

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Desenvolvimento de um energy harvester MEMS piezoelétrico para sensores sem fio

Miron, Guilherme C.¹; Braga, Danilo²; Cordioli, Julio A.³

^{1,3} Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, gcm.miron@gmail.com, julio.cordioli@ufsc.br

² Dynamox, Florianópolis, SC, Brasil, danilo@dynamox.net

Resumo

O Monitoramento Baseado em Condição (CBM) via análise de vibração é um dos principais métodos preditivos utilizados na manutenção industrial ao longo das últimas décadas. Atualmente, o sensoriamento utilizado neste tipo de análise tem evoluído para os sensores sem fio, os quais permitem medições contínuas e de equipamentos que antes eram considerados inacessíveis para sensores cabeados. Contudo, uma grande limitação para estas tecnologias é a vida útil da bateria que é reduzida sob condições de temperaturas extremas, volume de dados monitorados e processados e frequência de uso. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um Energy Harvester (EH) piezoelétrico adaptado para sensores de monitoramento de vibração. Diferentes projetos são investigados e um EH piezoelétrico MEMS é selecionado, modelado e otimizado, usando um algoritmo de evolução diferencial, seguindo diferentes funções objetivo com restrições impostas pelo processo batch multiusuário usado para fabricar os protótipos. A otimização visa desenvolver um EH com frequência de ressonância em torno de 60 Hz, maior densidade de potência líquida possível e ampla faixa de frequência de trabalho. Para modelar a potência de saída para os diferentes projetos de EH, um modelo numérico 3D é construído usando a multifísica COMSOL. Os resultados experimentais mostram boa concordância com os modelos numéricos, porém é possível observar que as restrições impostas pelo procedimento de fabricação são muito restritivas e o NPD é inferior ao desejado.

Palavras-chave: Energy harvest, MEMS, Piezoelétrico, Elementos finitos.

PACS: 43.40.-r, 43.38.Fx, 43.28.We, 43.20.Ye.

Development of piezoelectric MEMS energy harvester for wireless sensors

Abstract

Condition Based Monitoring (CBM) via vibration analysis is one of the most prevalent methods in maintenance nowadays. In this sense, wireless sensors have proven to be a powerful tool in CBM, allowing continuous measurements, easy installation, and data acquisition, as well as diminishing the risk of work-related injuries. One of their limitations is the battery life-time of the sensor. This work presents the development of a piezoelectric Energy Harvester (EH) adapted for vibration monitoring sensors. Different designs are investigated and a MEMS piezoelectric EH is selected, modeled and optimized, using a differential evolution algorithm, following different objective functions with restrictions imposed by the multi-user batch process used to fabricate the prototypes. The optimization is targeted to develop an EH with resonance at 60 Hz, highest net power density as possible, and wide working frequency range. To model the output power given the different EH designs, a 3D numerical model is built using COMSOL multiphysics. Experimental results show good agreement with the numerical models, however it is possible to see that the restrictions imposed by the manufacturing procedure are too restrictive and the NPD is lower than desired.

Keywords: Energy harvest, MEMS Piezoelectric, FEM.



1. INTRODUÇÃO

Ao longo de décadas, o setor de manutenção de máquinas industriais passou por diversas transformações para criar programa/sistema de manutenção eficientes. Dentre estes, existem 3 abordagens principais de como e quando realizar a manutenção de certo equipamento: manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva. Embora cada alternativa possa trazer vantagens e desvantagens, com os avanços de técnicas de monitoramento e instrumentação, a manutenção preditiva se tornou reconhecida como a uma das melhores estratégias de manutenção para a maior parte dos casos [1]. As indústrias com máquinas de alto custo ou que precisam rodar por longos períodos sem paradas são exemplos de setores em que a manutenção preditiva é essencial.

A manutenção preditiva pode verificar a condição de uma máquina a partir de diversos indicadores, por exemplo, pode-se analisar as vibrações, análise de óleo, ultrassom, temperatura ou até a eficiência da máquina sendo monitorada. Entre estes, o monitoramento de vibrações é o método mais predominante para monitoramento de máquinas [1]. Os dados de vibrações das máquinas são medidos e analisados para realizar diagnósticos sobre a condição do equipamento, onde são utilizados sensores de vibração como acelerômetros, transdutores de velocidade e sensores de proximidade. Consequentemente, um dos elementos centrais da manutenção preditiva são os sensores de vibração, sendo necessário avaliar os pontos negativos e positivos de cada tipo, sendo estes sensores de deslocamento, velocidade e aceleração. O mais comum dentre estes, para monitoramento, são os acelerômetros piezoelétricos, pois apresentam uma grande faixa de trabalho em termos de amplitude de vibração e frequência [1]. Estes podem ser utilizados em medições contínuas com sistemas fixos onde cabos longos devem ser cuidadosamente posicionado para não interferir com o funcionamento das máquinas ou a partir de rotinas de medições intermitentes realizadas com um único acelerômetro e um coletor de vibrações onde o trabalhador deve ir de máquina em máquina para coletar os dados uma de cada vez. A primeira apresenta um alto custo e é normalmente utilizada para máquinas de alto custo ou críticas para a operação da indústria. A segunda, apre-

senta um custo muito menos elevado e permite análises mais detalhadas dos sinais de vibração, no entanto não é indicado para identificar quebras repentinas. Em ambos os casos existem desvantagens que podem ser mitigadas com o uso de sensores sem fios como por exemplo o datalogger da Dynamox®. Este datalogger possui sensores de vibração triaxial e temperatura e transmite os dados coletados sem fio, de aproximadamente 53 cm³ com uma autonomia de 3 a 5 anos, dependendo do uso [2]. Os dispositivos de grande autonomia, como este, compactos e sem fio permitem grande versatilidade no uso, pois eliminam problemas de conexão entre acelerômetro e coletores de vibrações causada por defeitos ou mal uso dos cabos, remove a necessidade de pessoas realizando inspeções em campo que aumenta a segurança do trabalhador, permite o monitoramento de máquinas em espaços inacessíveis ao homem ou onde o uso de cabos não são viáveis e a coleta de dados continua ao invés de medições em rota e periódicas (a cada 7 ou 14 dias). Em contrapartida, a ausência de fios exige que o sensor seja abastecido por uma bateria que limita a vida útil do sensor quando comparados a sensores com fio.

