are presented.

Keywords: Energy Harvesting, Piezoelectric Materials, Smart Materials, Analytical Analysis.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	5
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1.	Configurações de dispositivos piezelétricos	9
2.2.	Tipos de materiais piezelétricos.....	10
2.2.1.	Piezelétricos inorgânicos	10
2.2.2.	Polímeros piezelétricos.....	10
2.2.3.	Biopiezelétricos	10
2.3.	Aplicações de elementos piezelétricos.....	11
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1.	Acoplamento Eletromecânico linear.....	14
3.1.1.	Modelo Físico.....	14
3.1.2.	Propriedades e relações constitutivas	15
3.1.2.3.	A Forma Matricial	18
3.1.3.	Polarização	19
3.1.4.	Anisotropia	20
3.1.5.	Arranjos e modos mais comuns de operação	21
3.2.	Análise modal de uma viga em balanço segundo a Teoria de Euler-Bernoulli 21	
3.3.	Tensão e Corrente RMS.....	26
4.	MODELAGEM.....	28
4.1.1.	Análise modal da viga	31
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1.	Validação do modelo	35
5.2.	Ferramenta de cálculo para simulação de resposta do dispositivo	35
5.2.1.	Interfaces e ferramentas.....	36

5.3.	Influência da espessura das camadas de piezelétrico sobre a resposta do sistema	39
5.4.	Influência da largura da viga sobre a resposta do sistema.....	43
5.5.	Influência do comprimento da viga sobre a resposta do sistema.....	46
5.6.	Análise da resposta do sistema no domínio da frequência	49
5.6.1.	Ressonância e antirressonância	50
5.7.	Análise da eficiência no domínio da resistência	50
5.7.1.	Largura de banda	51
5.8.	Influência do termo de acoplamento mecânico e da fração de amortecimento sobre a resposta do sistema.....	52
5.9.	Limitações do modelo.....	54
5.9.1.	Fração de amortecimento	54
5.9.2.	Não-linearidade das relações constitutivas nos materiais piezelétricos.	56
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
	APÊNDICE A: Ferramenta de cálculo	64
	APÊNDICE B: Manual do usuário	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Densidade de potência vs diferença de potencial para diversos tipos de colheita de energia. (COOK-CHENNAULT, et al., 2008)	7
Figura 2. Esquema representativo da colheita de energia proveniente de um piezelétrico através de vibrações mecânicas. (Erturk, et al., 2011)	8
Figura 3. Sapatos de identificação por radiofrequência (RFID) com tecnologia eletrônica piezelétrica. (SHENCK e PARADISO, 2001)	11
Figura 4. Esquema da mochila com filmes piezelétricos acoplados as alças para colheita de energia. (ADEODATO, 2017).....	12
Figura 5. Monitoramento da pressão arterial implantável e autoalimentado baseado em um filme fino piezelétrico. (DAGDAVIREN et al., 2014).	12
Figura 6. Estrutura cristalina de um elemento piezelétrico. (LEO, 2007)	14
Figura 7. Representação do comportamento tensão-deformação para um material elástico (LEO, 2007).....	16
Figura 8. Relação entre tensão e deslocamento elétrico em um material piezelétrico. (LEO, 2007).....	16
Figura 9. Relação entre campo elétrico aplicado e deslocamento elétrico em materiais piezelétricos. (LEO, 2007).....	17
Figura 10. Relação entre campo elétrico aplicado e deformação observada em materiais piezelétricos (LEO, 2007).....	18
Figura 11. a) Dipolos orientados aleatoriamente; b) Material sujeito a campo elétrico e temperatura; c) Dipolos uniformemente orientados após redução de temperatura (LEO, 2007).	20
Figura 12. Direção dos esforços relativos a direção de polarização, conforme a convenção (APC International Ltd, 2011).....	20
Figura 13. a) Material piezelétrico operando nos modos 33 e 31; b) Viga em balanço no modo 31 com conexões em série e paralelo; c) Configuração em balanço unimorfo nos modos 33 e 31. (S. Pryia, 2016).	21
Figura 14. Equilíbrio de esforços em um elemento de viga segundo a hipótese da viga de Euler-Bernoulli (Inman, 2014).	22
Figura 15. Valores em uma Senóide de corrente alternada, Newton C. Braga (2012)..	26

Figura 16. Ilustração de um dispositivo de colheita de energia <i>cantilever beam</i> bimorfo e simétrico. As camadas piezelétricas estão conectadas em série no modo 3-1.....	28
Figura 17. Arquétipo do modelo de um grau de liberdade	29
Figura 18. Representação da viga em corte longitudinal. (LIAO et al, 2008).....	32
Figura 19. Espessuras fornecidas pela <i>Piezo Systems, Inc</i> , disponível em https://scilab.co.jp/product/mems/download/piezo_systems_catalog.pdf , acessado em 30/11/2020.....	34
Figura 20. Comprimentos e larguras fornecidos pela <i>Piezo Systems, Inc</i> , disponível em https://scilab.co.jp/product/mems/download/piezo_systems_catalog.pdf , acessado em 30/11/2020.....	34
Figura 21. Validação do modelo desenvolvido.....	35
Figura 22. Tela inicial da aplicação.	36
Figura 23. a) Tela de entrada dos parâmetros dos materiais; b) janela para adição de novo material piezelétrico na lista de seleção; c) perspectiva trimétrica da viga em balanço com duas camadas piezelétricas acopladas em modo 31 bimorfo; d) vista da secção transversal do modelo.	37
Figura 24. Painel de resultados para simulação de resposta piezelétrica.....	38
Figura 25. Influência da espessura da camada de piezelétrico no módulo do termo de acoplamento eletromecânico.	39
Figura 26. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre a capacitância.	40
Figura 27. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre os deslocamentos relativos à base.....	41
Figura 28. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre a tensão elétrica. .	42
Figura 29. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre a potência de saída	43
Figura 30. Influência da largura da viga sobre o módulo do termo de acoplamento eletromecânico.....	43
Figura 31. Influência da largura da viga sobre a Capacitância	44
Figura 32. Influência da largura da viga sobre os deslocamentos	44
Figura 33. Influência da largura da viga sobre a tensão elétrica.....	45
Figura 34. Influência da largura da viga sobre a tensão elétrica.....	46
Figura 35. Influência do Comprimento da viga sobre o módulo do termo de acoplamento eletromecânico.....	47

Figura 36. Influência do comprimento da viga sobre a capacitância.....	47
Figura 37. Influência do comprimento da viga sobre os deslocamentos.	48
Figura 38. Influência do comprimento da viga sobre a tensão elétrica.....	48
Figura 39. Potência de saída vs Comprimento da viga	49
Figura 40. Potência de saída vs Frequência.	49
Figura 41. Eficiência vs Resistência	51
Figura 42. Curva de resposta na frequência para diferentes valores de resistência.	51
Figura 43. Deslocamentos vs Razão de frequências, para termo de acoplamento calculado a partir das dimensões e propriedades de materiais apresentados na tabela 4.....	53
Figura 44. Deslocamentos vs Razão de frequências, para termo de acoplamento eletromecânico igual a zero.	53
Figura 45. Deslocamentos vs Fração de amortecimento.....	54
Figura 46. Tensão elétrica vs Fração de amortecimento.	55
Figura 47. Potência de saída vs Fração de amortecimento.	55
Figura 48. Comparação entre o modelo analítico e o experimento, Du Toit (2005).	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação de diferentes dispositivos de colheita de energia de pequena escala (S. Pryia et al., 2016).	8
Tabela 2. Frequência e aceleração de várias fontes de vibração (Traduzido de Li <i>et al</i> , 2014).....	13
Tabela 3. Três primeiros modos de vibração de uma viga em balanço (INMAN, 2014).	32
Tabela 4. Propriedades geométricas e de material do dispositivo utilizadas por Kim (2010).	33
Tabela 5. Respostas do sistema segundo parâmetros determinados pelo usuário.....	52

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais tem crescido o interesse por novas formas de colher energia de forma limpa e renovável, sendo um tema recorrente em diversos estudos e pesquisas. A crescente demanda de fontes de energia alternativas às tradicionais (baseada em emissão de CO₂) para sensores eletrônicos de baixa potência e sensores sem fio autônomos deu origem a atividades de pesquisa substanciais nesse campo. (ZAKHAROV, *et al.*, 2012).

Diante de uma crescente demanda tecnológica em busca de fontes alternativas de energia elétrica para Redes de Sensores sem Fio (RSSF), um conceito que tem sido amplamente estudado é *energy harvesting* ou “colheita de energia” (PACHECO, *et al.*, 2016). Entre as muitas fontes de energia disponíveis no ambiente (por exemplo, vibração, solar, térmica, radiofrequência e vazão de fluido), vibrações mecânicas representam uma das mais promissoras para a colheita de energia devido à sua abundância em ambientes naturais e artificiais. (SANTOS, *et al.*, 2018).

Um dos métodos de colheita de energia envolve o uso de materiais piezelétricos, transdutores capazes de intercambiar energia elétrica e deformação mecânica. (SODANO, *et al.*, 2004). Os materiais piezelétricos, quando submetidos a uma deformação mecânica, sofrem um processo de reorientação dos dipolos elétricos no interior do material, promovendo uma diferença de potencial, diretamente proporcional à deformação sofrida. Este fenômeno ficou conhecido como efeito piezelétrico direto. De modo contrário, quando submetido a um campo elétrico, pode-se observar uma deformação induzida no material - efeito piezelétrico reverso. (ADEODATO, 2017).

O presente trabalho desenvolve uma metodologia para auxiliar o dimensionamento de dispositivos de colheita de energia baseados em vigas em balanço com elementos piezelétricos. A metodologia proposta envolve a exploração de um modelo analítico validado experimentalmente por outros trabalhos encontrados na literatura, implementando-o numa planilha de cálculo com interface gráfica do usuário, automatizada por meio da linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA).

Esta planilha apresenta resultados associados à largura de banda do dispositivo, bem como a quantidade de energia gerada para um determinado dimensionamento. A interface permite que o usuário conheça os efeitos da variação de parâmetros dimensionais e de materiais na resposta do dispositivo para colheita de energia.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O primeiro registro do efeito piezelétrico se deu em 1880, quando os franceses Jacques e Pierre Curie notaram um comportamento curioso em certos minerais cristalinos: ao serem submetidos a deformação mecânica, os cristais se tornavam eletricamente polarizados, sendo capazes de gerar corrente elétrica. A isso deu-se o nome de “efeito piezelétrico direto”. Foi descoberto também que ao se submeter estes materiais a um campo elétrico, os mesmos se deformavam; isso ficou conhecido como efeito piezelétrico inverso (MONTEIRO *et al.*, 2016)

Nos últimos anos, a redução drástica no consumo energético de dispositivos eletrônicos de pequeno porte vem motivando a pesquisa de meios para alimentar estes componentes utilizando a vibração disponível no ambiente, especialmente para aplicações em sensores remotos / *wireless* (Erturk e Inman, 2009).

Em 1996, William e Yates propuseram um dispositivo para gerar energia através de vibrações mecânicas e conceberam três métodos de transdução: piezelétrico, eletromagnético e eletrostático. O modelo utilizado tinha apenas um grau de liberdade e consistia num oscilador massa, mola e amortecedor, onde o amortecimento seria em virtude da transformação de energia mecânica para elétrica e outros efeitos dissipativos indesejados.

Ao longo dos anos, os materiais piezelétricos mostraram-se atrativos do ponto de vista da colheita de energia, isto porque outros métodos de transdução apresentaram limitações técnicas significativas. Através do uso de elementos piezelétricos é possível coletar energia diretamente de vibrações estruturais: são necessários poucos componentes adicionais e é possível construir dispositivos funcionais com geometrias relativamente simples (COOK-CHENNAULT, 2008). Além disso, este tipo de solução tem sido usualmente adotada para conversão eletromecânica devido à sua alta densidade de potência de saída e eficiência na conversão de energia, quando comparado com os métodos mencionados (MONTEIRO *et al.*, 2016), conforme observado na Figura 1.

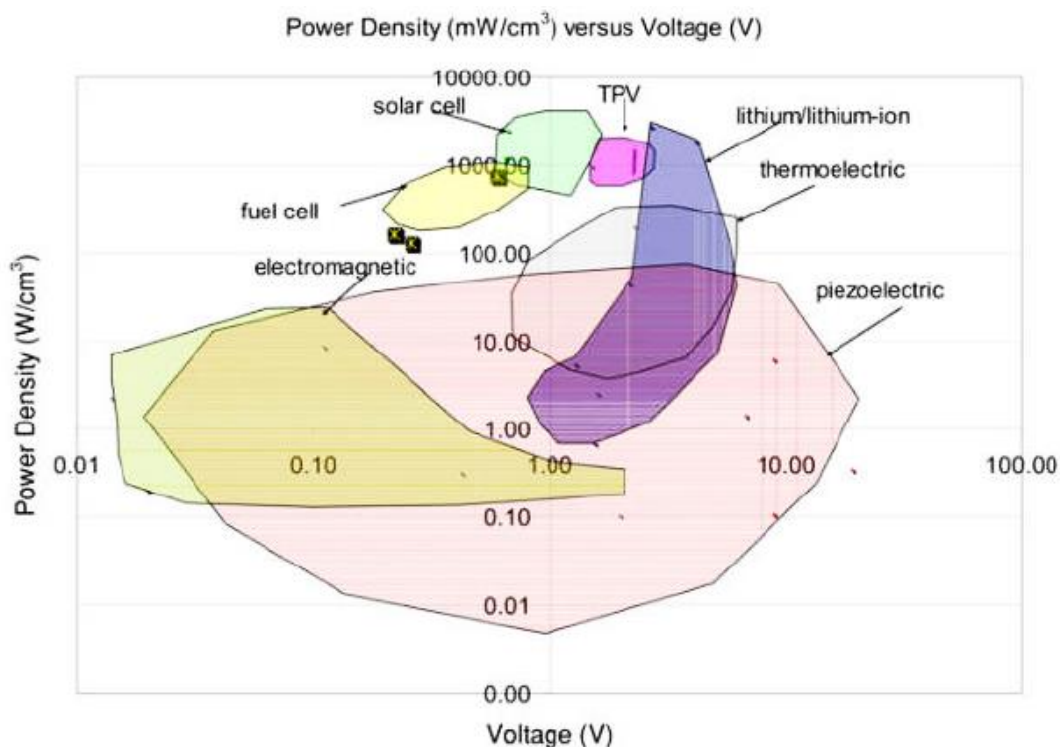


Figura 1. Densidade de potência vs diferença de potencial para diversos tipos de colheita de energia. (COOK-CHENNAULT, et al., 2008)

Diversos modelos analíticos foram propostos para descrever o comportamento do dispositivo em questão, desde simples até mais complexos. Roundy *et al*, 2003 e Du Toit, 2005, desenvolveram modelagens considerando o sistema com um único grau de liberdade. De acordo com Erturk e Inman (2009), este tipo de modelagem mostra-se conveniente, uma vez que os componentes elétricos do sistema - formado por um capacitor (devido à capacitância interna do piezocerâmico) e um resistor (devido a uma resistência externa da carga) - já consistem em parâmetros agrupados.

Erturk *et al.* 2011 destacam como etapas necessárias para colheita de energia piezelétrica: identificação de fontes de vibração no meio ambiente; (2) desenvolvimento de um dispositivo utilizando materiais piezelétricos para conversão de energia mecânica em elétrica; (3) desenvolvimento de um circuito que possua um conversor AC/DC e um regulador de tensão para armazenamento da energia através de capacitores ou baterias, para que no fim seja empregado na alimentação de dispositivos eletrônicos de baixa potência que utilizarão a energia proveniente do piezelétrico. A Figura 2, apresenta um esquema de forma concisa (ADEODATO, 2017).

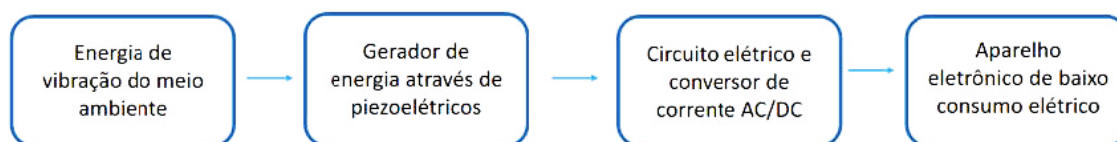


Figura 2. Esquema representativo da colheita de energia proveniente de um piezelétrico através de vibrações mecânicas. (Erturk, et al., 2011)

Em colheita de energia piezelétrica, destacam-se os parâmetros: área ativa, volume, frequência de ressonância, potência máxima possível de ser alcançada e densidades de potência em volume ou área. Dispositivos com densidades de **potência** relativamente maiores ou materiais não-PZT, são mostrados e comparados na **Tabela 1**. Comparação de diferentes dispositivos de colheita de energia de pequena escala (S. Pryia et al., 2016). Os atributos de desempenho definidos anteriormente para diversos dispositivos citados na literatura são apresentados na Tabela 1 (S. Pryia *et al.*, 2016):

Tabela 1. Comparação de diferentes dispositivos de colheita de energia de pequena escala (S. Pryia et al., 2016).

Referência	Material	Área mm ²	Volume mm ³	Aceleração	Frequência Hz	Potência μ W	Densidade de potência em área (μ W/(mm ² .Hz.g ²))	Densidade de potência em volume (μ W/(mm ³ .Hz.g ²))
Muralt et al. (2009a)	PZT, d ₃₃	0,96	0,48	2	870	1,4	$4,19 \times 10^{-4}$	$8,38 \times 10^{-4}$
Morimoto et al. (2010)	PZT, d ₃₁	76,5	4,05	0,5	126	5,3	$2,20 \times 10^{-3}$	$4,15 \times 10^{-2}$
Hajati and Kim (2011)	PZT, d ₃₃	120	0,02	4	1300	22	$8,81 \times 10^{-6}$	$5,29 \times 10^{-2}$
Durou et al. (2010)	PZT		464	0,2	76	13,9		$9,85 \times 10^{-3}$
Defosseux et al. (2012)	AIN, d ₃₁	3.573	2,8	0,275	214	0,63	$1,09 \times 10^{-2}$	$1,39 \times 10^{-2}$
Marzencki et al. (2007)	AIN, d ₃₁	1.573	-	0,126	214	0,55	$1,03 \times 10^{-1}$	
Hirasawa et al. (2010)	AIN		1,63	1	857	0,18		$1,29 \times 10^{-4}$
Elfrink et al. (2010)	AIN		15	0,2	599	69		$1,92 \times 10^{-1}$
Xu et al. (2011a)	PZT		20,9	1	329	7,35		$1,07 \times 10^{-3}$
Lei et al. (2011)	PZT		18,6	1	235	14		$3,20 \times 10^{-3}$
Park, Park, and Lee (2010)	PZT, d ₃₃	1,8	1,05	0,39	528	1,1	$7,61 \times 10^{-3}$	$1,30 \times 10^{-2}$
Fang et al. (2006)	PZT, d ₃₁	2,65	0,78	1	608	2,16	$1,34 \times 10^{-3}$	$4,55 \times 10^{-3}$
Lee et al. (2009)	PZT, d ₃₁	4,5	0,452	2,5	255,9	2,765	$3,84 \times 10^{-4}$	$3,82 \times 10^{-3}$
Aktakka (2012)	PZT, d ₃₁	49	27	1,5	154	205	$1,21 \times 10^{-2}$	$2,19 \times 10^{-2}$
Kanno et al. (2012)	KNN, d ₃₁	56,1	11,4	1	1.036	1,1	$1,89 \times 10^{-5}$	$9,30 \times 10^{-5}$

Recentemente, as tecnologias de Micro Sistemas Eletromecânicos (MSE) foram aplicadas para desenvolvimento de coletores integrados (S. Pryia *et al.*, 2016), assim como diversos tipos de configurações, materiais e tecnologias de fabricação que foram sendo implementadas ao longo dos anos, conforme o avanço e desenvolvimento tecnológico.

2.1. Configurações de dispositivos piezelétricos

A literatura dispõe de trabalhos sobre vigas em balanço com seção transversal retangular. Pode-se destacar que os modelos apresentam tensões relativamente altas para uma determinada força aplicada. Além de vigas em balanço com perfis retangulares, diversos projetos estruturais são explorados para coincidir a frequência natural do dispositivo com a frequência de excitação da fonte externa e assim aumentar o desempenho de potência convertida.

Outra estrutura mecânica estudada para a aplicação de elementos piezelétricos é o diafragma circular. A deflexão de uma estrutura de diafragma no modo de pressão causa tensão de compressão ou tração em diferentes locais. Segundo LIU *et al* (2018) uma variedade de campos de pressão pode ser convertida em um sinal elétrico de corrente alternada por conversores de diafragma piezelétricos. As análises teóricas e experimentais de diafragmas circulares piezelétricos operando sob pressões variáveis foram apresentadas por Kim *et al.* (2005) e Mo *et al.* (2010). Entretanto, deve-se notar que o diafragma circular é consideravelmente mais rígido que uma viga em balanço do mesmo tamanho, resultando em maiores frequências de ressonância na operação do modo de vibração (LIU, 2018).

2.2. Tipos de materiais piezelétricos

O primeiro material piezelétrico natural relatado foi o quartzo, descoberto em 1880 pelos físicos franceses Jacques e Pierre Curie. Após cerca de 140 anos de desenvolvimento, pesquisadores descobriram alternativas para materiais naturais e desenvolveram outros materiais piezelétricos artificiais com excelentes propriedades para se adaptarem a diversos cenários de aplicação (LIU, 2018). Atualmente, os diferentes tipos de materiais de coleta de energia piezelétricos disponíveis são os materiais inorgânicos, polímeros piezelétricos e materiais biopiezelétricos.

2.2.1. *Piezelétricos inorgânicos*

Materiais piezelétricos inorgânicos são amplamente aplicados na coleta de energia e tradicionalmente divididos em dois tipos: cristais piezelétricos e cerâmicos piezelétricos. Os cristais piezelétricos apresentam estrutura cristalina única e piezeletricidade natural, como filme de quartzo e nanofios de ZnO (SODANO *et al.*, 2007). Já os cerâmicos piezelétricos são compostos de pequenos cristais com orientações aleatórias e só manifestam piezeletricidade após um processo de polarização, normalmente aplicando um alto campo elétrico para alinhar as orientações dos dipolos no interior do cristal (LIU, 2018).

2.2.2. *Polímeros piezelétricos*

Em comparação com materiais piezelétricos inorgânicos, polímeros piezelétricos como PVDF são relativamente mais flexíveis, fáceis de processar e com melhores propriedades mecânicas, (FANG *et al.*, 2011; PAN *et al.*, 2015).

2.2.3. *Biopiezelétricos*

É interessante notar que alguns tecidos biológicos e microrganismos apresentam propriedades piezelétricas, como seda, ossos e vírus específicos (GHOSH *et al.*, 2016). Os materiais biopiezelétricos potencialmente oferecem uma abordagem simples e ecologicamente adequada para geração de energia. No entanto, materiais biopiezelétricos são mais apropriados para aplicações de curto prazo ou de uso único devido ao tempo de vida útil dos biomateriais (LIU, 2018).

Em resumo, vários materiais piezelétricos vêm sendo estudados e aplicados para deformação mecânica com amplitude e frequência variáveis a partir de ambientes

específicos, tais como movimentos humanos, alongamento ou compressão e vibrações da máquina (LIU, 2018).

2.3. Aplicações de elementos piezelétricos

Recentes avanços na coleta de energia foram intensificados devido às necessidades urgentes de sistemas eletrônicos portáteis ou sem fio e sistemas com longa vida útil para um amplo potencial de aplicações. Dispositivos piezelétricos são intensamente desenvolvidos para capturar energia ambiental e fornecer energia para sensores em um módulo autônomo, ou em trabalhando conjunto circuitos eletrônicos para prolongar sua vida útil (LIU, 2018).

Segundo STARNER (2004), com a diminuição do consumo de energia de dispositivos eletrônicos portáteis e biomédicos, tornou-se viável a colheita de energia elétrica para alimentar esses dispositivos a partir de atividades humanas, como balanços de braço, andar, correr, respirar ou digitar com teclado, bem como pequenos movimentos biomecânicos de músculos e órgãos no interior do corpo, por exemplo batimento cardíaco, fluxo sanguíneo, piscar de olhos ou alongamento muscular, etc.

SHENCK e PARADISO (2001), no *MIT Media Laboratory*, propuseram uma unidade de colheita de energia pioneira que era constituído por um gerador piezelétrico acoplado a um sapato com um completo circuito de condicionamento de energia subsequente, conforme a Figura 3. Sapatos de identificação por radiofrequência (RFID) com tecnologia eletrônica piezelétrica. (SHENCK e PARADISO, 2001).

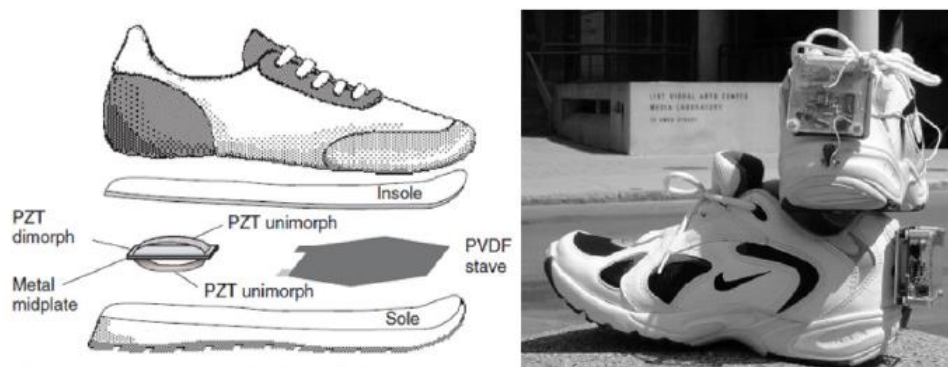


Figura 3. Sapatos de identificação por radiofrequência (RFID) com tecnologia eletrônica piezelétrica. (SHENCK e PARADISO, 2001)

Assim como GRANSTROM et al., (2007) acoplaram um elemento piezelétrico às alças de uma mochila para aproveitar o movimento vertical dos ombros na geração de

energia. A Figura 4 mostra a idealização de como filmes de PVDF (polímero piezolétrico) podem ser acoplados à alça de uma mochila. A partir do experimento, detectaram que a mochila é capaz de disponibilizar 45,6 mW de potência (ADEODATO, 2017).

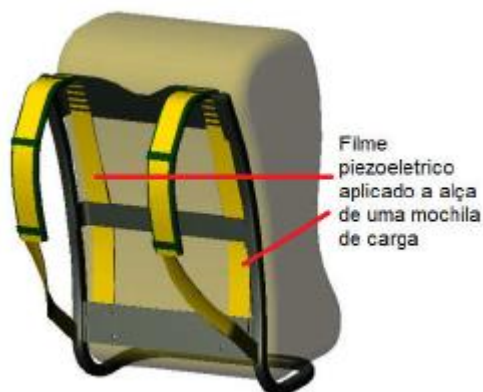


Figura 4. Esquema da mochila com filmes piezolétricos acoplados às alças para colheita de energia. (ADEODATO, 2017).

DAGDEVIREN *et al.* (2014) desenvolveram um dispositivo piezolétrico capaz de converter a energia de movimentos naturais de contração e dilatação de músculos do coração, pulmão e diafragma em energia elétrica, até excedendo os níveis relevantes para uso prático em implantes (LIU, 2018), conforme a Figura 5.

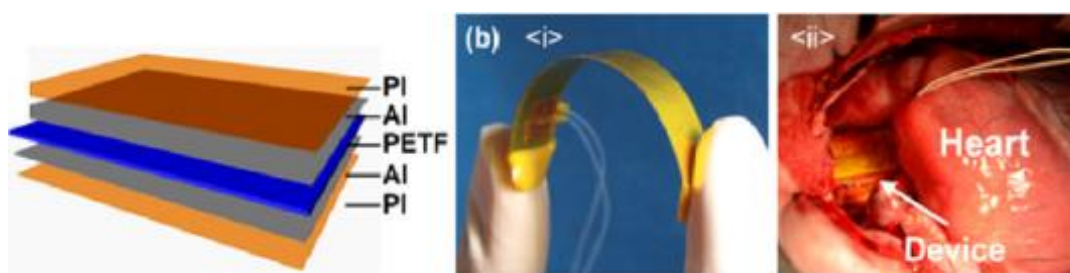


Figura 5. Monitoramento da pressão arterial implantável e autoalimentado baseado em um filme fino piezolétrico. (DAGDEVIREN *et al.*, 2014).

Além disso, tratando-se de aplicações de colheita de energia com elementos piezolétricos, torna-se importante destacar a necessidade de coincidir a frequência de excitação da fonte com a frequência natural do dispositivo. Nesse contexto, Li *et al* (2014) listaram algumas fontes de vibração com respectivas frequências e amplitudes de aceleração (Tabela 2):

Tabela 2. Frequência e aceleração de várias fontes de vibração (Traduzido de Li *et al*, 2014)

Fonte da vibração	Frequência (Hz)	Amplitude da aceleração (m/s ²)
Painel de instrumentos no carro	13	3
Carcaça do liquidificador doméstico	121	6,4
Secadora de roupas	121	3,5
Aparelho de ar-condicionado no escritório	60	0,2 - 1,5
Refrigerador	240	0,1
Humano andando	2-3	2 - 3

Torna-se, então, necessário escolher configurações de dispositivos que possuam frequências de ressonâncias coincidentes ou próximas da respectiva frequência de excitação da fonte.

CAPÍTULO 3

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são abordados conceitos teóricos como a teoria de Euler-Bernoulli e a dinâmica que subjaz às equações de movimento, discorrendo sobre o conceito do acoplamento eletromecânico linear e relações constitutivas e apresentando arranjos típicos e modos de operação de dispositivos piezelétricos de colheita de energia.

3.1. Acoplamento Eletromecânico linear

Conforme apontado na revisão bibliográfica, os materiais piezelétricos exibem dois tipos de comportamento: o chamado efeito piezelétrico direto (quando a deformação mecânica é convertida em sinal elétrico), amplamente utilizado em sensores, como acelerômetros; e o efeito piezelétrico inverso (quando o material se deforma na presença de um campo elétrico), cuja aplicação consiste em atuadores.

3.1.1. Modelo Físico

Os átomos que constituem um elemento piezelétrico encontram-se, na maioria dos casos, organizados em estruturas cristalinas conforme a Figura 6:

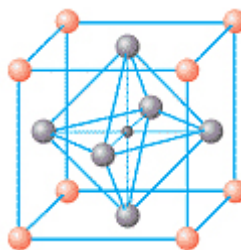


Figura 6. Estrutura cristalina de um elemento piezelétrico. (LEO, 2007)

De acordo com LEO (2007), dentre as 32 estruturas cristalinas estudadas, 10 apresentam um eixo polar no qual é possível observar uma separação das cargas positivas no cristal em relação às negativas. Esta separação de cargas é chamada de dipolo elétrico.

O dipolo elétrico pode ser descrito como uma carga positiva e uma carga negativa separadas por um pivô no centro. Ao serem submetidas a campo elétrico, essas duas cargas tendem a se atrair, e o dipolo irá rotacionar, gerando movimento das cargas. Considerando que o dipolo está “anexado” ao material em volta (o que é aceitável para uma visualização,

mas não é exatamente o que ocorre na realidade), então esta rotação produzirá uma deformação no material - efeito piezoeletrico reverso - (LEO, 2007).

A recíproca também é verdadeira: ao se aplicar deformação mecânica, os dipolos também se movimentarão, causando assim um “fluxo de carga aparente”, que pode ser mensurado através de eletrodos na extremidade do material - efeito piezoeletrico direto - (LEO, 2007).

3.1.2. *Propriedades e relações constitutivas*

Para prosseguir à modelagem analítica, é importante compreender as relações constitutivas dos materiais piezoeletricos, uma vez que o termo de acoplamento eletromecânico que aparece nas equações de movimento é descrito em função da geometria e das propriedades a serem descritas neste capítulo.

Os materiais piezoeletricos podem ser descritos a partir de três propriedades, todas elas correlacionando as grandezas de maneira linear. São elas:

- A) Flexibilidade Elástica (“*Elastic compliance*”): para um modelo unidimensional corresponde ao inverso do módulo de elasticidade, é medida em $[m^2/N]$;
- B) Permissividade dielétrica (ϵ): correlaciona a densidade de corrente ao campo elétrico aplicado;
- C) Coeficiente de deformação piezoeletrico (d): correlaciona o campo elétrico aplicado à deformação resultante, é medido em C/N ou m/V .

A seguir será mostrado como essas propriedades relacionam as variáveis mais importantes para se avaliar o efeito piezoeletrico. Cabe ressaltar aqui que todas as relações se estabelecerão em regime linear, ou seja, para deformações e tensões menores que 1%.

3.1.2.1. *Efeito Piezoeletrico direto*

Uma relação constitutiva relevante na análise do efeito piezoeletrico direto é aquela entre deformação e tensão. A Figura 7 ilustra essa relação onde observa-se uma região inicial linear.

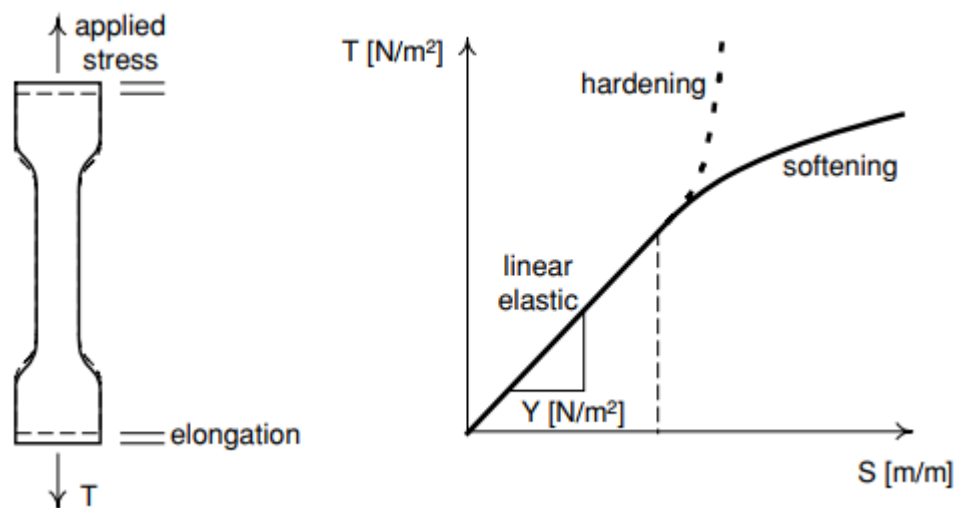


Figura 7. Representação do comportamento tensão-deformação para um material elástico (LEO, 2007).

Na região linear, esse comportamento pode ser expresso pela equação (1):

$$S = \frac{1}{Y} T = sT \quad (1)$$

Essa equação é a Lei de Hooke, em que S é deformação, Y é o módulo de elasticidade e T representa a tensão.

A próxima relação se dá entre deslocamento elétrico – ou “*Electric Displacement*” em inglês – e a tensão mecânica aplicada ao material. Esta relação é típica do efeito piezoeletrico direto e está ilustrada na Figura 8:

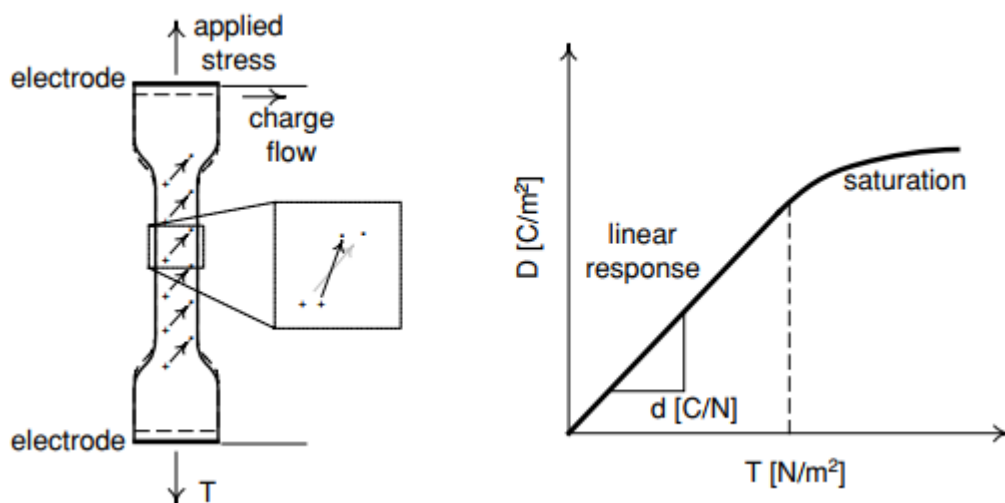


Figura 8. Relação entre tensão e deslocamento elétrico em um material piezoeletrico. (LEO, 2007).

Essa relação está representada na equação (2):

$$D = dT \quad (2)$$

onde a constante d representa o coeficiente de deformação piezoeétrica - do inglês “*piezoelectric strain coefficient*” - medida em C/N, e D representa deslocamento elétrico, medido em C/m².

4.1.2.2. Efeito piezoeétrico inverso

As equações (1) e (2) representam a relação entre um esforço mecânico aplicado ao material e a resposta elétrica observada. Entretanto, a recíproca é verdadeira; ao aplicar-se um campo elétrico, os dipolos presentes na rede cristalina rotacionam promovendo uma deformação no material. Outra relação constitutiva importante para caracterizar este fenômeno é aquela que envolve deslocamento elétrico e campo elétrico aplicado. Esta relação está representada na Figura 9:

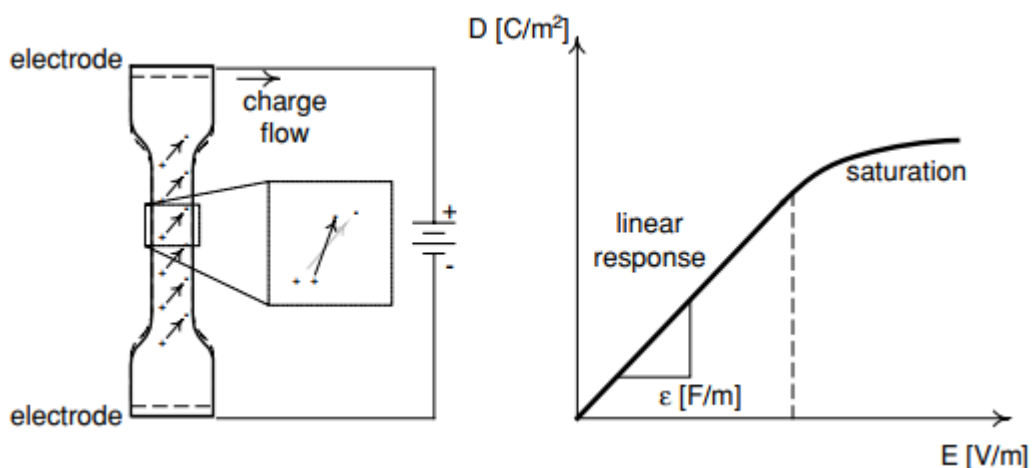


Figura 9. Relação entre campo elétrico aplicado e deslocamento elétrico em materiais piezoeétricos. (LEO, 2007).

Esta relação está representada na equação (3):

$$D = \epsilon E \quad (3)$$

onde a constante ϵ representa a permissividade dielétrica do material, medida em F/m e E o campo elétrico aplicado, medido em V/m.

É importante destacar que esta relação é válida para quando a relação entre campo elétrico e deslocamento elétrico é linear (LEO, 2007).

Por último, relaciona-se a deformação ao campo elétrico aplicado, conforme a Figura 10.

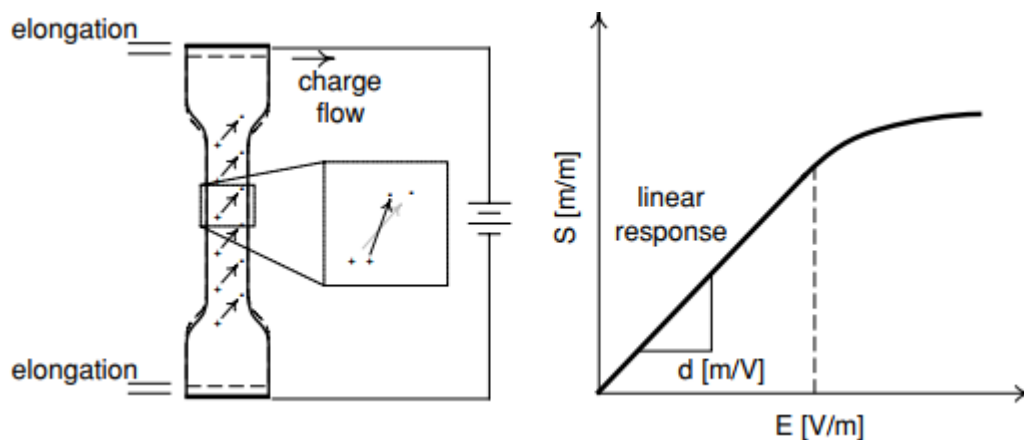


Figura 10. Relação entre campo elétrico aplicado e deformação observada em materiais piezelétricos (LEO, 2007).

Esta relação está representada na equação (4):

$$S = dE \quad (4)$$

onde o coeficiente d é obtido em m/V.

3.1.2.3. A Forma Matricial

As relações apresentadas nas equações lineares (1-4) podem ser reunidas e expressas na forma matricial:

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d \\ d & \epsilon^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Os sobrescritos E e T significam que as respectivas propriedades foram medidas sob campo elétrico constante (frequentemente nulo, ou seja, em condição de curto-circuito) e sob tensão constante (frequentemente nula, ou seja, em condição de circuito aberto), respectivamente. Vale observar que a matriz dos coeficientes é simétrica e que os termos da diagonal principal variam em função das condições de contorno impostas ao material, o que não ocorre com o coeficiente d (LEO, 2007).

Uma segunda forma de se escrever as relações constitutivas dos materiais piezelétricos é expressa de acordo com IEEE (1987), substituindo-se a equação (1) nas equações (2) e (4),

substituindo os termos de tensão pelos de deformação e vice-versa. O que resulta disso é a definição de um novo parâmetro proveniente das relações já estabelecidas:

$$e = \frac{d}{s} \quad (6)$$

onde e é definido como o coeficiente tensão piezoeletrico e é medido em N/V.m.

Desta forma, a equação (5) pode ser reescrita como:

$$\begin{Bmatrix} T \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & e \\ e & \epsilon^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S \\ E \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Du Toit (2005), ao elaborar o modelo unidimensional do dispositivo de colheita de energia baseado em vibrações, utilizou-se do coeficiente de deformação piezoeletrico desta segunda forma matricial para definir o termo de acoplamento eletromecânico que foi inserido nas equações de equilíbrio mecânico e elétrico que serão utilizadas neste trabalho.

3.1.3. Polarização

Após serem processados, os materiais piezoeletricos apresentam ainda efeito piezoeletrico muito fraco, devido ao fato de os dipolos elétricos estarem orientados em direções aleatórias. Por isso, torna-se necessário realizar o processo de polarização, onde o material é submetido a temperaturas acima da temperatura de Curie e campos elétricos intensos, da ordem de 2000 V/mm (LEO,2007). Após os dipolos se orientarem para uma determinada direção, a temperatura e o campo elétrico são rapidamente reduzidos, para que os dipolos continuem uniformemente orientados. O processo está esquematizado na Figura 11a, b e c.