A longevidade de dispositivos eletrônicos de coleta como em dataloggers está diretamente atrelada ao consumo elétrico de seus componentes e ao volume de coletas realizadas. Recentemente, os microdispositivos tem experimentado um grande avanço tecnológico que causou uma rápida redução do consumo elétrico e desta forma aumentou a vida útil de tais dispositivos. Além disso, esta redução permitiu que novas alternativas de estender a vida de equipamentos eletrônicos fossem investigadas. Ela possibilitou que vários métodos de captação de energia do ambiente substituíssem ou complementassem as baterias tradicionais [3] que alimentam dispositivos como sensores de vibração. Estes dispositivos de captação denominados na literatura por "*Energy Harvesters*" (EH) podem fazer uso de diversas formas de energias que estão disponíveis no ambiente, como por exemplo, energia solar, térmica, química e mecânica [4]. EHs que captam energia mecânica tem como vantagem ser sustentável, estável e pequeno [5]. A energia mecânica pode ser captada de diversas fontes como máquinas e equipamentos da indústria, veículos, movimento humano e fluidos [6]. Este trabalho visa desen-

volver um EH para sensores de vibração sem fio utilizados em monitoramento de máquinas da indústria, por isso a vibração de máquinas é a fonte de energia de maior interesse neste trabalho. Neste contexto, para efeitos deste trabalho, é considerado aqui EH como sendo apenas aqueles que fazem a captação de energia a partir de vibrações.

Os sensores sem fios para monitoramento de vibração normalmente apresentam dimensões compactas, possuem consumo médio em torno de 100 μW [3] de potência. Por outro lado, as máquinas industriais, mesmo em boas condições, tem a maior parcela de sua energia vibracional na faixa em torno de 40 Hz à 200 Hz [7]. Desta forma, desenvolver um sistema de captação de energia compacto que seja capaz de entregar energias na ordem de 100 μW ou mais e que trabalhe em baixas frequências é um grande desafio tecnológico e uma solução de grande interesse para a indústria de monitoramento. Portanto, neste trabalho, é descrito o processo de desenvolvimento de um Microelectromechanical systems (MEMS)¹ piezoelétrico, o qual é projetado para operar próximo a frequência de 60 Hz com uma relação entre potência e volume otimizada. Com este propósito é levantado os méritos de cada princípio de transdução utilizado em EHs para determinação das vantagens e desvantagens de cada tipo. Um modelo numérico tridimensional é proposto e acoplado a um algoritmo de otimização, implementado em MATLAB da MathworksTM [8], de forma a oferecer uma forma conveniente para obtenção de um sistema de captação de energia a partir de vibrações apropriado para a aplicação em monitoramento de vibrações.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Para o processo de desenvolvimento de um EH é importante destacar os principais princípios de transdução utilizados para captação de energia a partir de vibrações. Pode-se destacar 4 princípios: (i) piezoelétrico, (ii) eletrostático, (iii) eletromagnético e (iv) magnetostriativo. Dhadwal et al. [9] apresenta uma comparação qualitativa de

EHs que fazem uso destes princípios, destacando características muito importantes como a compatibilidade com MEMS. Além disso, é importante para este trabalho o destaque de algumas características dos transdutores piezoelétricos como a capacidade de miniaturização (ou facilidade de integração com MEMS), estruturas simples, ausência de necessidade de uma fonte de energia externa. Roundy et al. [10, 11] apresentam uma comparação quantitativa através da densidade de armazenamento de energia inerente de cada transdutor, utilizando 2 abordagens diferentes: análise do máximo prático e máximo agressivo. O primeiro representa o máximo alcançável com as tecnologias disponíveis no momento de publicação do artigo (2005) e o segundo o que é teoricamente possível. A Tabela 1 apresenta a comparação realizada por Roundy et al. [10, 11]. A partir dela identifica-se uma ligeira vantagem prática da transdução piezoelétrica sobre a eletromagnética que por conseguinte é consideravelmente maior que a eletrostática.

Tabela 1: Comparação quantitativa da máxima densidade de armazenamento de energia [10, 11].

Tipo	Máximo prático (mJ/cm ³)	Máximo agressivo (mJ/cm ³)
Piezoelétrico	35.4	335
Eletrostático	4	44
Eletromagnético	24.8	400

A densidade de armazenamento de energia é aqui utilizada apenas para destacar os méritos e capacidades de cada método de transdução. Para verificar a performance de diferentes designs de EHs podem ser avaliadas diferentes métricas como: Volume total, frequência de ressonância, potência, Potência Normalizada (PN) pela aceleração da base, densidade de potência normalizada ou *Normalized Power Density* (NPD) e *Figure of Merit* (F.o.M.) [7]. Sendo os dois últimos especialmente interessantes por facilitar comparação entre diferentes dispositivos e determinar objetivos. O NPD é definido como

$$\text{NPD} = \frac{P}{V\dot{x}_b^2}, \quad (1)$$

sendo P é a potência captada na ressonância, V o

¹O termo sistemas microeletromecânicos ou MEMS denota um dispositivo de escala microscópica com partes elétricas ou eletrônicas (ou ambas) e mecânicas (que sugere partes moveis). No entanto, o conceito de MEMS já evoluiu englobar tudo que é tipo de sistema microscópico como os térmicos, ópticos, magnéticos e fluídicos.



volume total e $\ddot{x}_b$ a aceleração da base. O F.o.M. é definido como,

$$\text{F.o.M.} = \text{NPD } B, \quad (2)$$

onde B é a banda de meia potência.