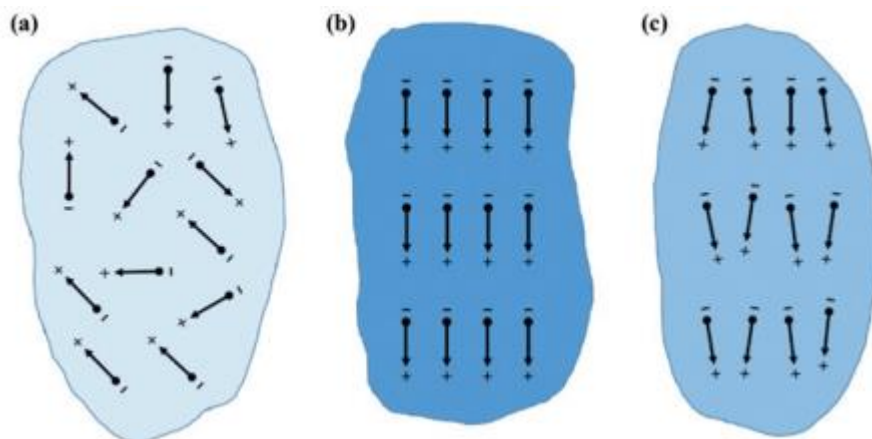


Figura 11. a) Dipolos orientados aleatoriamente; b) Material sujeito a campo elétrico e temperatura; c) Dipolos uniformemente orientados após redução de temperatura (LEO, 2007).

3.1.4. Anisotropia

Os materiais piezelétricos são anisotrópicos, ou seja, exibem propriedades que variam de acordo com a direção em que são avaliadas. Em vista disso, foi convencionado o sistema de coordenadas expresso na Figura 12.

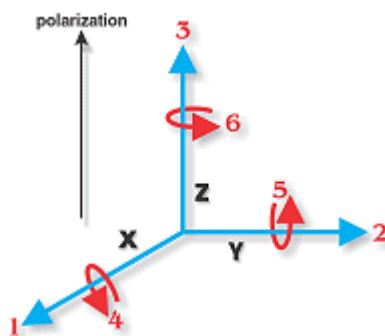


Figura 12. Direção dos esforços relativos a direção de polarização, conforme a convenção (APC International Ltd, 2011).

Dessa forma, propriedades como o coeficiente de deformação piezelétrica d , passam a ser escritos com sub-índices, como por exemplo, d_{ij} , onde i e j indicam a direção da polarização e a direção em que o esforço é aplicado, respectivamente. A flexibilidade elástica s e a permissividade ϵ também variam conforme as direções associadas. Por exemplo, é comum encontrar nas especificações dos fabricantes os valores para ϵ_{33} , ou seja, a permissividade do material quando o esforço e a polarização são realizados na mesma direção.

3.1.5. Arranjos e modos mais comuns de operação

Existem muitas formas e configurações de dispositivos de colheita de energia piezelétrica. Uma configuração amplamente difundida e estudada que recebeu maior atenção é a condição *cantilever beam*, ou “viga em balanço”, objeto de estudo deste trabalho. O dispositivo pode ser unimorfo ou bimorfo; no caso de ser bimorfo, as camadas de piezelétrico podem ser associadas em série ou paralelo. No que tange às direções, os dois modos mais comuns de trabalho são o modo 33 e o modo 31. Estas configurações são resumidas na Figura 13:

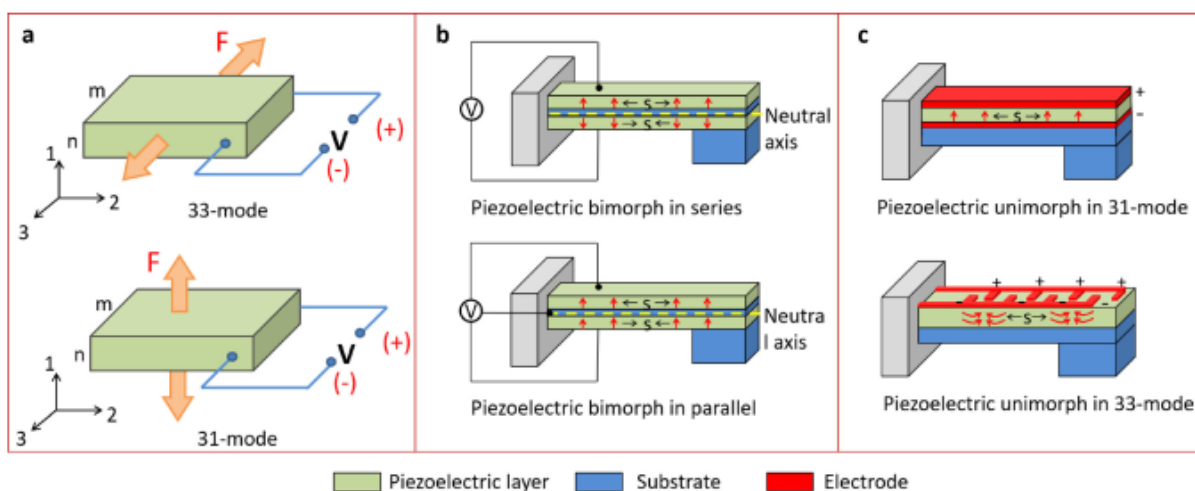


Figura 13. a) Material piezelétrico operando nos modos 33 e 31; b) Viga em balanço no modo 31 com conexões em série e paralelo; c) Configuração em balanço unimorfo nos modos 33 e 31. (S. Pryia, 2016).

3.2. Análise modal de uma viga em balanço segundo a Teoria de Euler-Bernoulli

A teoria das vigas de Euler-Bernoulli pode ser assumida na modelagem de uma viga em balanço submetida a vibração na direção transversal, conforme apresentado na Figura 14. Esta hipótese também é assumida pelos autores em outros trabalhos - i.e. Erturk e Inman (2009), Du Toit (2005), Kim *et al* (2010) - com o intuito de realizar a análise modal da viga em balanço. Ela se mostra adequada para modelar estruturas em que a hipótese de viga longa é verificada, ou seja, o cisalhamento transversal é desprezível. Esta teoria é utilizada no presente trabalho.

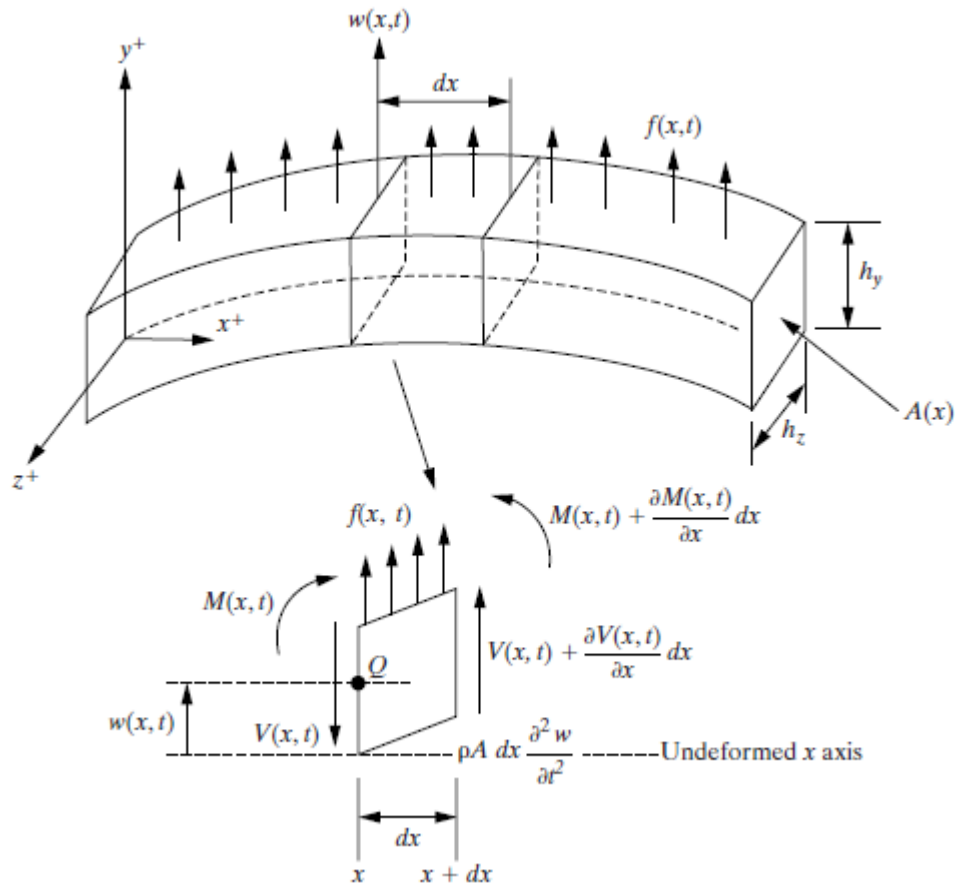


Figura 14. Equilíbrio de esforços em um elemento de viga segundo a hipótese da viga de Euler-Bernoulli (Inman, 2014).

A viga utilizada para explicar a teoria possui seção transversal retangular uniforme com largura h_y , espessura h_z e comprimento l . Também está associada à viga uma rigidez à flexão $EI(x)$, em que E é o módulo de elasticidade de para a viga e $I(x)$ é o momento de inércia da seção transversal em torno do eixo z . A viga está submetida a um momento fletor $M(x, t)$, que é relacionado à deflexão da viga $w(x, t)$ segundo a equação (8):

$$M(x, t) = EI(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \quad (8)$$

Supondo que a deformação seja pequena o suficiente para que a cisalhamento transversal seja muito menor que a tensão axial de flexão na viga, de modo que os lados do elemento dx permaneçam paralelos, um somatório de forças na direção y produz:

$$V(x, t) + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} dx - V(x, t) + f(x, t) dx = -\rho A(x) dx \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \quad (9)$$

onde $V(x,t)$ representa a força de cisalhamento na extremidade esquerda do elemento dx , $V(x,t) + V_x(x,t)dx$ representa a força de cisalhamento na extremidade direita do elemento dx , $f(x,t)$ a força externa total aplicada ao elemento por comprimento unitário, e o termo no lado direito da igualdade é a força inercial do elemento. A hipótese de viga longa usada no balanço de forças da equação (9) é verdadeira se $l/h_y \geq 10$, evidenciando a existência de uma viga longa.

A seguir, são somados os momentos atuando no elemento dx em torno do eixo z em relação ao ponto Q . Isso gera:

$$\left[\frac{\partial M(x,t)}{\partial x} + V(x,t) \right] dx + \left[\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} + \frac{f(x,t)}{2} \right] dx^2 = 0 \quad (10)$$

Como dx é considerado elemento infinitesimal, dx^2 torna-se, de modo que essa expressão seja simplificada em:

$$V(x,t) = - \frac{\partial M(x,t)}{\partial x} \quad (11)$$

Isto mostra que a força de cisalhamento é proporcional à derivada espacial do momento fletor em relação à direção axial da viga. Considerando $A(x)$ como a área de seção transversal da viga, a substituição desta expressão pela força de cisalhamento na equação (9) produz:

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} \right] = f(x,t) \quad (12)$$

Se nenhuma força externa for aplicada, de modo que $f(x,t) = 0$ e se $EI(x)$ e $A(x)$ forem considerados constantes, a equação (12) pode ser simplificada para que a vibração livre seja governada por:

$$\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} = 0, \quad c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (13)$$

Note que, ao contrário das equações anteriores, a equação de vibração livre (13) contém quatro derivações espaciais e, portanto, requer quatro condições de contorno no cálculo para solução. A presença das duas derivadas temporais exige novamente que sejam especificadas duas condições iniciais, uma para o deslocamento e outra para a velocidade.

As condições de contorno necessárias para resolver a equação espacial em uma solução da separação de variáveis da equação (13) são obtidas examinando a deflexão $w(x,t)$, a inclinação da deflexão $\partial w(x,t) / \partial x$, o momento fletor $EI \partial^2 w(x,t) / \partial x^2$ e a força de cisalhamento $\partial [EI \partial^2 w(x,t) / \partial x^2] / \partial x$ em cada extremidade da viga.

Se uma viga em vibração transversal é livre em uma extremidade, a deflexão e a inclinação nessa extremidade são irrestritas, mas o momento fletor e a força de cisalhamento são nulas. Desta forma, para a extremidade livre:

$$\begin{aligned} EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right] &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Se, por outro lado, a extremidade da viga estiver engastada (ou fixa), o momento fletor e a força de cisalhamento são irrestritos, mas a deflexão e a inclinação são nulas nessa extremidade. Assim, para a extremidade engastada:

$$\begin{aligned} w &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Além de satisfazer quatro condições de contorno, a solução da equação (13) para vibração livre pode ser calculada apenas se duas condições iniciais (no tempo) forem especificadas. Essas condições iniciais são especificadas nos perfis de deflexão e velocidade iniciais:

$$w(x, 0) = w_0(x) \text{ e } w_t(x, 0) = \dot{w}_0(x) \quad (16)$$

Assumindo que $t = 0$ é o tempo inicial. Observa-se que, se w_0 e \dot{w}_0 são nulos, nenhum movimento seria gerado.

A solução da equação (13) sujeita a quatro condições de contorno e duas condições iniciais prossegue através do método de separação de variáveis, onde a forma $w(x,t) = X(x)T(t)$ é assumida e substituída na equação do movimento (13).

$$c^2 \frac{X''''(x)}{X(x)} = -\frac{\ddot{T}(t)}{T(t)} = \omega^2 \quad (17)$$

onde as derivadas parciais foram substituídas pelo total de derivadas como anteriormente. Aqui é feita a escolha da constante de separação, ω^2 , com base no pressuposto que a frequência natural vem da seguinte equação temporal, conforme encontrado na literatura:

$$\ddot{T}(t) + \omega^2 T(t) = 0 \quad (18)$$

No que diz respeito ao lado direito da equação (17). A equação temporal apresenta solução na forma conhecida:

$$T(t) = A \operatorname{sen} \omega t + B \operatorname{cos} \omega t \quad (19)$$

onde as constantes A e B serão eventualmente determinadas pelas condições iniciais especificadas após serem combinadas com a solução espacial, que vem do rearranjo da equação (17).

$$X''''(x) - \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 X(x) = 0 \quad (20)$$

Por definição e retornando à equação principal (13), tem-se:

$$\lambda^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI} \quad (21)$$

Logo, a frequência natural do sistema pode ser definida como:

$$\omega_n = \lambda_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (22)$$

Assumindo uma solução para a equação (20) da forma $Ae^{\lambda x}$, a solução geral da equação pode ser calculada para ter a forma:

$$X(x) = a_1 \operatorname{sen} \lambda x + a_2 \operatorname{cos} \lambda x + a_3 \operatorname{senh} \lambda x + a_4 \operatorname{cosh} \lambda x \quad (23)$$

Aqui, o valor para as constantes de integração $a1$, $a2$, e $a3$ serão determinados a partir das quatro condições de contorno. A quarta constante, $a4$, torna-se combinada com as constantes A e B da equação temporal (19), que são determinadas a partir das condições iniciais.

Finalmente, o modelo dado na equação (12), é frequentemente chamado de equação de viga de Euler – Bernoulli. As hipóteses usadas na formulação deste modelo são que a viga seja:

- Uniforme ao longo de seu vão, ou comprimento, e considerada viga longa ($l > 10h$);
- Composta de um material elástico isotrópico linear, homogêneo, livre de esforços;
- De modo que as seções planas permaneçam planas;
- Tal que o plano de simetria da viga também seja o plano de vibração, que rotação e translação são dissociadas;
- Tal que a inércia rotativa e a deformação de cisalhamento possam ser negligenciadas.

3.3. Tensão e Corrente RMS

Em sistemas eletrônicos de corrente alternada, como o que o presente trabalho aborda, é comum que sejam feitas medições de grandezas fundamentais como tensão, corrente e potência em seus valores médios, reais ou eficazes, ao invés de seus valores máximos ou de pico. Isso ocorre devido a forma de onda senoidal da corrente na qual esses sistemas estão submetidos. A representação gráfica do sinal de uma corrente alternada é apresentada na Figura 15:

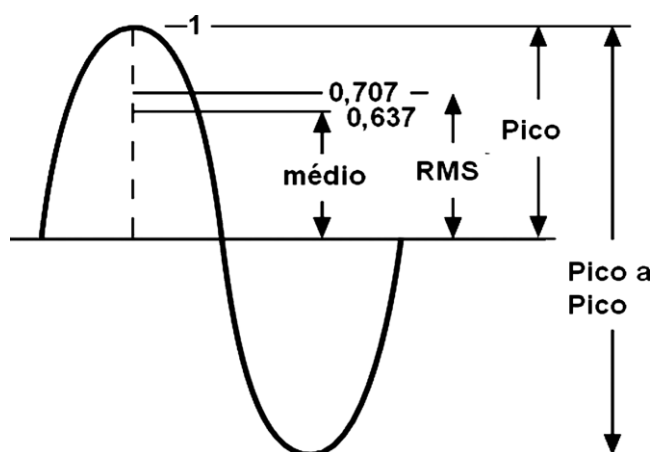


Figura 15. Valores em uma Senóide de corrente alternada, Newton C. Braga (2012).

O valor médio quadrático, ou RMS (do inglês, *root mean square*), corresponde ao valor que uma tensão alternada deve ter para promover o mesmo aquecimento sob uma resistência que uma determinada corrente contínua numa resistência que uma corrente

contínua determinada. Assim, uma tensão de V volts de pico, de um sinal senoidal, causa o mesmo aquecimento num resistor que uma tensão contínua que tenha 0,707 do valor de V . Assim, o valor RMS de uma tensão senoidal pode ser representado por 70,7% de seu valor máximo (pico) (BRAGA, 2012).

$$V_{RMS} = \frac{\sqrt{2}}{2} V_{pico} \quad (24)$$

Analogamente, também é possível que calcular valores eficazes de potência, P_{eficaz} , conforme as equações (25), (26), (27) e (28) .

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (25)$$

$$P_{eficaz} = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (26)$$

Logo,

$$P_{eficaz} = \frac{V^2}{2R} \quad (27)$$

Finalmente,

$$P_{eficaz} = \frac{P}{2} \quad (28)$$

Com base nos conceitos e na teoria apresentada, é possível analisar um modelo piezelétrico bimorfo aplicado a uma viga em balanço (ou *cantilever beam*), através de uma abordagem analítica fundamentada por estudos presentes na literatura.

CAPÍTULO 4

4. MODELAGEM

Neste capítulo será apresentada a abordagem analítica utilizada para o problema estudado. Será considerado o arranjo *cantilever beam* bimorfo (em que as duas camadas de piezelétrico estarão conectadas em série) operando no modo 31, com toda a massa distribuída uniformemente ao longo da viga sem massa de prova concentrada na extremidade livre conforme a Figura 16.

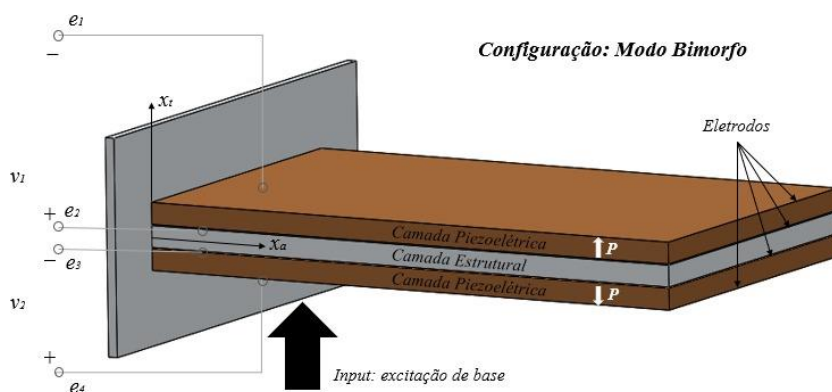


Figura 16. Ilustração de um dispositivo de colheita de energia *cantilever beam* bimorfo e simétrico. As camadas piezelétricas estão conectadas em série no modo 3-1.

Em seu modelo analítico, Kim (2010) e Du Toit (2005) utilizam a abordagem do método de energia e se baseia na teoria de viga de Euler-Bernoulli. Desta forma, as principais características mecânicas e elétricas dos dispositivos são extraídas. O modelo é implementado para o caso de vários elementos coletores de energia aplicados e testados para verificação do mesmo. Cada coletor é composto de duas camadas piezoelétricas, uma camada estrutural e seus respectivos eletrodos. O dispositivo é conectado a um circuito elétrico apropriado o avaliando a energia convertida.

O método, relaciona energia cinética (T_k), energia potencial interna (U), energia elétrica (W_e) e trabalho externo (W), é expresso conforme Du Toit (2005):

$$\int_{t_1}^{t_2} [\delta(T_k - U + W_e) + \delta W] dt = 0 \quad (29)$$

Os termos individuais de energia e o trabalho externo são definidos como:

$$T_k = \frac{1}{2} \int_{V_s} \rho_s \dot{u}^t \dot{u} dV_s + \frac{1}{2} \int_{V_p} \rho_p \dot{u}^t \dot{u} dV_p \quad (30)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_{V_s} S^t T dV_s + \frac{1}{2} \int_{V_p} S^t T dV_p \quad (31)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int_{V_p} E^t D dV_p \quad (32)$$

$$\delta W = \sum_{k=1}^{nf} \delta u_k f_k(t) + \sum_{j=1}^{nq} \delta \varphi_j q_j \quad (33)$$

Após desenvolver estas equações, é possível obter as equações de governo para um sistema massa-mola-amortecedor-piezo-resistor equivalente de um grau de liberdade submetido a excitação de base:

$$M\ddot{r} + C\dot{r} + Kr - \theta v = B_f \ddot{w}_B \quad (34)$$

$$\theta \dot{r} + C_p \dot{v} + \frac{1}{R} v = 0 \quad (35)$$

O arquétipo deste modelo está representado na Figura 17:

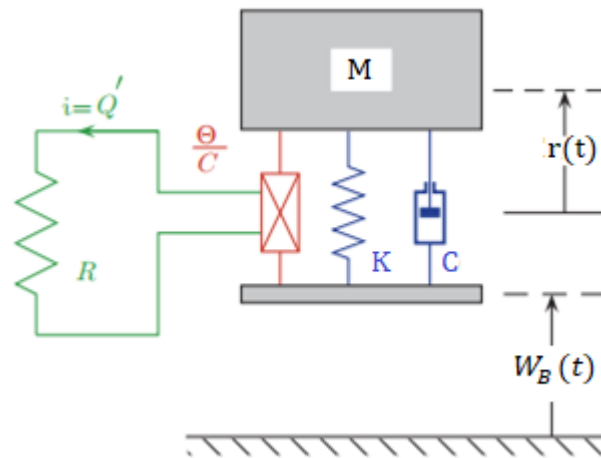


Figura 17. Arquétipo do modelo de um grau de liberdade

Na equação (34) C representa o coeficiente de amortecimento; r o vetor de deslocamento relativo generalizado - para convertê-lo em deslocamento real, é necessário multiplicá-lo pelas respectivas funções de modo de vibração; v é a tensão elétrica obtida através do elemento piezoelétrico; \ddot{w}_B é a aceleração da base, dada como entrada no sistema; e R a resistência do circuito externo.