Marin [12] apresenta uma comparação da potência normalizada pela aceleração imposta ao EH para diversos trabalhos da literatura. No caso específico de Marin [12] é utilizado uma variação de potência normalizada em que é multiplicada pela frequência de ressonância. Isso é realizado pois a potência disponível no ambiente para captação de um EH é, em geral, inversamente proporcional a frequência natural do dispositivo, levando em consideração uma amplitude de aceleração constante. Esta relação pode ser identificada pela equação de potência [13],

$$\frac{P}{\ddot{x}_b^2} = \frac{\xi_e}{4\omega_n(\xi_e + \xi_m)^2} m_{eq}, \quad (3)$$

onde ξ_e é o fator de amortecimento elétrico, ξ_m o fator de amortecimento mecânico, ω_n a frequência natural, m_{eq} é a massa sísmica do dispositivo. A partir dessa métrica, Marin [12] identifica a zona crítica próxima de $\approx 0,5\text{cm}^3$ de volume total como a região "crítica" onde nem transdutores piezoelétricos nem eletromagnéticos possuem uma vantagem clara de PN. Abaixo dessa região os piezoelétricos se tornam mais vantajosos e acima dela os eletromagnéticos tem vantagem.

Destaca-se, no entanto, que é impossível estabelecer uma clara e definitiva comparação entre os diferentes tipos de transdutores [14]. Briand et al. [14] salienta que, teoricamente, a densidade de potência do EH não depende do volume do dispositivo, porém na prática ela reduz com o volume. Portanto, ele propõe uma "regra geral" baseada no tamanho do dispositivo desejado onde transdutores eletrostáticos são mais recomendáveis para escalas micrométricas a milimétricas, piezoelétricos de escalas milimétricas a centimétricas, e eletromagnéticos para grandes deslocamentos, escalas centimétricas a decimétricas.

3. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO E MODELAGEM

Os materiais piezoelétricos são uma classe de materiais que podem acumular carga elétrica em

resposta a aplicação de uma tensão mecânica [15], que por conseguinte pode ser captada e utilizada para fornecer energia para um sensor sem fio, por exemplo. As equações piezoelétricas lineares que regem estes dispositivos podem ser expressas de várias formas, sendo uma delas [11, 16],

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d]^t \{E\}, \quad (4)$$

$$\{D\} = [d] \{T\} + [\epsilon^T] \{E\}, \quad (5)$$

onde $\{S\}$ é o vetor de seis dimensões de deformação, $\{T\}$ o vetor de tensões, $\{D\}$ o vetor de três dimensões de deslocamento elétrico, $\{E\}$ o vetor de campo elétrico, $[s^E]$ é a matriz 6 x 6 de complância avaliada em campo elétrico constante, $[d]$ é a matriz 3 x 6 de coeficientes piezoelétricos e $[\epsilon^T]$ é a matriz 3 x 3 de constantes dielétricas. O sobrescrito t indica uma matriz transposta.

A partir deste princípio, os EHs com diversos tipos de construção já foram concebidos, no entanto, o mais comum são os EHs do tipo "viga" ou variações deste [7, 10, 17–21, 21, 22]. Um EH deste tipo é composto por uma viga de material piezoelétrico colado a um material não piezoelétrico engastado em uma de suas pontas. Esta configuração apresenta diversas vantagens como capacidade de produzir grandes deformações e facilidade de fabricar, no entanto, o destaque para este trabalho está na facilidade desta configuração de alcançar baixas frequências naturais, principalmente quando adicionado uma massa sísmica a extremidade não engastada [23].

Ainda é possível separar estes EHs em vigas do tipo unimorfos e bimorfos, onde as unimorfos possuem material piezoelétrico em apenas uma face da viga e as vigas bimorfos possuem material piezoelétrico em duas faces opostas da viga, de forma que a energia produzida dobre sem grandes alterações ao volume total do material piezoelétrico [23]. Embora bimorfos apresentem vantagem na geração de energia, por limitações de fabricação nem sempre é possível obter designs deste tipo. Outra característica de dispositivos EHs é quanto ao seu modo de operação ou direção de polarização do material piezoelétrico. Eles são denominados pelos coeficientes mais significativos (para tal modo de operação) da matriz $[d]$, podendo ser o d_{33} ou d_{31} . Os principais pontos a serem levantados a respeito destes modos

de operação são: O coeficiente piezoelétrico d_{33} costuma ser aproximadamente $\approx 2,4$ vezes maior que o d_{31} [24]; PVEHs trabalhando em modo d_{33} costumam ter uma tensão maior enquanto d_{31} uma corrente maior [25]; d_{31} costumam apresentar uma potência maior por apresentarem uma capacitância maior [26]. Em contraste, d_{33} costuma apresentar uma performance melhor para atuadores [27]. Além disso, fatores como a dificuldade de se polarizar ou fabricar o dispositivo são importantes de se destacar. Pode ser difícil polarizar um filme piezoelétrico no modo d_{33} por causa da zona inativa (zona abaixo dos eletrodos onde o campo elétrico na direção da tensão mecânica é baixa) [28, 29]. Em contrapartida, o dispositivo no modo d_{31} pode precisar de uma camada extra de deposição e corrosão para formar o eletrodo inferior, tornando a fabricação mais complicada.

Os limites de fabricação podem impor grandes restrições no design de EHs. Neste trabalho foi utilizado o processo de fabricação PiezoMUMPs® da MEMSCAP Inc. [30]. Este processo permite apenas o uso de AlN como material piezoelétrico além de inviabilizar a construção de uma viga bimorfa. Em contra partida é possível fabricar uma viga que opere no modo d_{31} . Como pode ser visto na Tabela 2, os coeficientes do AlN são muito inferiores quando comparado aos outros materiais piezoelétricos, ele é principalmente utilizado por ser um composto binário simples, que pode ser depositado por *sputtering*² em uma grande variedade de superfícies [32].

Tabela 2: Valores típicos dos principais materiais piezoelétricos [14].

Material	d_{33} (pm/V)	d_{31} (pm/V)
PZT 5H	650	-320
PMN-32PT	2000	-920
AlN	5	-2,5

Um modelo numérico paramétrico na configuração de uma viga unimorfa que opera no modo d_{31} e respeita o processo de fabricação PiezoMUMPs® foi desenvolvidos com o *software* COMSOL *Multiphysics*® [33]. Na Figura 1 é

apresentado uma ilustração do modelo numérico e suas condições de contorno. A base na esquerda da ilustração é engastada enquanto uma força de corpo no valor de $\rho \cdot 1 \text{ m/s}^2$ (setas pretas) é aplicada sobre todos os domínios. Além disso, na região de contato entre o AlN e o Silício é estabelecido uma condição de aterramento, ou seja tensão igual a 0 V. Já na região de contato entre o alumínio e o AlN é dado uma condição de terminação totalmente acoplada a um circuito elétrico de parâmetros concentrados composto por uma resistência de carga, um nó de aterramento e o terminal representado pelo eletrodo do EH.

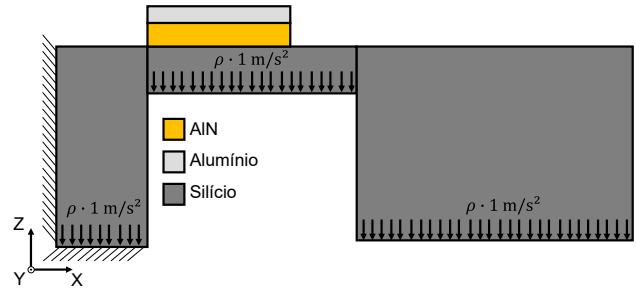


Figura 1: Ilustração do modelo numérico, suas condições de contorno e materiais.

O modelo possui uma malha composta por elementos prismáticos do tipo *serendipity* de segunda ordem e a simulação é calculada usando uma análise direta nas frequências de 58 Hz e 62 Hz. E com esse modelo tem-se o interesse de se calcular as seguintes propriedades: (i) potência normalizada dissipada na resistência de carga, (ii) volume total do dispositivo, (iii) tensão de von-mises máxima no volume do filme piezoelétrico. Sendo assim, a potência normalizada (i) em função da frequência é obtida a partir de,

$$PN(f) = \frac{\frac{1}{2}(V_R(f) \cdot I_R(f))}{\ddot{x}_b^2(f)}, \quad (6)$$

onde $PN(f)$ é a potência normalizada, $V_R(f)$ é a tensão elétrica na resistência de carga, $I_R(f)$ é a corrente elétrica na resistência de carga. O volume total (ii) é,

$$V = L_{\text{tot}} W_{\text{tot}} H_{\text{tot}}, \quad (7)$$

onde V é o volume total e L_{tot} , W_{tot} e H_{tot} são o comprimento, largura e altura total do dispositivo,

²Fenômeno que remove átomos da superfície de um material após ser bombardeado por partículas energéticas. Este processo pode ser utilizado para depositar filmes finos, do material bombardeado, sob uma outra superfície [31].



respectivamente. A tensão máxima (iii) é,

$$\sigma_{max}(f) = \max_{V_{pz}} (\sigma_{von\ mises}(x, y, z, f)), \quad (8)$$

onde $\sigma_{max}(f)$ é a tensão máxima no volume do material piezoelétrico, $\max_{V_{pz}}()$ é o operador de máximo dentro do volume do material piezoelétrico e $\sigma_{von\ mises}(x, y, z, f)$ é a tensão de von mises. Por fim, ainda é feita uma segunda simulação com uma condição de curto circuito entre o aterramento e o eletrodo. Desta forma pode ser calculado a sensibilidade de carga do dispositivo por,

$$S_q(f) = \frac{1}{\ddot{x}_b(f)} \int_{A_{el}} n_d(x, y, f) dA, \quad (9)$$

onde $S_q(f)$ é a sensibilidade de carga, A_{el} é a área de interseção entre eletrodo e material piezoelétrico e $n_d(x, y, f)$ é a densidade de carga na área A_{el} .

4. OTIMIZAÇÃO

A otimização é realizada com um algoritmo Diferencial Evolutivo (DE) implementado na linguagem de programação MATLAB da MathworksTM. Os modelos construídos no COMSOL são integrados com o algoritmo de otimização escrito em MATLAB a partir do modulo *LiveLink* para MATLAB. Alguns dos parâmetros de otimização escolhidos estão ilustrados na Figura 2 faltando apenas largura e comprimento do material piezoelétrico e o eletrodo, fator de qualidade Q e a resistência de carga. Destaque para o parâmetro Q, pois entende-se que, dentro de certo limite, é possível controlar o amortecimento de dispositivos MEMS a partir de um encapsulamento apropriado. Isto é, pode-se encapsular um dispositivo MEMS de forma hermética com uma pressão interna bem controlada. Assim, diminuindo a pressão interna durante o encapsulamento é possível aumentar o fator de qualidade em alguns dispositivos MEMS [34].