Deve-se notar, também, que o amortecimento mecânico é incluído na equação 31 pela adição de um termo de amortecimento viscoso, C . Como se supõe que o amortecimento

tenha pouca dependência da frequência natural do dispositivo (Kim, 2010), ele é normalmente medido na frequência natural do dispositivo.

A partir do desenvolvimento das equações de (27) a (30), os termos das equações (31) e (32), massa (M) atribuída ao modelo, rigidez do sistema (K), termo de acoplamento eletromecânico (θ), capacitância (C_p), e vetor de forçamento (B_f), responsável pelo carregamento inercial do sistema, são definidos abaixo, para o caso reduzido de um grau de liberdade:

$$M = \int_0^L m \psi_r^2 dx_a \quad (36)$$

$$K = M \omega_1^2 \quad (37)$$

$$\theta = \int (-x_t \psi_r'') e_{31} (-\nabla \psi_v) dV \quad (38)$$

$$C_p = \int (-\nabla \psi_v) \varepsilon^S (-\nabla \psi_v) dV \quad (39)$$

$$B_f = \int_0^L m(x_a) \psi_r dx_a \quad (40)$$

Como o termo de acoplamento deriva do elemento piezolétrico, ele está diretamente relacionado à constante piezolétrica (e), como mostrado na equação (38).

As equações de governo (34) e (35) possuem soluções previamente definidas que foram apresentadas por Du Toit (2005). Através delas, podem ser obtidas soluções convenientes de amplitude relativa de deslocamento, tensão desenvolvida ao longo do elemento piezolétrico e potência de saída, conforme equações (41), (42) e (43):

$$\left| \frac{r}{B_f \ddot{w}_B} \right| = \frac{1}{K} \frac{\sqrt{1 + (\alpha\Omega)^2}}{[(1 - \Omega^2) - 2\zeta_m \alpha \Omega^2]^2 + \{[(1 + \kappa^2) - \Omega^2] \alpha \Omega + 2\zeta_m \Omega\}^2} \quad (41)$$

$$\left| \frac{v}{B_f \ddot{w}_B} \right| = \frac{1}{|\theta|} \frac{\alpha \kappa^2 \Omega}{[(1 - \Omega^2) - 2\zeta_m \alpha \Omega^2]^2 + \{[(1 + \kappa^2) - \Omega^2] \alpha \Omega + 2\zeta_m \Omega\}^2} \quad (42)$$

$$\left| \frac{P_{out}}{(B_f \ddot{w}_B)^2} \right| = \frac{\omega_n}{K} \frac{\alpha \kappa^2 \Omega^2}{[(1 - \Omega^2) - 2\zeta_m \alpha \Omega^2]^2 + \{[(1 + \kappa^2) - \Omega^2] \alpha \Omega + 2\zeta_m \Omega\}^2} \quad (43)$$

Onde P_{out} é a potência de saída, α é a constante de tempo adimensional, κ é o acoplamento do sistema e Ω é a frequência adimensional. O equacionamento de cada uma dessas variáveis está descrito a seguir:

$$\alpha = \omega_n RC_p \quad (44)$$

$$\kappa^2 = \frac{\theta^2}{KC_p} \quad (45)$$

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (46)$$

em que ω é a frequência de excitação e ω_n é a frequência natural do sistema. Além disso, a fração de amortecimento mecânico (ζ_m) está relacionada à constante de amortecimento (C), segundo a equação (47):

$$\zeta_m = \frac{C}{2M\omega_n} \quad (47)$$

A resposta mecânica é calculada usando o deslocamento mecânico generalizado r que deve ser multiplicado pelo modo normalizado para gerar deslocamentos relativos w , ou seja, $w = \psi_r(x) r$. A magnitude da tensão elétrica (v) e da potência (P_{out}) também são avaliadas conforme indicado nas equações (42) e (43).

É importante ressaltar que os resultados apresentados nas seções 5.3 a 5.7 e 5.9.1 são obtidos através das equações (41) a (43).

4.1.1. Análise modal da viga

Para a modelagem do dispositivo, será efetuada uma análise modal da viga, uma vez θ é obtido em função da equação de modo de vibração, conforme se observa na equação (48). Esta equação é obtida através do cálculo da integral da equação (38), avaliando-se os limites de integração. A equação (49) é obtida pelo mesmo procedimento realizado na equação (39).

$$\theta = e_{31} \left(\frac{t_p + t_s}{2} \right) b\psi'(L) \quad (48)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \frac{bL}{t_p} \varepsilon_{33}^s \quad (49)$$

Vale ressaltar que, apesar de a viga ser modelada com parâmetros distribuídos para fins de análise modal (ver seção 3.2), o modelo é reduzido a um sistema massa-mola-amortecedor-piezo de um grau de liberdade conforme equações (34) e (35), sendo

considerada, portanto, somente a influência do primeiro modo de vibração no comportamento do dispositivo.

A viga possui seção transversal composta por duas camadas com propriedades piezelétricas e uma camada estrutural, conforme a Figura 18.

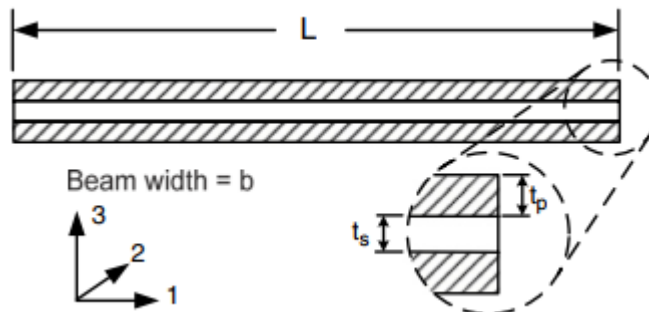


Figura 18. Representação da viga em corte longitudinal. (LIAO et al, 2008).

em que t_s é a espessura da camada estrutural, t_p é a espessura da camada de piezelétrico, b é a largura e L é o comprimento.

Com isso, é possível determinar a rigidez à flexão da seção transversal da viga como:

$$EI = 2E_p b \left[\frac{t_p^3}{12} + t_p \left(\frac{t_p + t_s}{2} \right)^2 \right] + E_s \frac{bt_s^3}{12} \quad (50)$$

em que E_p é o módulo de elasticidade do material piezelétrico e E_s é o módulo de elasticidade do material da camada estrutural.

Com base na teoria apresentada na seção 3.2, avalia-se o autovalor λ correspondente à frequência natural do 1º modo de vibração, conforme a equação 22. A tabela 2 (Inman, 2014) correlaciona os valores do produto λL , com a respectiva função de modo de vibração e o coeficiente σ , cuja expressão varia de acordo com as condições de contorno aplicadas à equação 20.

Tabela 3. Três primeiros modos de vibração de uma viga em balanço (INMAN, 2014).

λL	Função modo de vibração	σ
1,875	$\cosh \lambda x - \cos \lambda x - \sigma (\sinh \lambda x - \sin \lambda x)$	$\frac{\sinh \lambda L - \sin \lambda L}{\cosh \lambda L + \cos \lambda L}$
4,694		
7,854		

Uma vez que somente o primeiro modo de vibração foi levado em conta, o valor de λL utilizado neste trabalho será 1,875.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho considera parâmetros do material e de geometria similares a Kim et al (2010) e Du Toit (2005) conforme mostrado na Tabela 4. A partir destes dados, o modelo foi implementado e são apresentados a seguir diagramas que permitem avaliar a resposta do dispositivo para diferentes valores espessura das camadas de piezolétrico, assim como largura e comprimento. É avaliada também a influência dessas variáveis sobre θ (termo de acoplamento eletromecânico) e sobre a capacitância das camadas de piezolétrico.

Além disso, foi desenvolvida uma planilha de cálculo, através da linguagem *Visual Basic for Applications* (VBA), que permite avaliar o comportamento do dispositivo para diferentes geometrias e materiais, além da possibilidade de otimizar os parâmetros com base em valores de resistência de frequência de excitação. Detalhes sobre o desenvolvimento da planilha de cálculo são explicitados na seção 5.7

Tabela 4. Propriedades geométricas e de material do dispositivo utilizadas por Kim (2010).

Geometria e propriedades dos materiais, KIM et al, 2010		
Dimensões do dispositivo		
Variável	Valor	Unidade
Comprimento	53	mm
Largura	31,7	mm
Espessura da camada de piezolétrico	0,275	mm
Espessura da camada estrutural	0,126	mm
Propriedades dos materiais		
Massa específica da camada piezolétrica, ρ_p	7500	kg/m ³
Massa específica da camada estrutural, ρ_s	7630	kg/m ³
Módulo de Elasticidade do Piezolétrico, E_p	61	GPa
Módulo de Elasticidade do Piezolétrico, E_s	100	GPa
Permissividade absoluta para deformação nula, ϵ_{33}^S	1551	ϵ_0
Coefficiente de deformação piezolétrico, d_{31}	-190	m/V

Os parâmetros são variados de acordo com o *range* de dimensões fornecido no catálogo do dispositivo utilizado nos experimentos de Du Toit (2005) e Kim *et al* (2010), conforme as figuras Figura 19 e Figura 20.

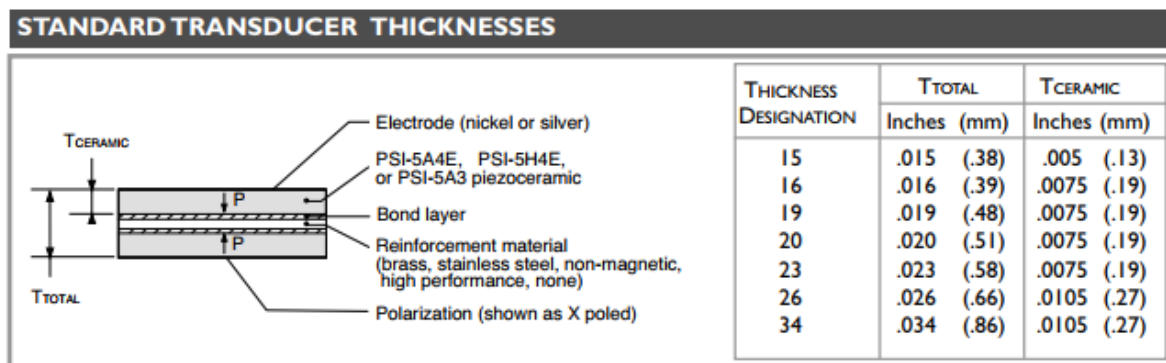


Figura 19. Espessuras fornecidas pela *Piezo Systems, Inc*, disponível em https://scilab.co.jp/product/mems/download/piezo_systems_catalog.pdf, acessado em 30/11/2020.

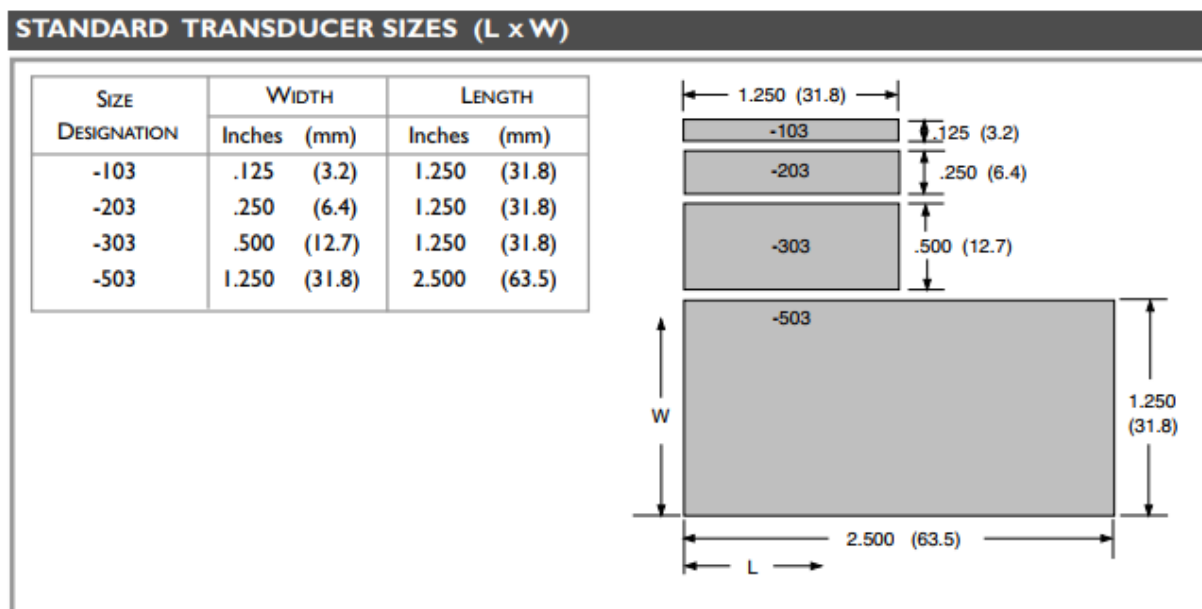


Figura 20. Comprimentos e larguras fornecidos pela *Piezo Systems, Inc*, disponível em https://scilab.co.jp/product/mems/download/piezo_systems_catalog.pdf, acessado em 30/11/2020.

Os resultados apresentados nas seções 5.3 a 5.6 foram obtidos com o uso do *software* Mathcad, considerando-se uma resistência externa de 10 k Ω (aproximadamente a resistência ótima do sistema para a configuração descrita na Tabela 4) e uma fração de amortecimento ζ_m , de 0,0182 conforme Kim *et al.*, 2010. Este último parâmetro foi mantido constante ao longo de todas as curvas. As razões e as implicações dessa escolha são discutidas em mais detalhes na seção 5.9.1.

5.1. Validação do modelo

Nesta seção o modelo analítico desenvolvido é comparado com os resultados apresentados por Du Toit (2005), conforme mostrado na Figura 21.

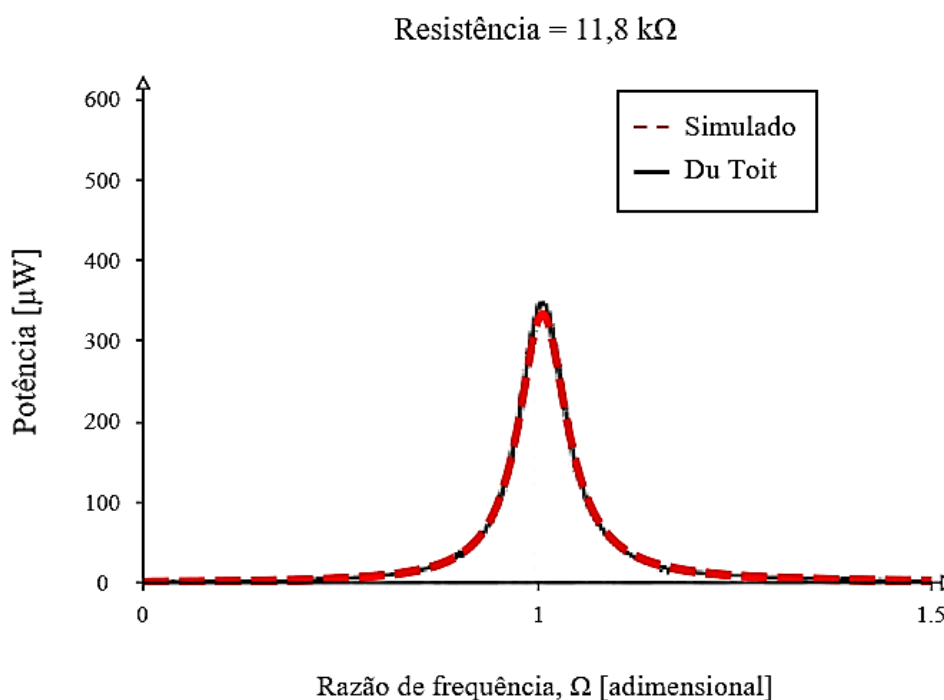


Figura 21. Validação do modelo desenvolvido

É possível visualizar que o resultado obtido através do modelo implementado na ferramenta de cálculo encontra-se em concordância com o modelo apresentado por Du Toit em seu trabalho.

5.2. Ferramenta de cálculo para simulação de resposta do dispositivo

O objetivo dessa seção é apresentar a planilha de cálculo (aplicação) com interface gráfica de usuário desenvolvida, assim como suas ferramentas, aplicações dentro do contexto piezelétrico e análise de resultados gerados ao final da simulação. A ideia central da aplicação é fornecer respostas do sistema com base em parâmetros geométricos, propriedades de materiais e demais parâmetros definidos pelo usuário. A fundamentação teórica utilizada para desenvolvimento de cálculos e resultados é baseada nos trabalhos de Kim (2010) e Du Toit (2005).

5.2.1. Interfaces e ferramentas

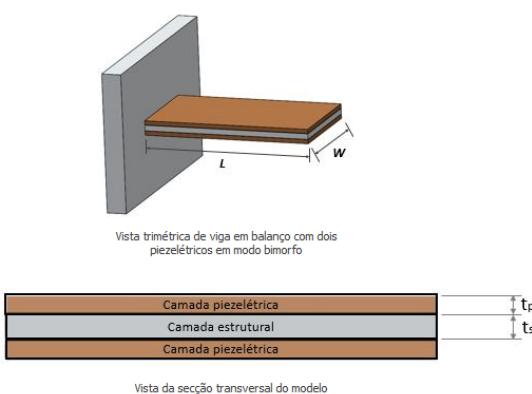
Na tela inicial, o usuário poderá escolher se deseja executar a modelagem analítica, consultar formulário de equações principais que regem o modelo, acessar um manual de usuário para informações mais detalhadas de utilização ou encerrar a seção. Ao selecionar a seção de execução de modelagem analítica, a tela de simulação irá aparecer, como ilustrado na Figura 22.

DIMENSIONAMENTO PIEZELÉTRICO

Desenvolvido por Lucas Geoffroy e Mateus Queiroz

Menu
Ajuda

MODELO



Vista trimétrica de viga em balanço com dois piezelétricos em modo bimorfo

Vista da seção transversal do modelo

DIMENSÕES

Comprimento da viga [L, em mm]

Largura da viga [W, em mm]

Espessura da viga [ts, em mm]

Espessura unitária do piezelétrico [tp, em mm]

GRANDEZAS FÍSICAS

Magnitude da aceleração de base [em m/s²]

Intervalo de Frequências [em Hz] a

Resistência [em kΩ]

CALCULAR
VOLTAR

MATERIAIS

Material da estrutura (viga) Default
Alumínio (3003) Adicionar Material

Tipo do piezelétrico Default
PZT - SA Adicionar Material

Figura 22. Tela inicial da aplicação.

Os primeiros parâmetros a serem selecionados são os materiais, tanto para o elemento estrutural quanto para os piezelétricos acoplados a ele. Caso os materiais do sistema não estejam listados nas caixas de seleção, o usuário terá a possibilidade de adicionar materiais a lista e cadastrar as respectivas propriedades, conforme na Figura 23.

a)

Nome do material (viga)

Módulo de Elasticidade **GPa**

Massa Específica **kg/m³**

Cadastrar
Voltar

b)

Nome de piezelétrico

Módulo de Elasticidade (E) **GPa**

Massa Específica (ρ) **kg/m³**

Constante piezelétrica (d31) **V*m/N [10⁻¹²]**

Permissividade Relativa no vácuo

Cadastrar
Voltar

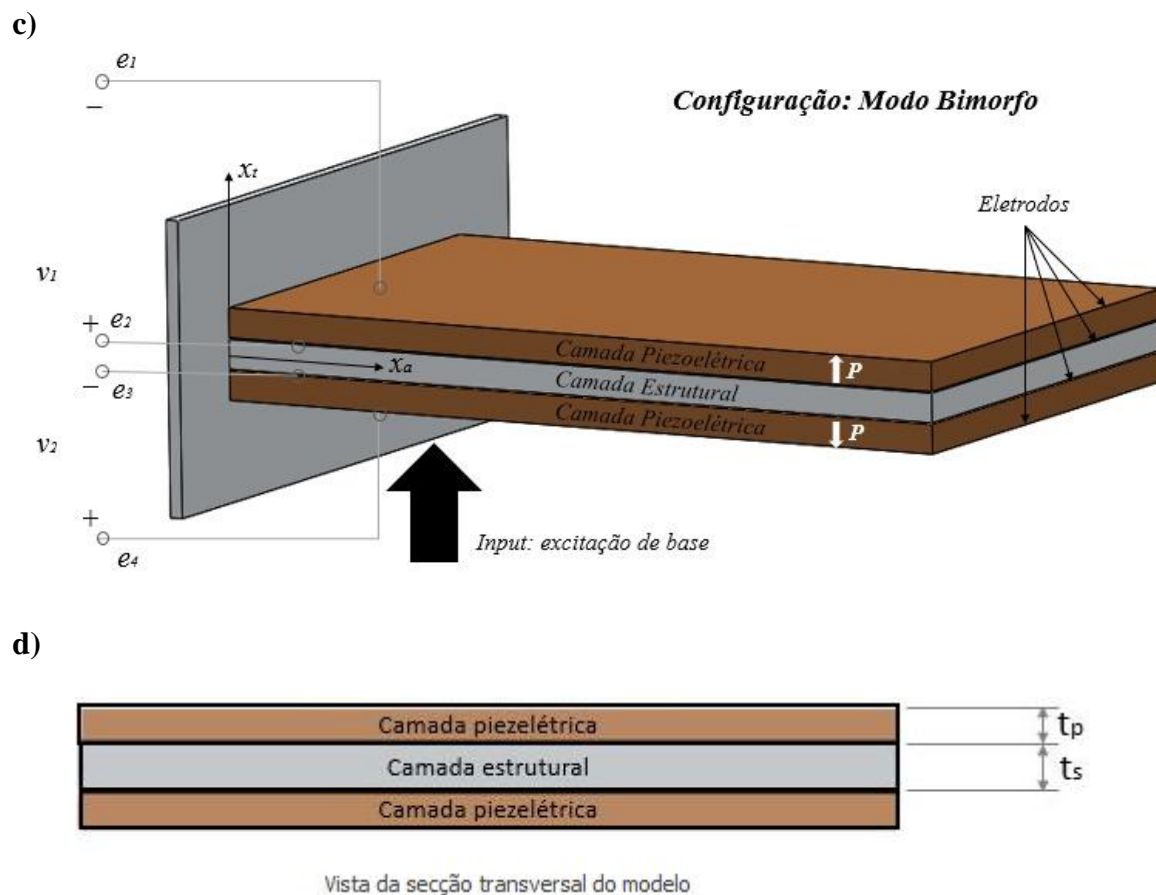
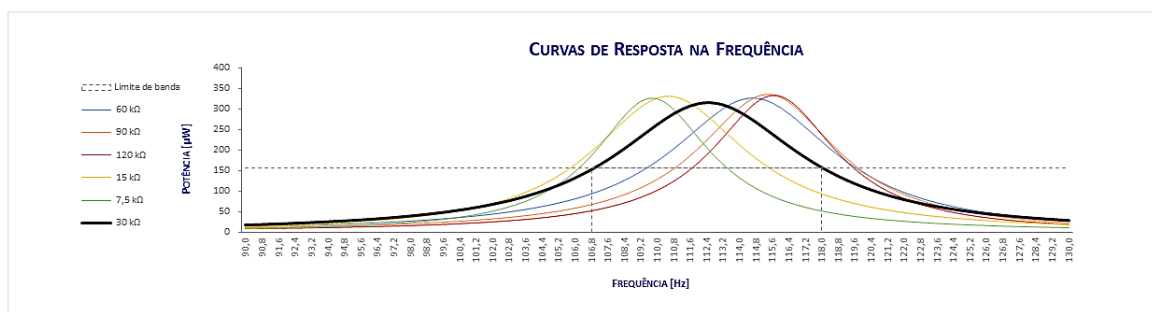


Figura 23. a) Tela de entrada dos parâmetros dos materiais; b) janela para adição de novo material piezoelétrico na lista de seleção; c) perspectiva trimétrica da viga em balanço com duas camadas piezoelétricas acopladas em modo 31 bimorfo; d) vista da secção transversal do modelo.

Em seguida, o usuário deverá inserir as dimensões do sistema, usando os parâmetros mostrados na Figura 23. Por fim, os parâmetros finais de aceleração de excitação, intervalo de frequências e resistência do modelo devem ser inseridos.

As respostas da simulação aparecerão em forma de painel de resultados, onde serão apresentados: parâmetros de saída do sistema segundo configuração inserida pelo usuário; parâmetros de saída otimizados com base no intervalo de frequências informada pelo usuário na página anterior; e um gráfico com curvas de resposta na frequência para diferentes resistências, como apresentado na Figura 24.



Configuração do Usuário

Resistência: 30 kΩ
Capacitância: 41,95 nF
Voltagem RMS: 16,21 V
Potência média: 157,19 µW
Potência máxima: 314,39 µW
Frequência de pico: 112,4 Hz
Limites de banda: 106,8 - 118 Hz
Largura de banda: 11,2 Hz
Deslocamento: 0,30 mm

Otimização com base na faixa de frequências informada pelo usuário

Resistência: 90 kΩ
Capacitância: 41,95 nF
Voltagem RMS: 16,86 V
Potência média: 167,50 µW
Potência máxima: 335,01 µW
Frequência de pico: 115,2 Hz
Limites de banda: 110,8 - 119,6 Hz
Largura de banda: 8,80 Hz
Deslocamento: 0,22 mm

Gráfico de Eficiência

Otimizações

Gerar Relatório

Voltar

Figura 24. Painel de resultados para simulação de resposta piezolétrica.

O *layout* do painel de resultados apresenta uma comparação entre respostas do sistema para os parâmetros inseridos pelo usuário (coluna de variáveis à esquerda) e respostas de otimização de potência média (coluna de variáveis à direita), com base no intervalo de frequências de entrada informadas na seção anterior. Com o auxílio do gráfico de curvas de resposta na frequência, também é possível analisar visualmente o comportamento do sistema para diferentes valores de resistência.

Outros recursos também podem ser usufruídos pelo usuário para fins de análises mais específicas, utilizando os botões localizados no canto direito do painel de resultados, abaixo descritos:

- **Gráfico de Eficiência** - compara as potências de entrada e de saída do sistema, apresentando a eficiência no domínio da resistência;
- **Otimizações** - calcula respostas para os mesmos parâmetros, quando analisados nas condições de ressonância e antirressonâncias do sistema; e
- **Gerar Relatório** - exporta os resultados obtidos para um arquivo de texto com a extensão “.txt”, localizado na mesma pasta da aplicação.
-

A aplicação tem como principal objetivo apresentar as respostas do sistema de forma intuitiva e visual, mas sua utilização também possibilita que o usuário desenvolva análises e estudos em diferentes cenários simulados.

5.3. Influência da espessura das camadas de piezolétrico sobre a resposta do sistema

Nesta seção é discutida a influência da espessura das camadas de material piezolétrico sobre a resposta do sistema (módulo do termo de acoplamento eletromecânico, capacitância, deslocamentos relativos à base, tensão elétrica e potência de saída). É importante salientar que os resultados apresentados neste trabalho possuem restrições com respeito às dimensões do dispositivo, uma vez que o modelo pressupõe relações constitutivas lineares. Dimensões excessivamente grandes ou pequenas podem ocasionar não-linearidades (grandes deformações, saturação nas propriedades piezolétricas, etc.) que não são contempladas pelo modelo implementado.

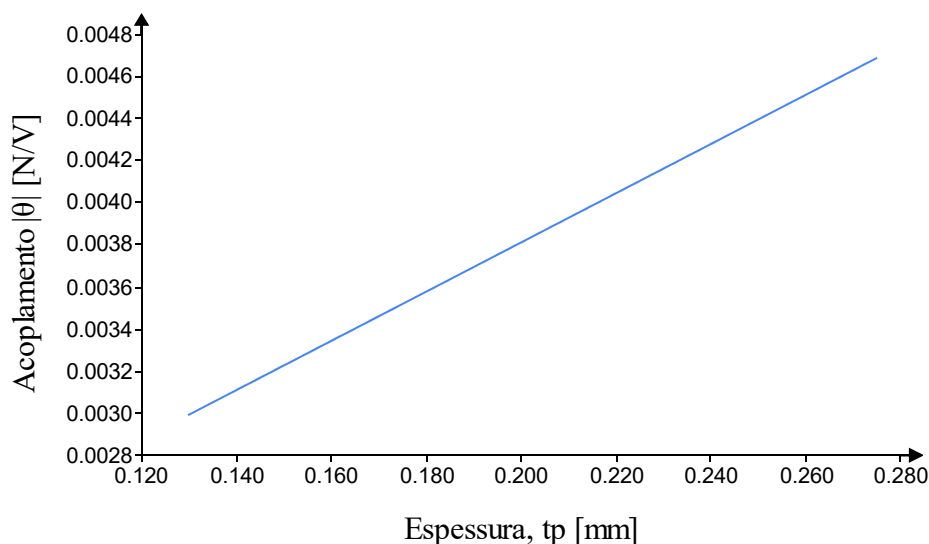


Figura 25. Influência da espessura da camada de piezolétrico no módulo do termo de acoplamento eletromecânico.

O diagrama na Figura 25 representa a relação entre termo de acoplamento eletromecânico e a espessura das camadas de piezolétrico. Nele, é possível observar uma relação linear entre o módulo do termo de acoplamento eletromecânico e a espessura da camada de piezolétrico, em que ambos são diretamente proporcionais. Isso já é esperado em vista da equação (48).

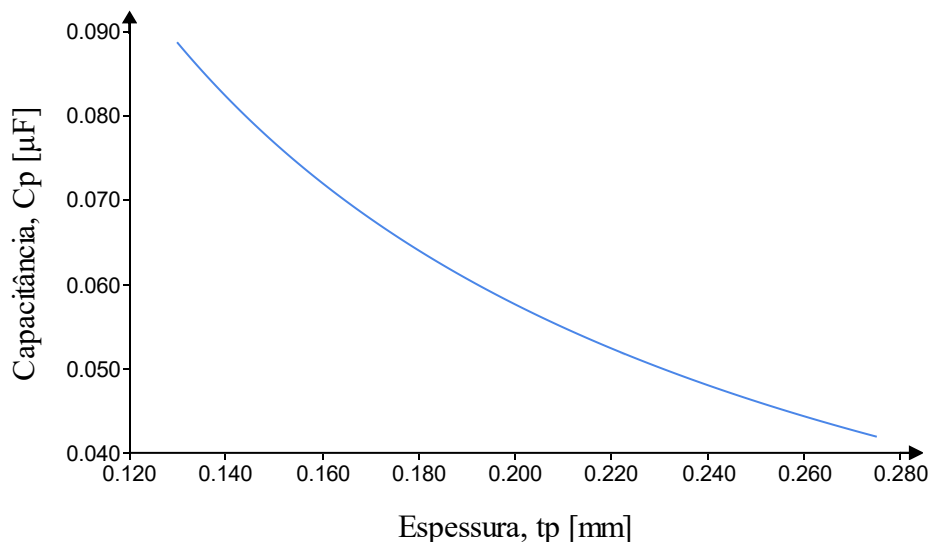


Figura 26. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre a capacitância.

O diagrama na Figura 26 representa a relação entre a capacitância do dispositivo e espessura da camada de piezelétrico. Observa-se que a capacitância do dispositivo é inversamente proporcional à espessura da camada de piezelétrico, conforme equação (49). Isso pode ser explicado pelo fato de que a capacitância aumenta conforme aumenta o potencial elétrico do meio. Como esse potencial decresce à medida que aumenta a distância entre os pares de eletrodos (e_1, e_2) e (e_3, e_4) da Figura 16, é razoável esperar que a capacitância diminua com o aumento da espessura dessa camada piezelétrica. Uma vez que capacitância é a grandeza que mede a quantidade de carga elétrica que o dispositivo consegue armazenar em uma dada diferença de potencial, pode-se inferir que o aumento da espessura da camada de piezelétrico não necessariamente acarretará aumento da potência de saída do dispositivo.

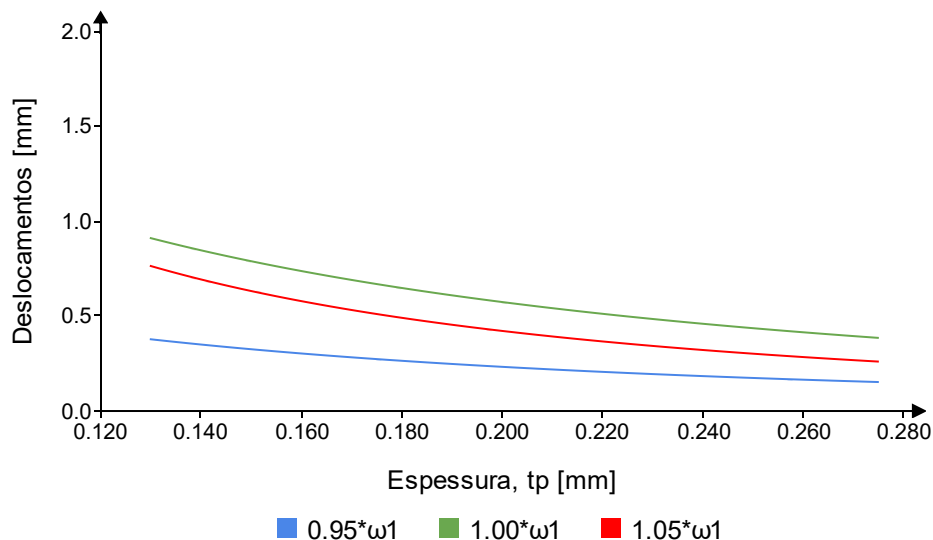


Figura 27. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre os deslocamentos relativos à base.

Deste ponto em diante, para avaliar deslocamentos, tensão elétrica e potência são plotadas três curvas, considerando três diferentes frequências de excitação:

- Curva verde, frequência de excitação igual à frequência de ressonância;
- Curva vermelha, frequência de excitação 5% maior que a frequência de ressonância;
- Curva azul, frequência de excitação 5% menor que a frequência ressonância.

Os deslocamentos descritos na Figura 27, Figura 32 e Figura 37 são da massa em relação à base (ver Figura 17). Aqui são mostrados esses deslocamentos para dispositivos cuja espessura varia na faixa de 0,130 mm a 0,275 mm.

Nota-se no diagrama da Figura 27 um decréscimo dos deslocamentos conforme é aumentada a espessura da camada de piezelétricos. Isso pode ser explicado pelo aumento na inércia do dispositivo.

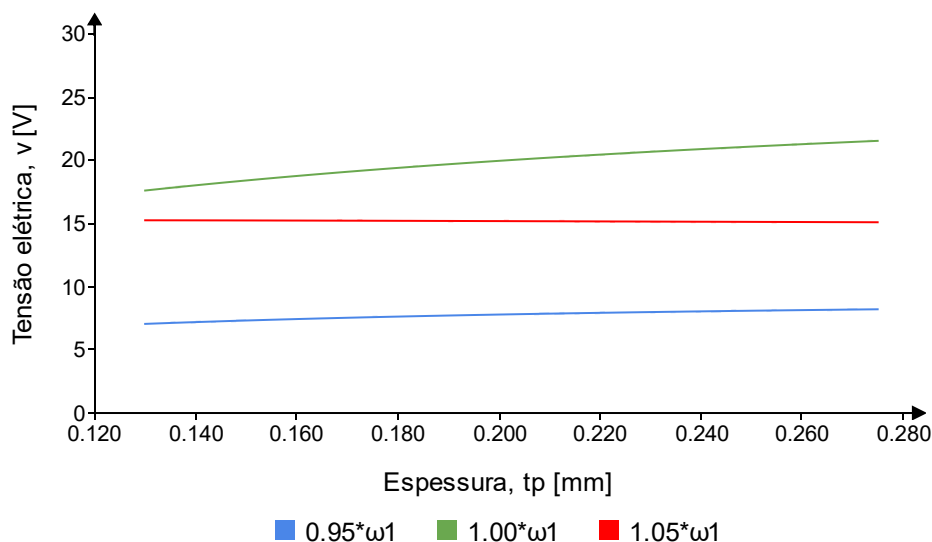


Figura 28. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre a tensão elétrica.

A Figura 28 mostra que a tensão elétrica induzida pelo dispositivo é pouco influenciada pelo aumento da espessura da camada ativa no dimensionamento do dispositivo. Isso evidencia que, apesar dos deslocamentos serem menores (conforme constatado na Figura 27), o aumento do módulo do termo de acoplamento compensa esse decréscimo em termos de tensão de saída. Nota-se que, dentre as variáveis analisadas na Figura 28, a que mais afeta a resposta do dispositivo é a frequência de excitação: uma variação de 5% para menos na maior espessura avaliada (curva verde) provoca um decréscimo de aproximadamente 60% na tensão elétrica gerada (curva azul). Outro fato a ser notado é que para maiores espessuras o dispositivo torna-se mais sensível à variação da frequência de excitação, o que é percebido comparando as distâncias entre as curvas para espessuras da ordem de 0,130 mm com a mesma distância para espessuras da ordem de 0,275 mm.

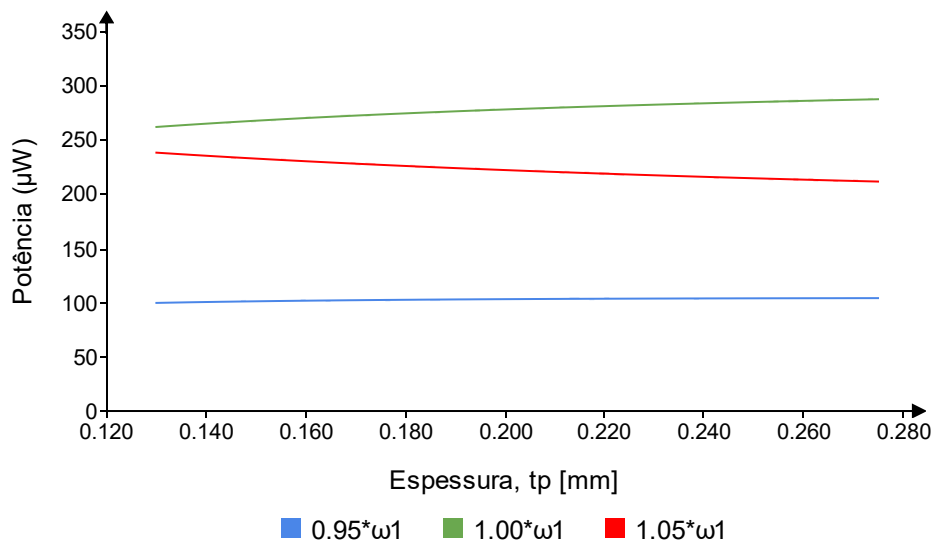


Figura 29. Influência da espessura da camada de piezelétrico sobre a potência de saída

A potência de saída é diretamente proporcional ao quadrado da tensão de saída, portanto são esperadas as mesmas tendências da Figura 28, conforme a Figura 29.

5.4. Influência da largura da viga sobre a resposta do sistema

Nesta seção é discutida a influência da largura das camadas de material piezelétrico sobre a resposta do sistema (módulo do termo de acoplamento eletromecânico, capacitância, deslocamentos relativos à base, tensão elétrica e potência de saída).

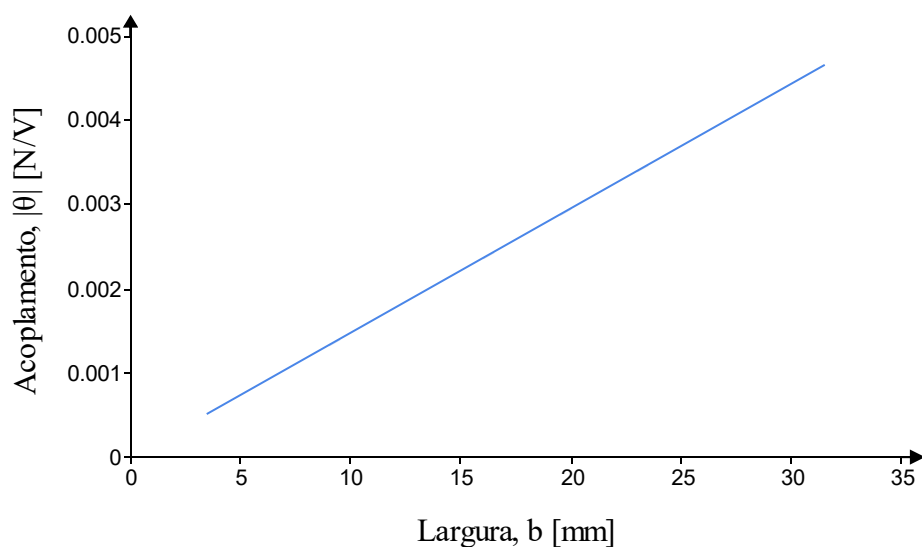


Figura 30. Influência da largura da viga sobre o módulo do termo de acoplamento eletromecânico

Nota-se que à semelhança do que ocorre com a variação da espessura, a variação da largura da viga faz com que o módulo do termo de acoplamento eletromecânico varie linearmente, sendo ambos diretamente proporcionais, conforme equação (48).

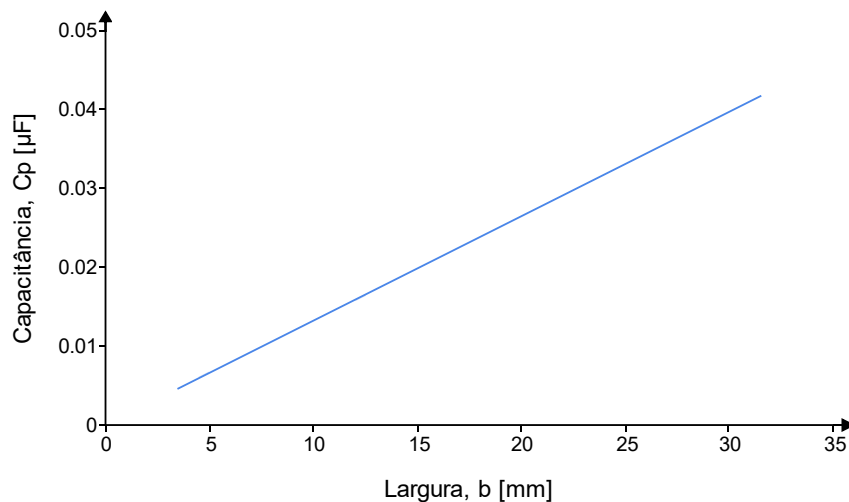


Figura 31. Influência da largura da viga sobre a Capacitância

A observação aqui é análoga à do item 5.3, visto que no modelo estudado a capacitância é função de uma integral no volume da viga - equação (39) - em que o termo da largura não aparece no integrando, mas aparece em um dos limites de integração, visto que se trata de uma integral no volume utilizando coordenadas cartesianas. Logo, ao se avaliar a integral, a expressão resultante para capacitância - equação (49) - é linearmente proporcional à largura.