Outro parâmetro muito importante para configurações do tipo viga como proposto nesse trabalho é o Y0 destacado na Figura 2, que adiciona um aspecto trapezoidal a viga do EH. Vigas com formato mais "trapezoidais" otimizam a distribuição de tensões no comprimento da viga e assim podem fornecer mais que o dobro de energia (por

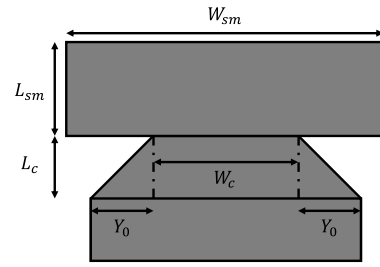


Figura 2: Ilustração de alguns dos parâmetros de otimização.

unidade de volume) comparado com uma viga retangular [10]. Para esta rodada de otimização foi utilizado como configuração do algoritmo um fator de escala de 0,8 junto com uma taxa de cruzamento de 0,9, população inicial definida como 80 e convergência de otimização quando uma diferença de 10^{-6} é alcançada entre 50 gerações ou encerrada quando o número de iterações chegou a 500. A função objetivo, acoplada ao algoritmo, roda o modelo numérico nas frequências de 58 Hz e 62 Hz buscando maximizar o menor dentre as duas frequências, em termos de NPD sobre a tensão de von mises máxima no material piezoelétrico. Ela pode ser escrita da forma,

$$F_{obj} = \max \left(\frac{\min(NPD(58\ Hz, 62\ Hz))}{\max(\sigma_{max}(58\ Hz, 62\ Hz))} \right). \quad (10)$$

Com esta função objetivo deseja-se otimizar o NPD e ao mesmo tempo melhorar a distribuição de tensões sobre o filme piezoelétrico. Esta otimização gerou um design otimizado que deu origem ao protótipo apresentado na Figura 3. O dispositivo final possui um volume total de 4,500 mm x 7,270 mm x 0,411 mm ou 13,4 mm³, considerando apenas a estrutura viga-massa sísmica.

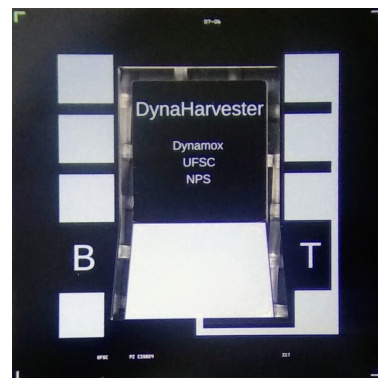


Figura 3: Foto de microscópio do protótipo MEMS fabricado via processo PiezoMUMPs[®].

5. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE VALIDAÇÃO DE MODELO

As primeiras etapas de validação do modelo são realizadas a partir de experimentos realizados como na Figura 4. Um notebook [A] é conectado a uma placa de aquisição da LMS Scadas V8-E da Siemens [B], onde são utilizados dois canais de entrada e um de saída. Ao primeiro canal de entrada é conectado um *vibrometer controller* OFV-2500 da Polytec com um sensor OFV-534 [C] que aponta para a moldura do protótipo [E] para obter a aceleração da base. O segundo canal da placa de aquisição é ligada a um amplificador de carga tipo 2692-C da B& K [F] que é conectado ao protótipo de EH MEMS. O protótipo é fixado em um *shaker* tipo 4809 da B& K [D] que é conectado um amplificador de potência tipo 2735 da B& K [G] que por conseguinte é conectado ao canal de saída da placa de aquisição.

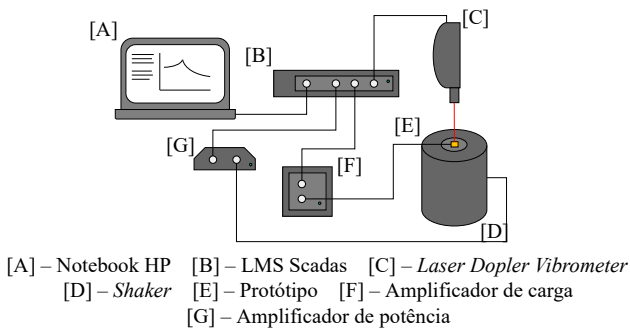


Figura 4: Ilustração da bancada de ensaio utilizada para ensaio dos protótipos de EH MEMS.

Na Figura 5 é representado a sensibilidade de carga do modelo numérico em comparação com dois dos protótipos testados denominados aqui EH A e B. A grande diferença entre a sensibilidade máxima do modelo e a dos protótipos é devido ao amortecimento considerado no modelo numérico. Como já foi descrito anteriormente, o amortecimento do modelo foi dado como um parâmetro de otimização por ser possível controlá-lo até certo ponto. No entanto, os protótipos MEMS testados não foram encapsulados com uma pressão interna bem definida, desta forma, os sensores foram ensaiados em pressão atmosférica sem qualquer tipo de encapsulamento.

O amortecimento viscoso presente nos experimentos é incluído nestos modelos numéricos através de um amortecimento estrutural equivalente dado

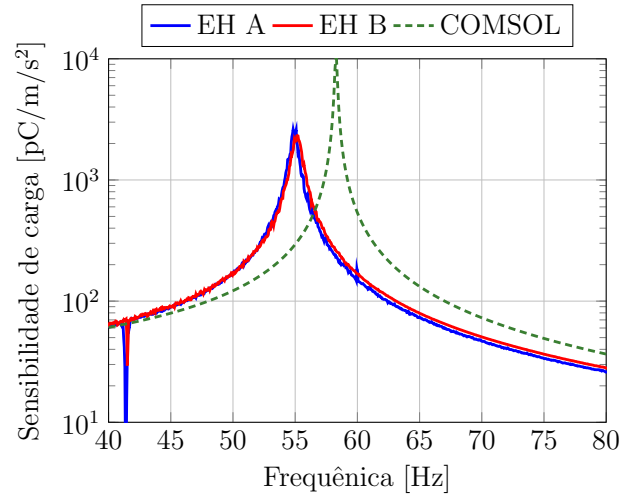


Figura 5: Comparação, em termos de sensibilidade de carga, das curvas experimentais dos protótipos EH A e B com o modelo numérico do COMSOL sem alteração do amortecimento.

por [35],

$$Q \approx \frac{1}{2\xi} \quad (11)$$

e

$$\eta \approx 2\xi, \quad (12)$$

sendo que η é o amortecimento estrutural dado de entrada no modelo numérico, Q é o fator de qualidade dado como parâmetro de otimização e ξ é calculado a partir das curvas de sensibilidade de carga dos protótipos utilizando o método *Rational Fraction Polynomial* [36]. Ambas equações são validas apenas para $\xi \ll 1$ e a Equação 12 é valida apenas na ressonância [35]. Visto que a Equação 12 é valida apenas para ressonância entende-se que o amortecimento estrutural aplicado no COMSOL não reflete apropriadamente o amortecimento dos experimentos, no entanto é uma simplificação que não introduz muitos erros na estimativa de carga e potência do EH.