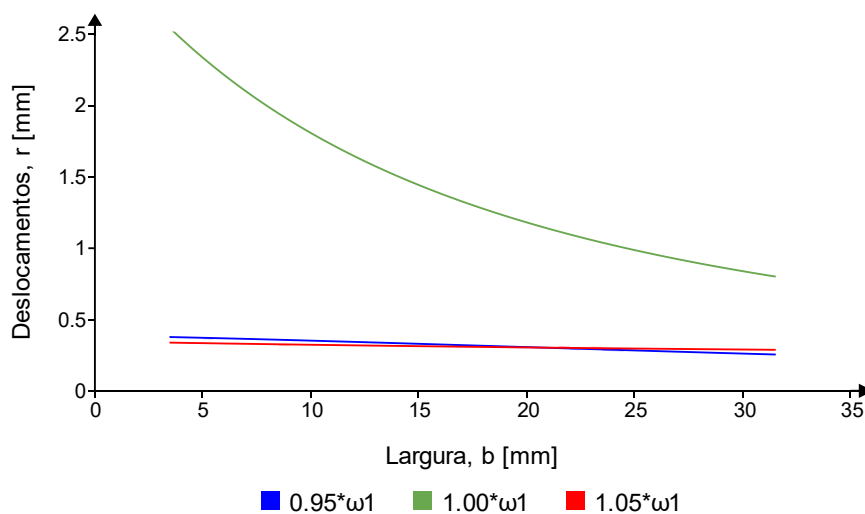


Figura 32. Influência da largura da viga sobre os deslocamentos

Nota-se através da Figura 32 quão sensível o dispositivo é à variação da razão entre frequência de excitação e frequência natural. Os resultados sugerem que essa sensibilidade (interpretada no diagrama como a distância vertical entre a curva verde e as demais) é mais acentuada para larguras menores. Além disso, observa-se que para frequências ligeiramente afastadas da ressonância (curvas azul e vermelha), o valor da largura não impacta significativamente o valor dos deslocamentos.

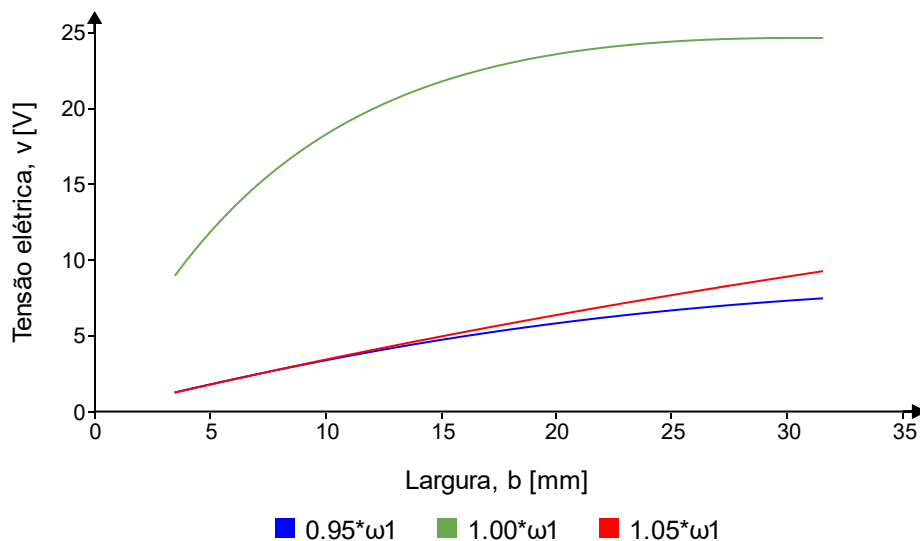


Figura 33. Influência da largura da viga sobre a tensão elétrica

O diagrama da Figura 33 ressalta a sensibilidade do dispositivo à variação da frequência de excitação, e ilustra o efeito da largura em alguns parâmetros importantes para o cálculo da tensão elétrica; nota-se através da Figura 30 e da Figura 31 que tanto o coeficiente de acoplamento eletromecânico quanto a capacitância (termos que à priori contribuem para o aumento da tensão de saída) são direta e linearmente proporcionais à largura, o que justifica a tendência de crescimento das curvas à medida em que se aumenta o valor da largura da viga. Entretanto, esse crescimento é progressivamente atenuado, o que é coerente com o diagrama da Figura 31, no qual o aumento da largura também faz com que se diminua o deslocamento relativo, que por sua vez está diretamente atrelado ao deslocamento de cargas elétricas pelos cristais piezelétricos.

O modelo sugere, portanto, que a nível de dimensionamento, existe um limite a partir do qual o aumento da largura não deverá produzir maiores voltagens. Obviamente, o valor da largura deve ser avaliado primeiramente em função de se aproximar a relação frequência

de excitação / frequência natural da unidade, pois esta é a variável que afeta de maneira mais significativa a resposta do dispositivo.

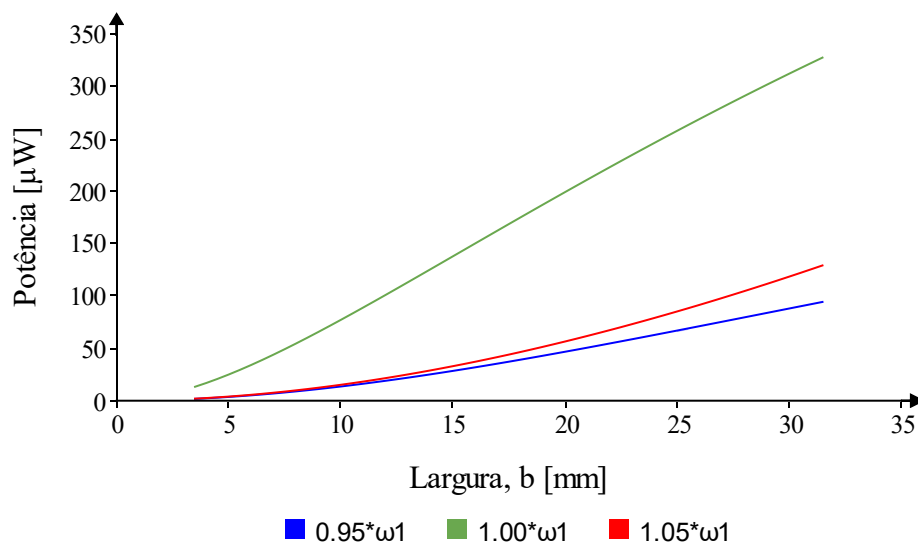


Figura 34. Influência da largura da viga sobre a tensão elétrica

A potência também apresenta um crescimento com tendência à atenuação com o aumento da largura. Essa tendência pode ser observada ao se avaliar o modelo para larguras maiores que as do *range* exposto no diagrama da Figura 34. Isso pode ser explicado pelo fato de a potência ser função do quadrado da tensão elétrica.

5.5. Influência do comprimento da viga sobre a resposta do sistema

Nesta seção é discutida a influência do comprimento da viga sobre a resposta do sistema (módulo do termo de acoplamento eletromecânico, capacitância, deslocamentos relativos à base, tensão elétrica e potência de saída).

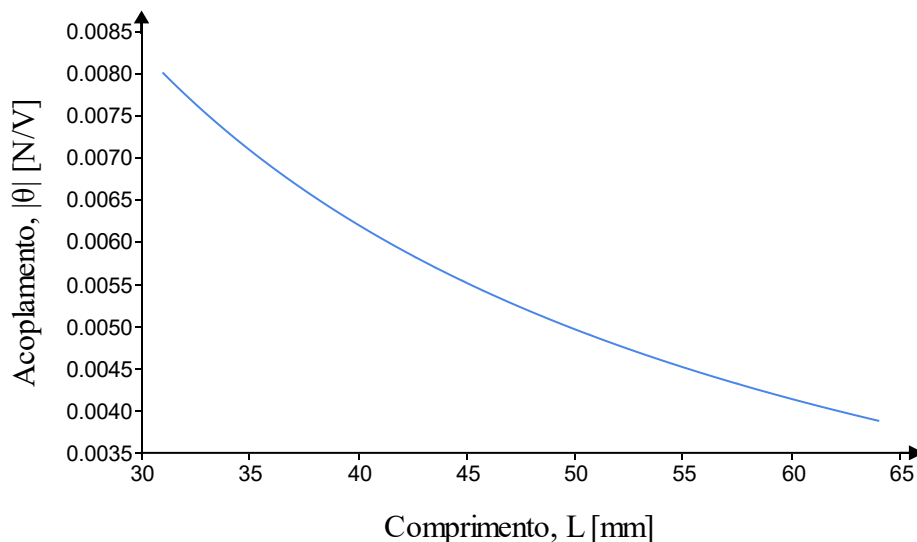


Figura 35. Influência do Comprimento da viga sobre o módulo do termo de acoplamento eletromecânico.

O módulo do coeficiente de acoplamento eletromecânico se relaciona com o comprimento da viga através da derivada primeira da função que descreve o modo de vibração avaliada na ponta da viga ($x_a = L$). Mantidos constantes os demais parâmetros dimensionais, o aumento do comprimento implicará o decréscimo do termo do acoplamento, segundo a tendência demonstrada no diagrama da Figura 35.

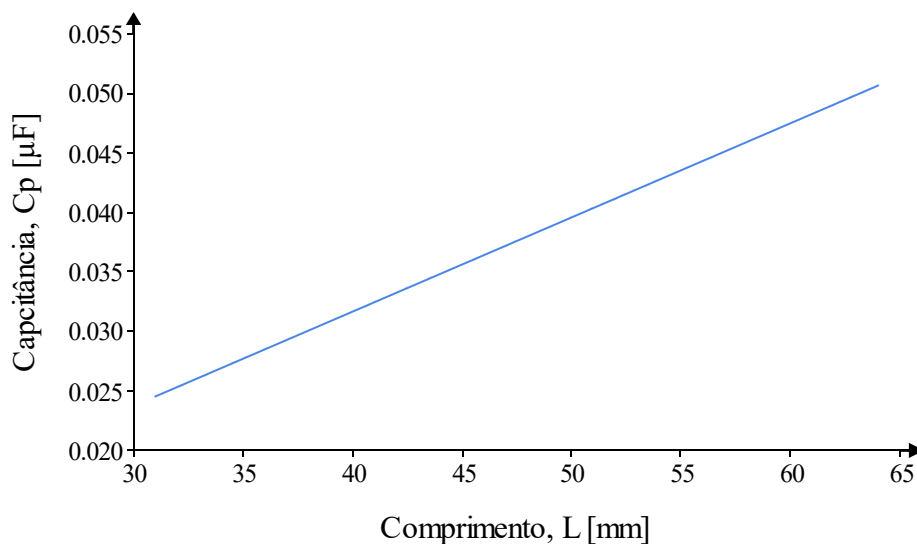


Figura 36. Influência do comprimento da viga sobre a capacitância

Através da equação (49), é possível observar que a capacitância do elemento piezelétrico deve ser linearmente proporcional ao comprimento, o que é confirmado pela análise da Figura 36.

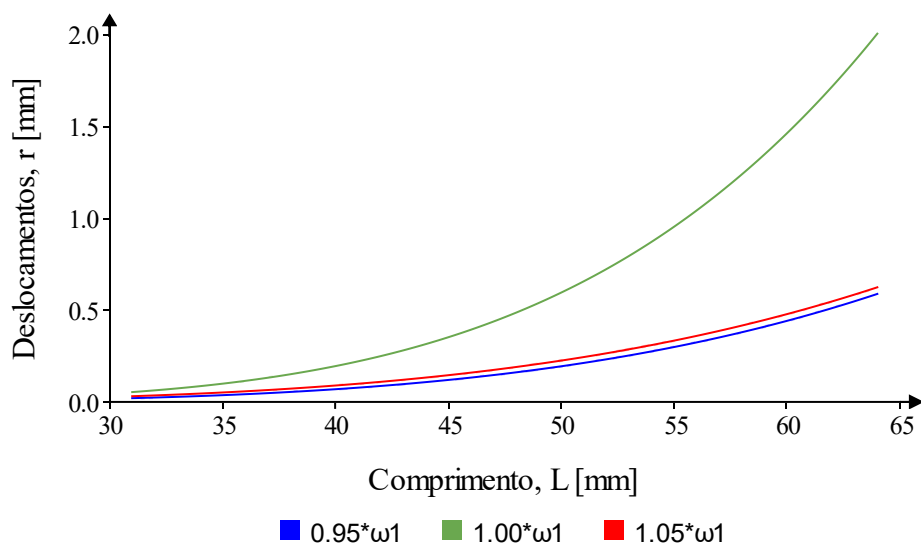


Figura 37. Influência do comprimento da viga sobre os deslocamentos.

Os deslocamentos da viga aumentam de forma diretamente proporcional ao comprimento, o que é intuitivo. Além disso, o diagrama da Figura 37 reforça o mesmo aspecto já discutido nas seções anteriores: a sensibilidade do dispositivo à variação da frequência de excitação. Comprimentos maiores de viga tendem a demonstrar uma diferença mais significativa entre a curva de ressonância (verde) e as demais na resposta do sistema.

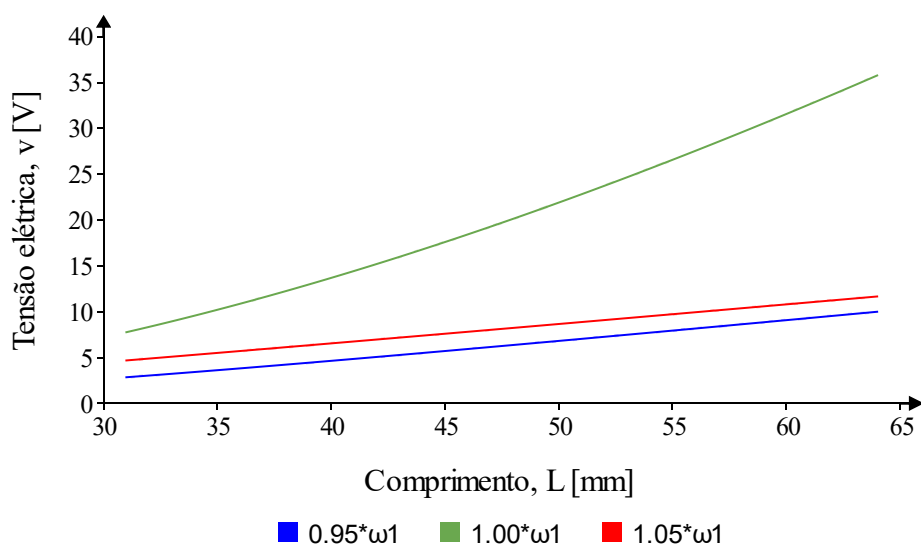


Figura 38. Influência do comprimento da viga sobre a tensão elétrica

Observa-se na Figura 38 a mesma tendência de aumento na tensão elétrica gerada com o aumento do comprimento. Isso é razoável, uma vez que tanto a capacitância, quanto o termo de acoplamento e a magnitude dos deslocamentos são aumentados conforme se assume comprimentos maiores para a viga.

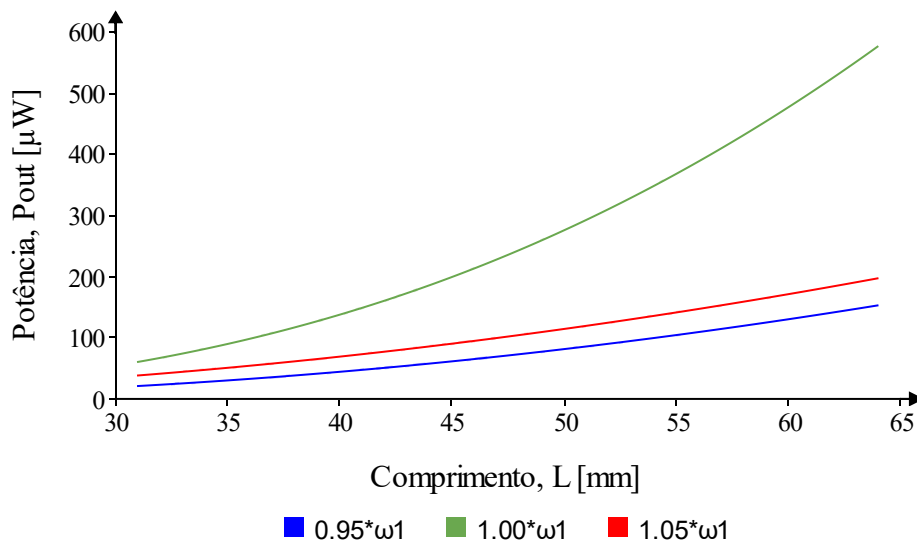


Figura 39. Potência de saída vs Comprimento da viga

É observada na Figura 39 a mesma tendência observada na Figura 38, porém de maneira mais acentuada, isso por razões análogas ao que foi explicado nas seções 5.3 e 5.4.

5.6. Análise da resposta do sistema no domínio da frequência

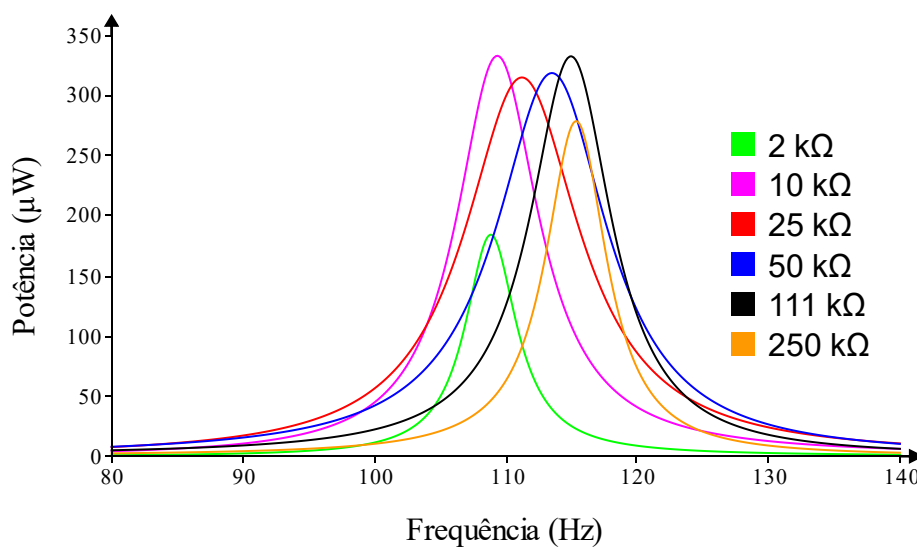


Figura 40. Potência de saída vs Frequência.

A Figura 40 apresenta uma análise para diferentes valores de resistência externa, as curvas de resposta no domínio da frequência para o dispositivo. As curvas em rosa e preto correspondem, respectivamente, às condições ótimas de ressonância e antirressonância. As fórmulas para os valores de resistência ótima de ressonância e antirressonância podem ser encontradas derivando-se a equação (43) em relação à resistência e igualando-a a zero (como em um cálculo de valor ótimo de uma função).

5.6.1. Ressonância e antirressonância

É interessante registrar que esses dois pontos ótimos são consequência da influência que as condições de contorno elétricas exercem sobre propriedades mecânicas em materiais piezelétricos. A condição de curto-circuito ($R \rightarrow 0$) está diretamente associada à ressonância, enquanto a condição de circuito aberto ($R \rightarrow \infty$) está associada à antirressonância. A distância entre esses dois pontos no domínio da frequência é diretamente proporcional ao coeficiente de acoplamento piezelétrico k . Deve-se tomar cuidado aqui para não confundir com o termo de acoplamento eletromecânico θ , que vem das equações de movimento. O coeficiente de acoplamento piezelétrico é definido em Leo (2007) e relaciona as propriedades discutidas na seção 3.1, variando de 0 a 1, definido na equação (51):

$$k = \frac{d}{\sqrt{S\varepsilon}} \quad (51)$$

5.7. Análise da eficiência no domínio da resistência

Nesta seção será apresentado o efeito de diferentes valores de resistência na eficiência do dispositivo. Para isso, a eficiência será calculada conforme as equações (52), (53), (54) e (55):

$$P_{in} = F x |\dot{r}| \quad (52)$$

$$F = B_f \ddot{w}_B \quad (53)$$

$$|\dot{r}| = \omega_n r \quad (54)$$

$$efc = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (55)$$

em que efc denota eficiência, P_{in} é a potência de entrada, F é o forçamento externo e $|r|$ é o módulo da velocidade máxima da massa no regime permanente. O diagrama da figura 37 representa a relação da eficiência do dispositivo em diferentes valores de resistência:

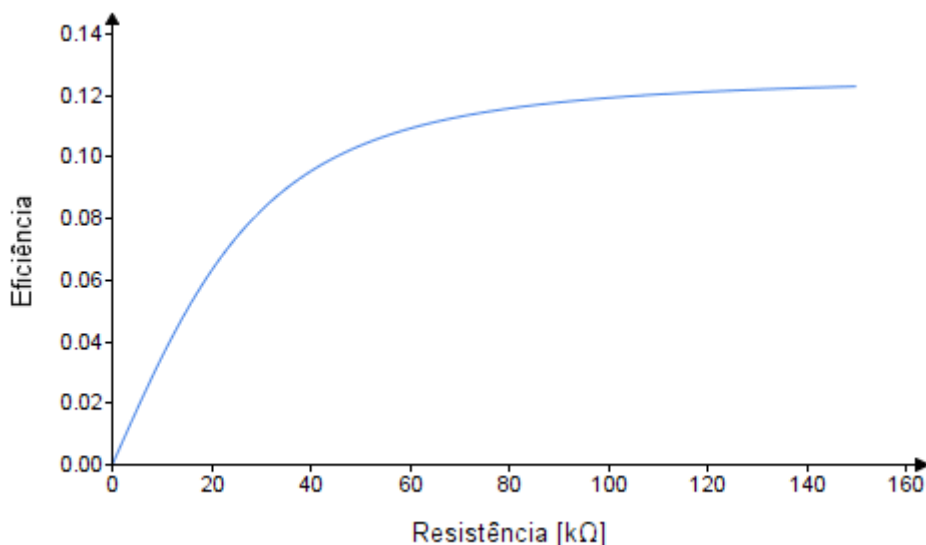


Figura 41. Eficiência vs Resistência

Cabe ressaltar que a curva foi construída considerando o sistema excitado em sua frequência de ressonância. A eficiência máxima do sistema é avaliada em aproximadamente 12%, para valores em que se pode considerar que o sistema está próximo à condição de circuito aberto.

5.7.1. Largura de banda

Essa seção aborda de maneira quantitativa a sensibilidade do dispositivo às variações na frequência de excitação, bem como a largura de banda para uma tensão elétrica *RMS*, com base em capturas de tela da ferramenta de cálculo desenvolvida.

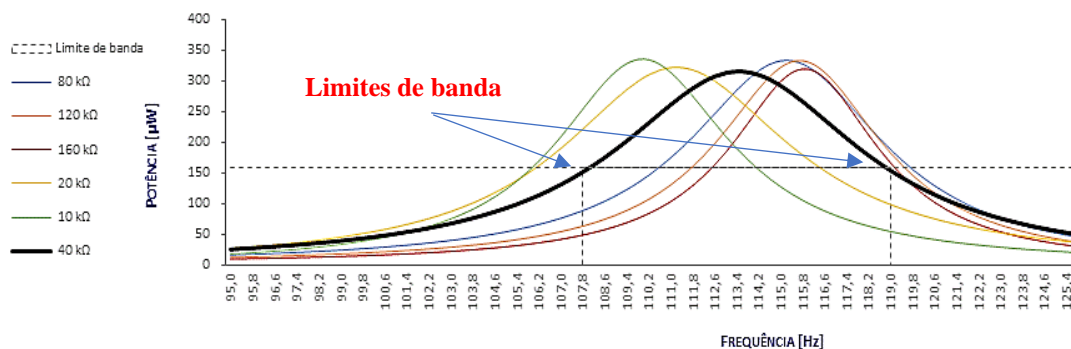


Figura 42. Curva de resposta na frequência para diferentes valores de resistência.

A curva verde na Figura 42 retrata a resposta do sistema para a configuração descrita na Tabela 4. Propriedades geométricas e de material do dispositivo utilizadas por Kim (2010)., enquanto a curva preta, em destaque, representa a mesma configuração, porém com uma resistência externa de 40 k Ω . Observa-se que ao passo em que a resistência é aumentada, há uma pequena mudança na frequência de ressonância do sistema, além de um pequeno aumento na largura de banda, conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Respostas do sistema segundo parâmetros determinados pelo usuário.

Parâmetro de Resposta	Configuração do Usuário	Otimização com base na faixa de frequências informada pelo usuário
Resistência	40 k Ω	10 k Ω
Capacitância	41,95 η F	41,95 η F
Tensão elétrica RMS	16,14 V	17,67 V
Potência média	157,90 μ W	167,35 μ W
Potência máxima	315,80 μ W	334,70 μ W
Frequência de pico	113,4 Hz	109,8 Hz
Limites de banda	107,8 - 119 Hz	105,8 - 114,2 Hz
Largura de banda	11,2 Hz	8,40 Hz
Deslocamento	0,26 mm	0,80 mm

5.8. Influência do termo de acoplamento mecânico e da fração de amortecimento sobre a resposta do sistema.

É possível notar que nos resultados apresentados nas seções 5.3, 5.4 e 5.5 as curvas para frequência de excitação 5% acima ou abaixo da frequência natural não se sobrepõem, ao do que seria esperado em vista da simetria que cada curva apresenta na Figura 40. Isso pode ser explicado pelo efeito que o acoplamento eletromecânico exerce sobre o sistema, aumentando a frequência de ressonância do sistema. Por outro lado, o amortecimento o exerce o efeito contrário, ou seja, quanto maior a fração de amortecimento ζ_m , menor será a frequência de ressonância do sistema amortecido ω_d , conforme a equação (56).

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta_m^2} \quad (56)$$

Na Figura 43, a frequência de ressonância do sistema é maior que a frequência natural ω_n , determinada com base na análise modal da seção 4.1.1 (representada pela linha vertical

que varre os pontos em que $\Omega = 1$). Comparando isso ao resultado para termo de acoplamento eletromecânico igual a zero (Figura 44), infere-se que a frequência de ressonância do sistema será tão maior que a frequência natural do sistema quanto maior for o termo de acoplamento eletromecânico. Essa inferência é consistente com os resultados encontrados por Cabral e Salgado (2018). Isso explica por que a resposta do sistema excitado 5% acima da frequência natural nas seções 5.3, 5.4 e 5.5 é maior que a resposta do sistema excitado 5% abaixo da frequência natural.

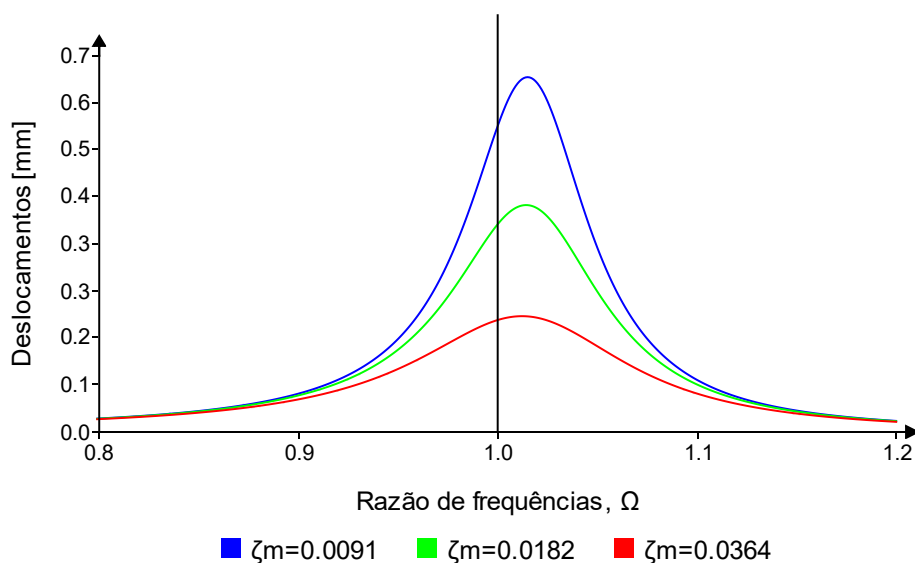


Figura 43. Deslocamentos vs Razão de frequências, para termo de acoplamento calculado a partir das dimensões e propriedades de materiais apresentados na tabela 4.

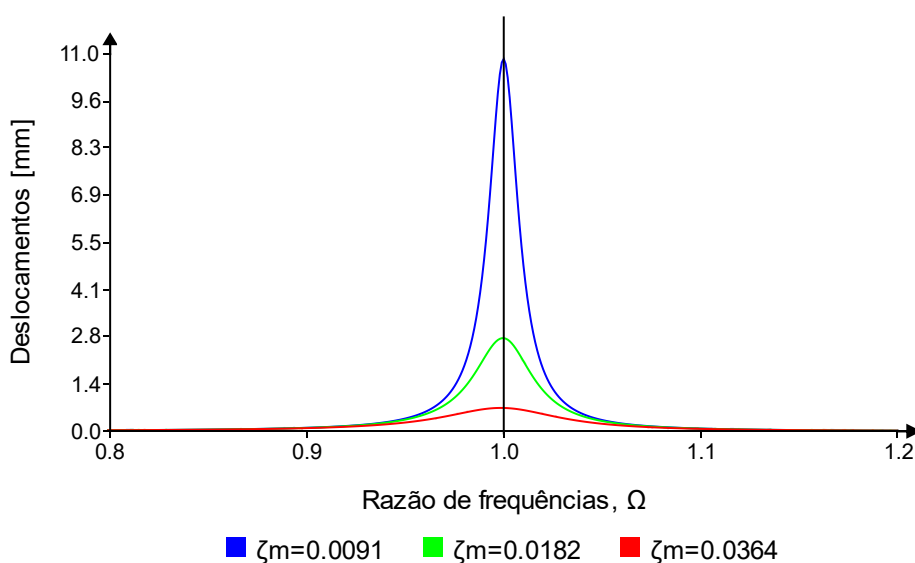


Figura 44. Deslocamentos vs Razão de frequências, para termo de acoplamento eletromecânico igual a zero.

Entretanto, é difícil observar visualmente este efeito mesmo na Figura 44, uma vez que as frações de amortecimento avaliadas são muito pequenas.

5.9. Limitações do modelo

5.9.1. Fração de amortecimento

A fração de amortecimento ζ_m presente nas equações (41) a (43) foi medida através de experimentos por Du Toit (2005), Kim *et al* (2010), encontrando valores extremamente próximos (0,0178 e 0,0182) respectivamente. O último valor foi usado neste trabalho.

Entretanto, por não haver uma expressão analítica que determine o valor dessa fração, foi analisada nos diagramas das figuras Figura 45, Figura 46 e Figura 47 a influência da variação da fração de amortecimento sobre a resposta do sistema.

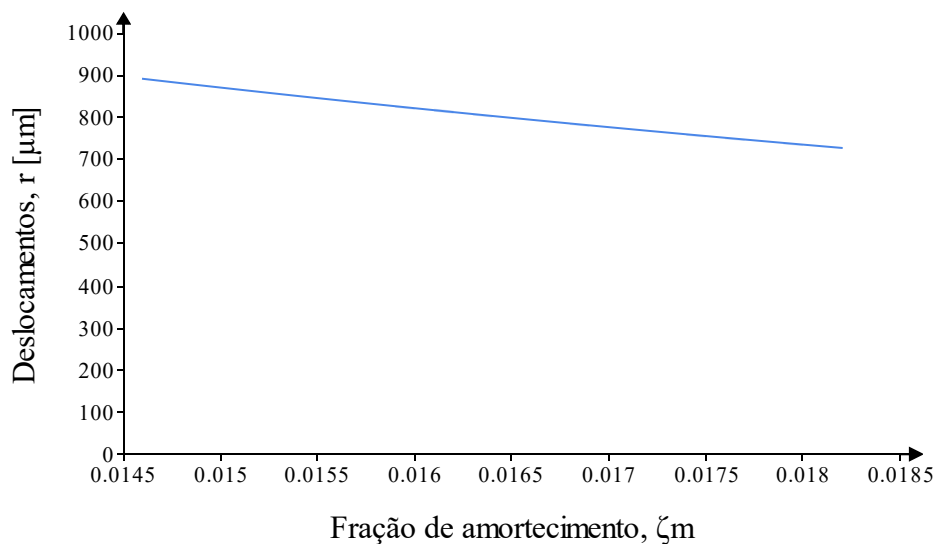


Figura 45. Deslocamentos vs Fração de amortecimento.

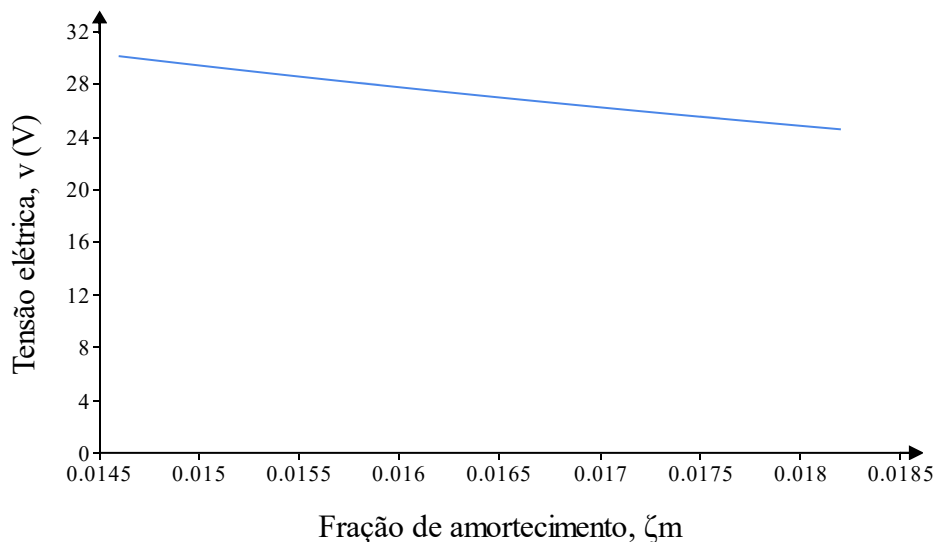


Figura 46. Tensão elétrica vs Fração de amortecimento.

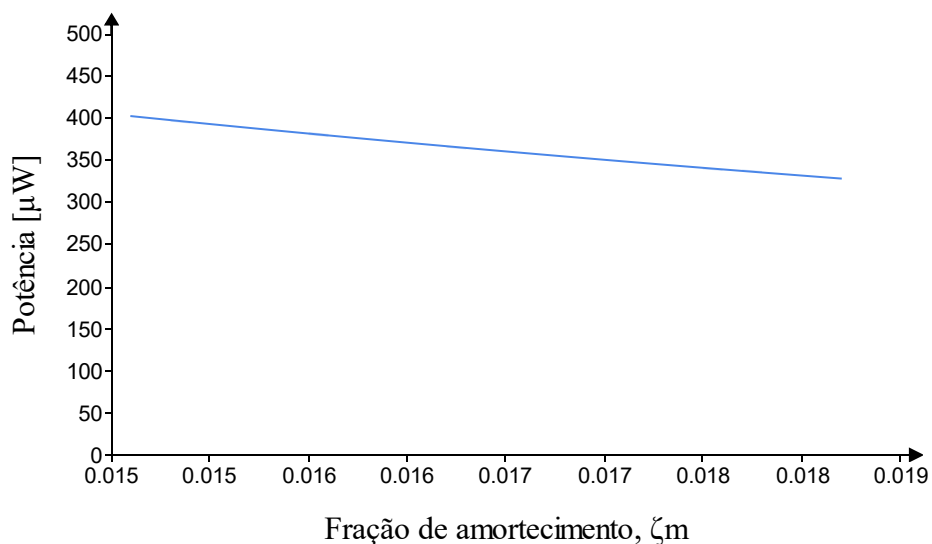


Figura 47. Potência de saída vs Fração de amortecimento.

Observa-se que a relação da fração de amortecimento com a resposta do sistema é aproximadamente linear no *range* avaliado ($0,0146 \leq \zeta_m \leq 0,0182$).

Além disso, deve-se ressaltar a importância de realizar experimentos para determinar com mais precisão os valores específicos de cada projeto e a influência de seus parâmetros dimensionais (comprimento, largura e espessuras) no efeito da dissipação.

5.9.2. Não-linearidade das relações constitutivas nos materiais piezelétricos.

Du Toit (2005), ao validar o modelo explorado neste trabalho, mostra que a formulação utilizada consegue prever com grande precisão a resposta do dispositivo para frequências de excitação afastadas da ressonância. No entanto, nas frequências mais próximas da ressonância, apresenta discrepância com resultados experimentais obtidos pelo autor, conforme a Figura 23:

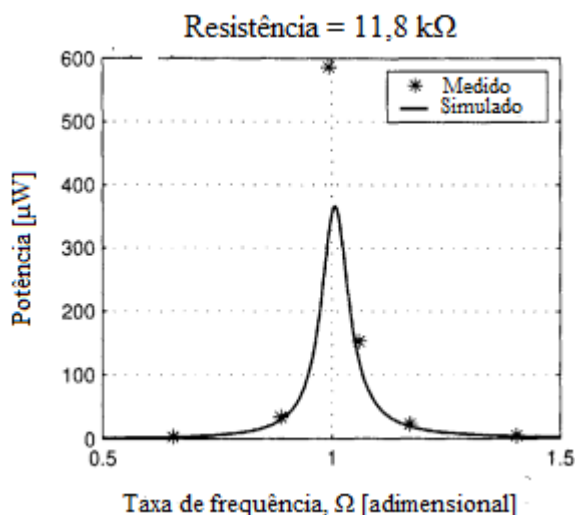


Figura 48. Comparação entre o modelo analítico e o experimento, Du Toit (2005).

É interessante ressaltar que os dispositivos utilizados para os experimentos de Du Toit (2005), Erturk e Inman (2009) e Kim (2010) possuem a mesma especificação (*Piezo Systems Inc.*, T226-A4-503X), cujas informações são expostas na Tabela 4. Du Toit (2005) sugere que esta diferença se dá em virtude de uma não-linearidade nas relações constitutivas que não é considerada neste modelo. Vale lembrar da seção 3.1 que todas as relações constitutivas estão definidas para pequenas deformações, ou seja, são relações lineares. Desse modo, grandes deformações decorrentes da operação em ressonância não previstas pelo modelo podem estar atreladas a essa discrepância.

A resposta do sistema a essa não linearidade é estudada por Triplett (2008), onde ela demonstra que para determinados valores do coeficiente de não-linearidade há, de fato um aumento significativo na resposta do sistema, o que, segundo a autora, está em acordo com o que sugere Du Toit (2005).

Embora haja diferença entre os resultados para operação em condições de ressonância, o modelo de Du Toit (2005) representa de maneira consistente as tendências de resposta do sistema para as faixas de frequência analisadas neste trabalho.

CAPÍTULO 6

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica apontando os progressos alcançados no desenvolvimento de dispositivos de colheita de energia piezelétricos, bem como uma fundamentação teórica expondo os conhecimentos fundamentais necessários para a compreensão do escopo deste projeto.

Em seguida, um modelo para vigas piezelétricas em balanço é apresentado de acordo com trabalhos encontrados na literatura. É tratada a abordagem contínua e de um grau de liberdade para dispositivos de colheita de energia. É importante ressaltar que a discussão da seção 5.6.2 aponta para o fato de que a sensibilidade do dispositivo é ainda maior do que o que foi capturado por este modelo.

Além disso, foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo com interface gráfica para o usuário que, recebendo informações de entrada (como materiais, dimensões principais e condições de trabalho) retorna valores de potência gerada, capacitância, largura de banda, e de resistência ótima. Através da ferramenta apresentada é possível explorar o modelo proposto de forma mais ágil e dessa forma compreender de maneira quantitativa os efeitos das variações dos parâmetros dimensionais na resposta do dispositivo, operando no modo 3-1, bimorfo, com as camadas conectadas em série.

Como sugestão de trabalhos futuros, entende-se ser relevante:

- Explorar modelos mais recentes de dispositivos com *layouts* diferentes, em diferentes modos de operação;
- Realizar experimentos para avaliar a relação entre a variação dos parâmetros dimensionais (comprimento, largura, espessura das camadas de material piezelétrico) e de materiais com o valor do coeficiente de amortecimento presente nas equações de movimento.
- Avaliar com modelos disponíveis os efeitos de não-linearidades nas relações constitutivas do material piezelétrico sobre a resposta do sistema.
- Explorar e comparar outras não-linearidades (como batentes, liga de memória de forma, campos magnéticos) que possam contribuir para o aumento da largura de banda.

CAPÍTULO 7

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEODATO, Arthur. 2017. Análise experimental do uso de ligas com memória de forma e materiais piezelétricos para geração de energia. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: CEFET – Maracanã, 2017.

ADEODATO, A., MONTEIRO, L. L. da S., MONTEIRO JUNIOR, P. C. da C., VIOLA, F. M., OLIVEIRA, S. A., PACHECO, P. M. C. L., & Savi, M. A. (2017). Nonlinear dynamics of a vibration-based energy harvesting system using piezoelectric and shape memory alloy elements. *Revista Interdisciplinar De Pesquisa Em Engenharia*, 2(29), 27-43. <https://doi.org/10.26512/ripe.v2i29.21788>

ANTON, Steven R e SODANO, Henry A. 2007. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures*. Maio de 2007, pp. 16 (2007) R1–R21.

BEEBY, S.P.; TUDOR, M.J. e WHITE, N.M. (2006). Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology*, 17 (12), R175-R195.

BRAGA, Newton C. *Eletrônica Básica: Curso de Eletrônica*. 1. ed. São Paulo: Editora Saber, 2012. p. 163-165.

CABRAL, Pedro Santana; SALGADO Juliana Medeiros. 2018. Modelagem numérica para um sistema de geração de energia através de materiais piezelétricos. Trabalho de conclusão de curso, Rio de Janeiro: CEFET – Maracanã, 2018.

DAGDEVIREN, Canan; YANG, Buyng Duk.; SU, Yewang; TRAN, Phat L.; JOE, Pauline; ANDERSON, Eric; XIA, Jing; DORAISWAMY, Vijay; DEHDASHTI, Behrooz; FENG, Xue; LU, Bingwei; POSTON, Robert; KHALPEY, Zain; GHAFFARI, Roozbeh; HUANG, Yonggang; SLEPIAN, Marvin J.; e ROGERS, John

A. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. 2014. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(5).

C. K. MO; L. J. RADZIEMSKI; e W. W. CLARK. 2010. Experimental validation of energy harvesting performance for pressure-loaded piezoelectric circular diaphragms. 2010. *Smart Materials and Structures* 19(7):075010.

C. PAN, C. YEN, S. WANG, Y. LAI, L. LIN, J. HUANG, AND S. KUO. 2015. Near-field electrospinning enhances the energy harvesting of hollow PVDF piezoelectric fibers (2015). *RSC Advances* 5(103).

DU TOIT, N. E.; WARDLE, B. L. Performance of Microfabricated Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. *Integrated Ferroelectrics*, v.83, 2006.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. “An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations”. *Smart Materials and Structure*, v. 18, n.2, p. 1–18, 2009.

G. ZHU, Z. ZENG, L. ZHANG, AND X. YAN. 2008. Piezoelectricity in β -phase PVDF crystals: A molecular simulation study. *Computational Materials Science* 44(2):224-229.

GRANSTORM, JONATHAN, et al. 2007. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart Materials and Structures* 16(5):1810.

HUICONG LIU, JUNWEN ZHONG, CHENGKUO LEE, SEUNG-WUK LEE, AND LIWEI LIN, 2018. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews* 5, 041306 (2018);

IEEE, ANSI Standard 176-1987: IEEE Standard on Piezoelectricity, September 7, 1987.

INMAN, D.J. “Engineering Vibration” 4th Edition, Pearson, 2014.

J. FANG, X. WANG, T. LIN. 2011. Electrical power generator from randomly oriented electrospun poly(vinylidene fluoride) nanofibre membranes. *Journal of Materials Chemistry Advanced Materials Research* 479-481:340-343.

K. A. COOK-CHENNAULT, N. THAMBI e A. M. SASTRY, 2008. Powering MEMS portable devices— a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems – *Smart Materials and Structures* 17(4).

KIM, M.; HOEGEN, M.; DUGUNDJI, J.; WARDLE, B. L.; Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester, Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA, 2010.

LEO, D.J. *Engineering Analysis of Smart Material Systems*, John Wiley & Sons, 2007.