Com relação a diferença nas frequências naturais do protótipo e do modelo, esta é ajustada de forma a corrigir as diferenças entre a dimensões nominais de projeto e as fabricadas. Destaca-se que o processo de fabricação PIEZOMUMPs apresenta um *undercutting* de até 50 μm [30]. Com estes ajustes geométricos mais a correção do amortecimento obtém-se a curva preta presente no gráfico da Figura 6.

Apesar da validação dos modelos numéricos fazendo uso de um amplificador de carga trazer al-

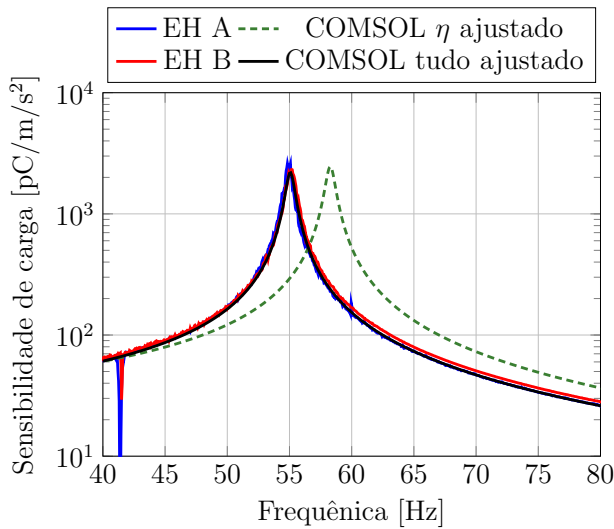


Figura 6: Comparação, em termos de sensibilidade de carga, das curvas experimentais dos protótipos EH A e B com o modelo numérico do COMSOL com ajuste do amortecimento apenas e outra com ajustes geométricos.

gumas vantagens como eliminação da influência dos cabos até a placa de aquisição, esta validação pode não representar bem o circuito utilizado nos modelos para calcular a potência extraída do EH. Para calcular a potência quase a mesma bancada da Figura 4 é mantido com exceção do amplificador de carga que é substituído por um circuito resistivo montado em um *proto-board*. A partir desta bancada foi extraído os dados presentes na Figura 7, que apresenta a potência máxima (na frequência natural) obtida pelo protótipo em função da variação da resistência de carga. A curva experimental de potencia foi calculada a partir da relação $P = V^2/R$. Pode ser notado que após $\approx 100 \text{ k}\Omega$ ocorreu um aumento no erro entre a curva experimental e a curva do modelo numérico, isso ocorre por limitações da placa de aquisição, que possui canais de entrada com impedância de $1 \text{ M}\Omega$. Ou seja, o circuito da placa de aquisição possui um acoplamento mais forte com o protótipo quando em paralelo a um resistências próximas da impedância de seus canais, o que causa uma influência no comportamento do EH.

Apesar das limitações dos experimentos é possível visualizar que o dados experimentais apresentam muito bem o formato característico de potência de um *energy harvester* em função de uma resistência de carga com o ponto ótimo próximo do valor previsto de $1,2 \text{ M}\Omega$. Já a Figura 8 apresenta a tensão na ressonância normalizada pela aceleração no eixo das ordenadas da esquerda, o

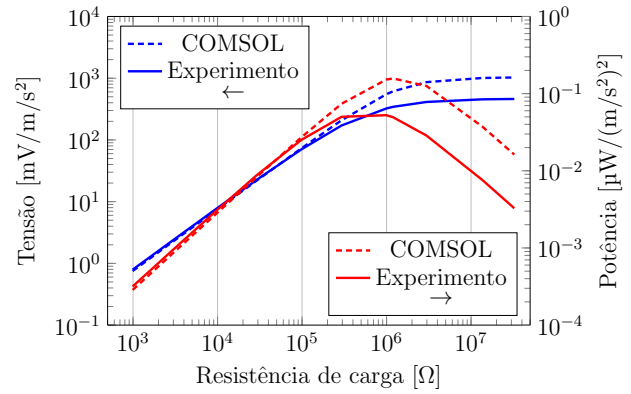


Figura 7: Comparação, em termos de tensão, potência e resistência de carga, das curvas experimentais do protótipo EH A com o modelo numérico do COMSOL.

amortecimento viscoso ξ no eixo das ordenadas da direita e a aceleração da base do protótipo no eixo das abscissas. Pode se perceber que para acelerações superiores a $0,01 \text{ m/s}^2$ o protótipo apresenta uma queda considerável de eficiência, onde a tensão produzida cai e o amortecimento ξ aumenta. Essa queda na tensão é esperada de um dispositivo quando ele começa a apresentar não linearidades devido ao aumento demasiado da aceleração da base [37].

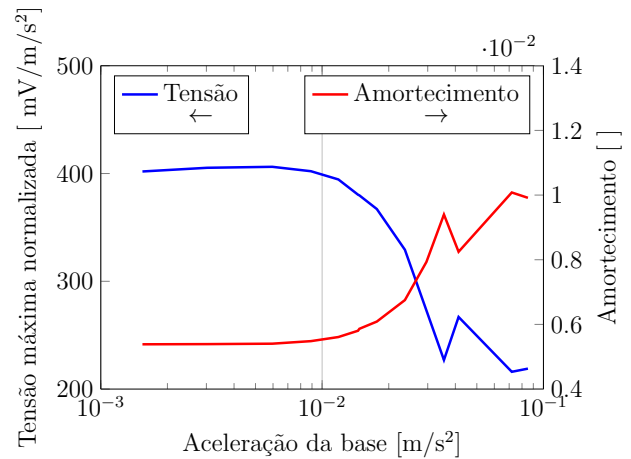


Figura 8: Comparação, em termos de tensão, potência e resistência de carga, das curvas experimentais do protótipo EH A com o modelo numérico do COMSOL.