LIU, H.; ZHONG, J.; LEE, C.; LEE, S.; LIN, L., 2018. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews* 5, 041306 (2018). American Institute of Physics, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

M. A. KARAMI; D. J. INMAN. 2011. Electromechanical Modeling of the Low-Frequency Zigzag Micro-Energy Harvester. 2011. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* Volume: 22 issue: 3, page(s): 271-282.

M. A. KARAMI; D. J. INMAN. 2012. Parametric Study of Zigzag Microstructure for Vibrational Energy Harvesting. 2012. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* *Journal of Microelectromechanical Systems* 21(1):145-160.

MINETO, A.T., 2013. Geração de energia através da vibração estrutural de dispositivos piezelétricos não lineares. USP, São Carlos, SP : Tese de Doutorado, 2013.

N. S. SHENCK e J. A. PARADISO. 2001. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. 2001. IEEE Micro (Volume: 21, Issue: 3, May/Jun 2001)

N. SHARPES, A. ABDELKEFI, e S. PRIYA. 2014. Comparative Analysis of One-Dimensional and Two-Dimensional Cantilever Piezoelectric Energy Harvesters. Energy Harvesting and Systems 1(3-4).

N. SHARPES, A. ABDELKEFI, e S. PRIYA. 2015. Two-dimensional concentrated-stress low-frequency piezoelectric vibration energy harvesters. Applied Physics Letters 107(9).

PRIYA, S. JEBA & SONG, HYUN-CHEOL & ZHOU, YUAN & VARGHESE, RONNIE & CHOPRA, ANUJ & KIM, SANG-GOOK & KANNO, ISAKU & WU, LIAO & SAM HA, DONG & RYU, JUNGHO & G. POLCAWICH, RONALD. 2017. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. Energy Harvesting and Systems. Energy Harvesting and Systems 4(1).

S. GHOSH e D. MANDAL. 2016. High-performance bio-piezoelectric nanogenerator made with fish scale. Applied Physics Letters 11(08):2016.

S. KIM, W. W. CLARK e Q. M. WANG. 2005. Piezoelectric Energy Harvesting with a Clamped Circular Plate: Analysis. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 16(10):847-854

SANTOS, A. A; HOBECK, J; D. e INMAN, D. J. 2018. Orthogonal spiral structures for energy harvesting applications: Theoretical and experimental analysis. Journal of Intelligent Material Systems and Structures Volume: 29 issue: 9, page(s): 1900-1912.

SAUSEN, P. S., 2008. Gerenciamento integrado de Energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande.

SODANO, H. A., INMAN, D.J. 2007. A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials (2003 - 2006). Smart Materials and Structures. 2007, Vol. v.36(3), p.197-205.

SODANO, H. A.; PARK, G.; INMAN, Daniel J. 2004. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting. *Strain* 40(2):49 - 58

T. STARNER AND J. PARADISO. 2004. *Low Power Electronics Design*. CRC Press, New York), Chap. 45. 2004.

TOIT, NOEL EDUARD du. 2005. Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric. MASSACHUSSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

TRIPLETT, Angela L. 2008. Vibration-based energy harvesting. UNIVERSITY OF AKRON.

V. MISRA, A. BOZKURT, B. CALHOUN, T. JACKSON, J. S. JUR, J. LACH, B. LEE, J. MUTH, O. ORALKAN, M. OZTURK, S. TROLIER-MCKINSTRY, D. VASHAEE, D. WENTZLOFF, AND Y. ZHU. 2015. Flexible Technologies for Self-Powered Wearable Health and Environmental Sensing. *Proceedings of the IEEE* 103(4):665-681

WILLIAM, C.B.; YATES, R.B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensors and Actuators*, Reino Unido, v. 52, p. 8-11, abr./1996.

W.J. CHOI, Y. JEON, J. H. JEONG, R. SOOD, S.G. KIM. 2005. Energy harvesting MEMS device based on thin film piezoelectric cantilevers. *Journal of Electroceramics* 17(2):543-548.

ZAKHAROV, D.; LEBEDEV, Gor; CUGAT, O.; DELAMARE, J.; VIALA, B.; LAFONT, T. e SHELYAKOV, A. 2012. Thermal energy conversion by coupled shape memory and piezoelectric effects. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 22(9).

ZHENGBAO YANG, SHENGXI ZHOU, JEANZU, DANIEL INMAN. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *Joule* 2(4):642-697.

APÊNDICE A: Ferramenta de cálculo



APÊNDICE B: Manual do usuário

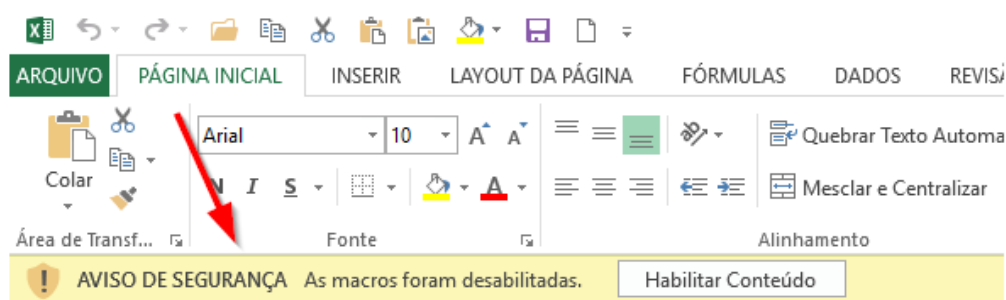
SEÇÃO 1 – Conhecendo o aplicativo

Nesta seção será apresentada a forma correta de abertura da aplicação, além da interpretação de suas funcionalidades e limitações através de uma sequência de passos.

Abrindo pela primeira vez:

1.1 – Após realizar o *download* pelo link disponibilizado via site oficial do CEFET/RJ, abra o arquivo “Aplicação.xlsm” na pasta de destino;

1.2 – Caso apareça uma planilha normal de Excel, clique em “Habilitar conteúdo”, assim como na imagem abaixo:



Interface principal:

1.3 – A página de menu inicial será aberta (em tela cheia) e as opções **Executar Modelagem Analítica**, **Editar planilha de cálculos**, **Manual do Usuário** e **Sair** irão aparecer.



Figura B.1: *Print screen* da tela de Menu Principal. Elaboração própria.

1.4 – Para acessar o modelo e iniciar os cálculos basta clicar no texto ou no ícone **Executar Modelagem Analítica**;

1.5 – Se for necessária alguma alteração ou visualização no equacionamento utilizado nesta aplicação, deve-se acessar o ambiente **Editar planilha de cálculos**;

1.6 – Em caso de dúvidas, é altamente recomendável consultar o material presente no **Manual do Usuário**;

1.7 – Como opção de saída, basta clicar em **Sair** e fechar o arquivo depois da aplicação ser finalizada.

SEÇÃO 2 – Executando modelagem analítica

Passo-a-passo para boa utilização:

Ao seguir o passo 1.4, observe que na sessão **Modelo** são mostrados dois desenhos esquemáticos de uma viga em balanço acoplada com dois piezelétricos idênticos, no modo Bimorfo. Note que o comprimento e a largura dos piezelétricos são os mesmos da viga em questão, seguindo o modelo apresentado no projeto de referência.

Neste ambiente, serão dados *inputs* (entradas) como materiais, dimensões e grandezas físicas associadas ao modelo para que sejam calculadas as variáveis piezelétricas: **Capacitância** (em μF), **Potência média** (em μW), **Potência máxima** (em μW), **Tensão elétrica RMS** (em V), **Frequência de pico** (em Hz), **Limites e Largura de banda** (em Hz) e **Deslocamento** (em mm).

2.1 - Para começar, selecione os materiais utilizados no modelo, tanto na estrutura quanto no piezolétrico, apenas clicando uma vez nas opções fornecidas na caixa de texto, conforme apontado na figura 2 abaixo.

DIMENSIONAMENTO PIEZELÉTRICO

Desenvolvido por Lucas Geoffroy e Mateus Queiroz

Menu
Cálculos
Ajuda

MODELO



Vista trimétrica de viga em balanço com dois piezolétricos em modo bimorfo



Vista da seção transversal do modelo

MATERIAIS

Material da estrutura (viga) Default
Alumínio (3003) Adicionar Material

Tipo do piezolétrico Default
PZT - 5A Adicionar Material

DIMENSÕES

Comprimento da viga [L, em mm]

Largura da viga [W, em mm]

Espessura da viga [ts, em mm]

Espessura unitária do piezolétrico [tp, em mm]

GRANDEZAS FÍSICAS

Magnitude da aceleração de base [em m/s²]

Intervalo de Frequências [em Hz] a

Resistência [em kΩ]

CALCULAR
VOLTAR

Figura B.2: Print screen da tela de Dimensionamento Piezolétrico.

2.2 – Na sessão **Dimensões**, digite nas caixas de texto em branco, os parâmetros de entrada geométricos de cada elemento (viga e piezolétrico), conforme o exemplo ilustrativo a seguir. **Atenção:** digite **somente números** usando a vírgula como separador decimal, caso contrário, os resultados apresentarão erros e não serão mostrados no final.

DIMENSIONAMENTO PIEZELÉTRICO

Desenvolvido por Lucas Geoffroy e Mateus Queiroz

Menu
Cálculos
Ajuda

MODELO



Vista trimétrica de viga em balanço com dois piezolétricos em modo bimorfo



Vista da seção transversal do modelo

MATERIAIS

Material da estrutura (viga) Default
Alumínio (3003) Adicionar Material

Tipo do piezolétrico Default
PZT - 5A Adicionar Material

DIMENSÕES

Comprimento da viga [L, em mm]

Largura da viga [W, em mm]

Espessura da viga [ts, em mm]

Espessura unitária do piezolétrico [tp, em mm]

GRANDEZAS FÍSICAS

Magnitude da aceleração de base [em m/s²]

Intervalo de Frequências [em Hz] a

Resistência [em kΩ]

CALCULAR
VOLTAR

Figura B.3: Print screen da tela de Dimensionamento Piezolétrico.

2.3 – Para finalizar, digite os parâmetros físicos aceleração de base, intervalo de frequência de excitação e resistência – sempre se atentando para as unidades - na sessão **Grandezas Físicas** e, em seguida, clique no botão “Calcular” e aguarde a execução.

DIMENSIONAMENTO PIEZELÉTRICO
Desenvolvido por Lucas Gecimay e Melissa Queiroz

Menu Cálculos Ajuda



MODELO



Vista tridimensional de viga em balanço com dois piezoeletricos em modo bimorfo



Vista da seção transversal do modelo

MATERIAIS

Material da estrutura (viga) Default Aluminio (3003) Adicionar Material

Tipo do piezoeletrico Default PZT - SA Adicionar Material

DIMENSÕES

Comprimento da viga [L, em mm]

Largura da viga [W, em mm]

Espessura da viga [ts, em mm]

Espessura unitária do piezoeletrico [tp, em mm]

GRANDEZAS FÍSICAS

Magnitude da aceleração de base [em m/s²]

Intervalo de Frequências [em Hz] a

Resistência [em kΩ]



CALCULAR
VOLTAR

Figura B.4: *Print screen* da tela de Dimensionamento Piezolétrico.

Adicionando materiais a base de dados:

Caso o material de trabalho não esteja na lista, basta clicar no botão “Adicionar Material” – localizado ao lado da lista de materiais - e entrar com as propriedades que deseja trabalhar, sempre se atentando para as unidades. Veja abaixo como inserir esses valores para cada caso.

Para inserir materiais para viga (estrutura), ao clicar no botão **Adicionar Material**, do lado da lista de materiais, basta entrar com os valores que deseja e clicar em **Cadastrar**, seguindo o exemplo abaixo.

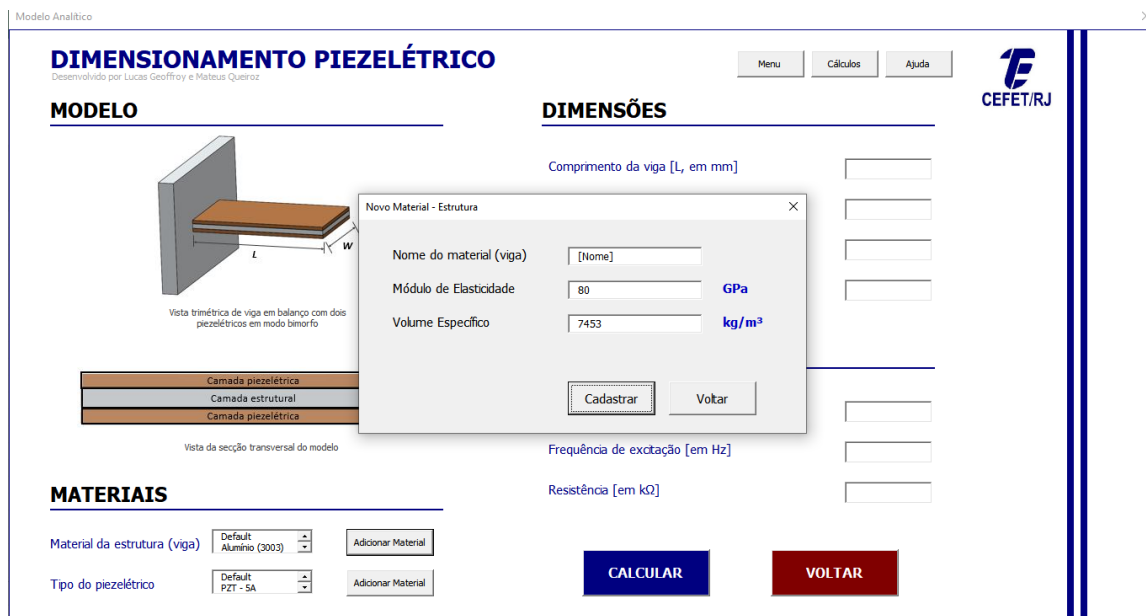


Figura B.5: Print screen da tela de Novo Material - Estrutura. Elaboração própria.

Concluído o passo anterior, note que o novo material já foi adicionado e encontra-se no final da lista. Lembre-se de selecioná-lo antes de iniciar o preenchimento das dimensões.

Para inserir materiais para os piezoeletricos, ao clicar no botão **Adicionar Material**, do lado da lista de materiais, basta entrar com os valores que deseja e clicar em **Cadastrar**, seguindo o exemplo abaixo.



Figura B.6: Print screen da tela de Novo Material - Piezo. Elaboração própria.

Note que os parâmetros de entrada piezoeletricos são diferentes dos materiais estruturais, isso se deve pela maior influência piezoeletrica nos cálculos de capacitância,

potência de saída, tensão elétrica e deslocamento. Essas especificações são encontradas em catálogos de fabricantes ou em referências facilmente obtidas na *web*;

Concluído o passo anterior, note que o novo material já foi adicionado e encontra-se no final da lista da janela anterior. Lembre-se de selecioná-lo antes de iniciar o preenchimento das dimensões.

SEÇÃO 3 – Apresentação de resultados

Os resultados serão mostrados através de um painel em tela cheia que aparecerá após o processamento computacional.

Painel de resultados:

Conforme ilustrado a seguir, o painel de resultados apresenta um gráfico de curvas de potência piezométrica (potência x frequência), uma coluna à esquerda com os resultados gerados através dos *inputs* do usuário e outra coluna à direita com resultados consequentes de uma otimização de potência média, realizada e calculada automaticamente pelo programa. Além de duas opções de botões: em **Gerar Relatório** é possível exportar os dados obtidos e visualizados no painel para um arquivo de texto, salvo na mesma pasta de destino do aplicativo; e o botão **Voltar** para regredir a tela anterior, a fim de realizar novas análises.

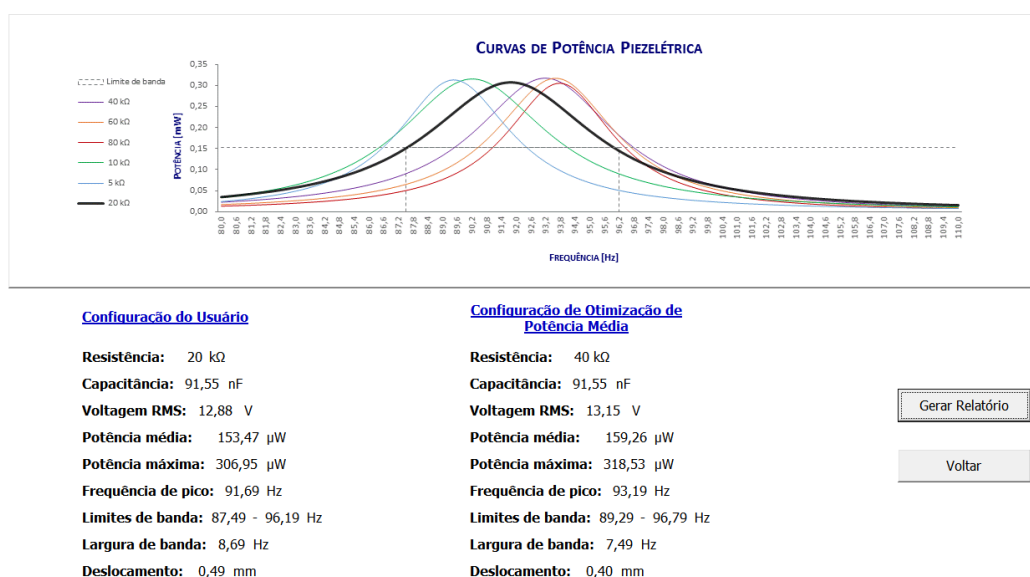


Figura B.7: Print screen da tela de Painel de Resultados. Elaboração própria.

Ao analisar o gráfico, é possível observar que existem diferentes curvas para as mesmas configurações de entrada, isto se deve porque cada curva representa uma resistência diferente, todas sendo proporcionais a resistência de entrada imputada pelo usuário. Porém, somente a resistência escolhida está grifada em negrito, a fim de destacá-la das demais e facilitar a leitura visual.

A reta pontilhada que corta transversalmente o eixo de potências representa o valor da potência média (ou RMS) da configuração do usuário, de modo que ao cruzar com a curva em negrito, demarca visualmente os limites de banda de frequência, sinalizados pelas linhas verticais.

SEÇÃO 4 – Tratamento de erros

Possíveis erros durante a modelagem:

Como o aplicativo necessita de entradas manuais, é comum que erros de preenchimento comprometam os cálculos e, conseqüentemente, os resultados. Desta forma, é possível evitar que alguns deles aconteçam e gerem insatisfação por parte do usuário. Seguem abaixo possíveis equívocos operacionais:

I) Erro de preenchimento em caixas de texto:

Toda a codificação em *Visual Basic Application* é feita em inglês, porém deve-se utilizar como separador decimal o caractere “,” (vírgula) para os parâmetros de entrada. Caso contrário, uma mensagem de texto aparecerá no final do preenchimento informando sobre a presença de uma anomalia;

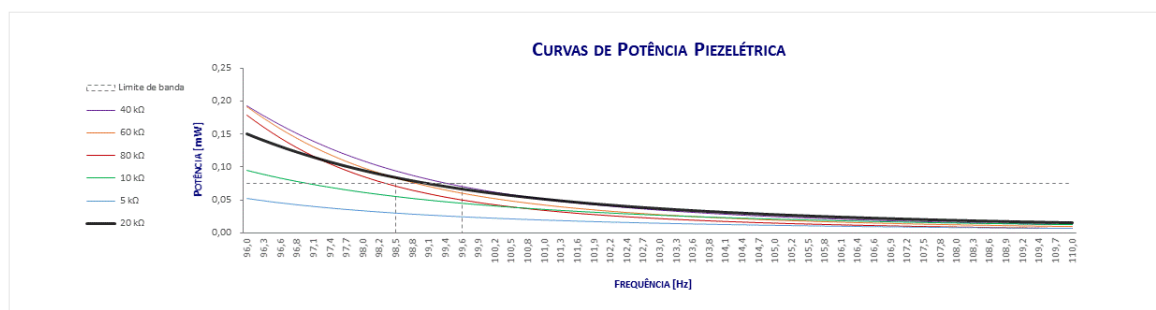
II) Não seleção de material:

Outro erro comum é a falta da seleção de materiais tanto da estrutura quanto do piezelétrico. As propriedades dos materiais escolhidos influenciam diretamente nos cálculos dos parâmetros de saída, portanto a não seleção na caixa de materiais causa erro imediato e impossibilita o correto processamento computacional.

O que fazer quando o gráfico fica confuso ou inconclusivo?

Os cálculos para determinar cada ponto presente no gráfico são cíclicos, ou seja, são frutos da utilização de comandos de *loop* computacional, portanto, existe a possibilidade de falhas visuais.

Uma falha comum é quando se trata de limites de banda de frequência, pois, como visto no projeto de referência, os limites de banda são graficamente definidos pelo cruzamento cartesiano entre a curva de potência piezométrica do usuário e a reta horizontal da potência média. Logo, caso só exista um ponto de encontro entre esses dois parâmetros, o programa não identificará os limites verdadeiros de banda de frequência e apresentará esses resultados equivocados, como ilustrado no exemplo abaixo.



Configuração do Usuário

Resistência: 20 kΩ
 Capacitância: 91,55 nF
 Voltagem RMS: 6,046 V
 Potência média: 75,412 µW
 Potência máxima: 150,82 µW
 Frequência de pico: 96 Hz Hz
 Limites de banda: 98,52 - 99,64 Hz
 Largura de banda: 1,12 Hz
 Deslocamento: 0,22 mm

Configuração de Otimização de Potência Média

Resistência: 40 kΩ
 Capacitância: 91,55 nF
 Voltagem RMS: 7,709 V
 Potência média: 96,164 µW
 Potência máxima: 192,32 µW
 Frequência de pico: 96 Hz Hz
 Limites de banda: 98,94 - 99,78 Hz
 Largura de banda: 0,84 Hz
 Deslocamento: 0,23 mm

Gerar Relatório

Voltar

Figura B.8: Print screen da tela de Painel de Resultados. Elaboração própria.

A solução para esse erro é simples, basta retornar à página de **Execução de Modelagem Analítica** e alterar os intervalos de frequência. Ainda seguindo o exemplo acima, bastaria deslocar o intervalo para a esquerda, ou seja, reduzir a frequência mínima de trabalho.