Considera-se, portanto, a aceleração ótima de $0,006 \text{ m/s}^2$ e um limite de $0,01 \text{ m/s}^2$ para uma operação em estado otimizado para este design. A potência normalizada máxima obtida pelo protótipo foi de 64 nW/m/s^2 enquanto o modelo obteve 157 nW/m/s^2 . Isso resulta em um NPD de $0,46 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$ para o protótipo e $1,12 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$ para o modelo. Devido ao ajuste de amortecimento ambos apresentam aproximada-

mente a mesma banda de meia potência de 0,7 Hz que determina um F.o.M. de $0,32 \text{ mW Hz/cm}^3/\text{g}^2$ e $0,78 \text{ mW Hz/cm}^3/\text{g}^2$, para o protótipo e para o modelo, respectivamente.

6. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alguns detalhes importantes devem ser esclarecidos a respeito do design de EH piezoelétrico concebido neste trabalho. Entende-se que pelas limitações dos experimentos para este trabalho, a potência, e por consequência o NPD, dado pelo modelo numérico após os devidos ajustes é mais representativo que as potências obtidas pelos experimentos com uma resistência de carga maior que 100 k Ω . Portanto, para fins de comparação é razoável considerar que o design de um *energy harvester* MEMS piezoelétrico aqui investigado alcançou um NPD de $1,12 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$ e F.o.M. de $0,78 \text{ mW Hz/cm}^3/\text{g}^2$. Comparando o dispositivo aqui obtido em termos de NPD com outros da literatura o dispositivo pode ser considerado de performance razoável. Pois é encontrado NPDs de $0,11 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$ à $17,57 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$ [7] colocando o dispositivo desse trabalho no meio dos valores encontrado na literatura. Já em termos de F.o.M é encontrado valores de $0,4 \text{ mW Hz/cm}^3/\text{g}^2$ à $107,8 \text{ mW Hz/cm}^3/\text{g}^2$ o que posiciona o dispositivo próximo da margem inferior. Apesar de tudo, o principal fator que torna o dispositivo proposto aqui como uma solução não viável, esta na aceleração ótima. Isto é, sensores de monitoramento de máquinas da indústria estão expostos a vibrações de amplitude muito maiores que o limite de $0,01 \text{ m/s}^2$ deste dispositivo. Portanto, é destacado a grande importância de se estabelecer o ponto de operação do EH não apenas em termos de potência fornecida, dimensões e frequência de operação, mas também em termos de faixa dinâmica.

Além disso este trabalho apresentou pontos importantes a ser considerado no projeto de um EH de vibrações como as qualidades e limitações dos diferentes tipos de transdutores. Assim como apresentou brevemente algumas das formas de se configurar o dispositivo e detalhou a forma de modelagem e otimização utilizada para alcançar o protótipo apresentado aqui. Acredita-se que algumas alterações as limitações de fabricação e ao

método de otimização devem ser capaz de gerar EHs com performances mais apropriadas para a aplicação. Por exemplo, a substituição do material piezoelétrico por PZT ou PMN-32PT deve permitir que o dispositivo gere muito mais energia com o mesmo volume. Fazer uso de uma viga bimorfa também deve fornecer grandes avanços no design. Com relação a otimização, entende-se que estabelecer limites mais restritos para as tensões e deformações deve aumentar a faixa dinâmica (podendo trabalhar com acelerações maiores) e a vida útil do dispositivo, pois com menores deformações a probabilidade do dispositivo apresentar comportamentais não lineares diminui. Apesar das limitações do design proposto neste trabalho, o modelo numérico aqui desenvolvido apresenta grandes concordâncias com os dados experimentais que deve ser utilizado em trabalhos futuros.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Dynamox SA pelo suporte técnico e financeiro para a realização trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Randall, Robert B. Introduction and Background. Em *Vibration-based Condition Monitoring*, págs. 1–23. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, dec 2010. doi: [10.1002/9780470977668.ch1](https://doi.org/10.1002/9780470977668.ch1). Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470977668.ch1>.
- [2] Dynamox®. Datasheet DynaLogger AS. Technical report, Dynamox®, Florianópolis, Brasil, 2021. Disponível em: <https://dynamox.net/img/Datasheet-DynaLogger-AS-PT.pdf>.
- [3] Gammaitoni, Luca. There's plenty of energy at the bottom (micro and nano scale nonlinear noise harvesting). *Contemporary Physics*, 53 (2):119–135, mar 2012. ISSN 0010-7514. doi: [10.1080/00107514.2011.647793](https://doi.org/10.1080/00107514.2011.647793). Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00107514.2011.647793>.
- [4] Selvan, Krishna Veni e Mohamed Ali, Mohamed Sultan. Micro-scale energy harvesting devices: Review of methodological performances in the last decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54:1035–1047, feb 2016. ISSN 13640321. doi: [10.1016/j.rser.2015.10.046](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.046). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115011259>.
- [5] Khaligh, A.; Peng Zeng e Cong Zheng. Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57



- (3):850–860, mar 2010. ISSN 0278-0046. doi: [10.1109/TIE.2009.2024652](https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2024652). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5071287/>.
- [6] Zou, Hong-Xiang; Zhao, Lin-Chuan; Gao, Qiu-Hua; Zuo, Lei; Liu, Feng-Rui; Tan, Ting; Wei, Ke-Xiang e Zhang, Wen-Ming. Mechanical modulations for enhancing energy harvesting: Principles, methods and applications. *Applied Energy*, 255:113871, dec 2019. ISSN 03062619. doi: [10.1016/j.apenergy.2019.113871](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113871). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261919315582>.
- [7] Aktakka, Ethem Erkan; Peterson, Rebecca L e Najafi, Khalil. *Integration of Bulk Piezoelectric Materials into Microsystems*. Tese de doutorado, The University of Michigan, 2012.
- [8] Buehren, Markus. *Differential Evolution*, 2014.
- [9] Dhadwal, Harbans S e Rastegar, Jahangir. *Energy Harvesting for Low-Power Autonomous Devices and Systems*. SPIE, mar 2017. ISBN 9781510604919. doi: [10.1117/3.2256429](https://doi.org/10.1117/3.2256429). Disponível em: <https://spie-digitallibrary.org/ebooks/TT/Energy-Harvesting-for-Low-Power-Autonomous-Devices-and-Systems/eISBN-9781510604919/10.1117/3.2256429>.
- [10] Roundy, S.; Leland, E.S.; Baker, J.; Carleton, E.; Reilly, E.; Lai, E.; Otis, B.; Rabaey, J.M.; Sundararajan, V. e Wright, P.K. Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers. *IEEE Pervasive Computing*, 4(1):28–36, jan 2005. ISSN 1536-1268. doi: [10.1109/MPRV.2005.14](https://doi.org/10.1109/MPRV.2005.14). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1401840/>.
- [11] Roundy, S e Wright, P K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*, 13(5):1131–1142, oct 2004. ISSN 0964-1726. doi: [10.1088/0964-1726/13/5/018](https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/018). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/13/5/018>.
- [12] Marin, Anthony. *Mechanical Energy Harvesting for Powering Distributed Sensors and Recharging Storage Systems*. Tese de doutorado, Virginia Polytechnic Institute, 2013.
- [13] Xu, Ruize. *The Design of Low-frequency, Low-g Piezoelectric Micro Energy Harvesters*. Tese de doutorado, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [14] Briand, Danick; Yeatman, Eric; Roundy, Shad; Brand, Oliver; Fedder, Gary K; Hierold, Christofer; Korvink, Jan G e Tabata, Osamu. *Micro energy harvesting*. Wiley-VCH, 2015.
- [15] Tian, Wenchao; Ling, Zongyu; Yu, Wenbo e Shi, Jing. A Review of MEMS Scale Piezoelectric Energy Harvester. *Applied Sciences*, 8(4):645, apr 2018. ISSN 2076-3417. doi: [10.3390/app8040645](https://doi.org/10.3390/app8040645). Disponível em: <http://www.mdpi.com/2076-3417/8/4/645>.
- [16] Tichý, Jan; Erhart, Jiří; Kittinger, Erwin e Přivratská, Jana. *Fundamentals of Piezoelectric Sensorics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-540-43966-0. doi: [10.1007/978-3-540-68427-5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68427-5).
- [17] Priya, Shashank; Song, Hyun-Cheol; Zhou, Yuan; Varghese, Ronnie; Chopra, Anuj; Kim, Sang-Gook; Kanno, Isaku; Wu, Liao; Ha, Dong Sam; Ryu, Jungho e Polcawich, Ronald G. A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems*, 4(1):3–39, aug 2019. ISSN 2329-8774. doi: [10.1515/ehs-2016-0028](https://doi.org/10.1515/ehs-2016-0028). Disponível em: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ehs-2016-0028/html>.
- [18] Takei, Ryohei; Makimoto, Natsumi; Okada, Hiro-nao; Itoh, Toshihiro e Kobayashi, Takeshi. Design of piezoelectric MEMS cantilever for low-frequency vibration energy harvester. *Japanese Journal of Applied Physics*, 55(6S1):06GP14, jun 2016. ISSN 0021-4922. doi: [10.7567/JJAP.55.06GP14](https://doi.org/10.7567/JJAP.55.06GP14). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJA.55.06GP14>.
- [19] Wang, Lu; Zhao, Libo; Jiang, Zhuangde; Luo, Guoxi; Yang, Ping; Han, Xiangguang; Li, Xiang e Maeda, Ryutaro. High accuracy comsol simulation method of bimorph cantilever for piezoelectric vibration energy harvesting. *AIP Advances*, 9(9):095067, sep 2019. ISSN 2158-3226. doi: [10.1063/1.5119328](https://doi.org/10.1063/1.5119328). Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5119328>.
- [20] Park, Jung-Hyun; Kang, Junsuk; Ahn, Hosang; Kim, Seon-Bae; Liu, Dan e Kim, Dong-Joo. Analysis of Stress Distribution in Piezoelectric MEMS Energy Harvester Using Shaped Cantilever Structure. *Ferroelectrics*, 409(1):55–61, nov 2010. ISSN 0015-0193. doi: [10.1080/00150193.2010.487125](https://doi.org/10.1080/00150193.2010.487125). Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00150193.2010.487125>.
- [21] Liu, Huicong; Lee, Chengkuo; Kobayashi, Takeshi; Tay, Cho Jui e Quan, Chenggen. Investigation of a MEMS piezoelectric energy harvester system with a frequency-widened-bandwidth mechanism introduced by mechanical stoppers. *Smart Materials and Structures*, 21(3):035005, mar 2012. ISSN 0964-1726. doi: [10.1088/0964-1726/21/3/035005](https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/3/035005). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/21/3/035005>.
- [22] Huang, Manjuan; Hou, Cheng; Li, Yunfei; Liu, Huicong; Wang, Fengxia; Chen, Tao; Yang, Zhan; Tang, Gang e Sun, Lining. A Low-Frequency MEMS Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Frequency Up-Conversion Mechanism. *Micromachines* 2019, Vol. 10, Page 639, 10(10):639, sep 2019. doi: [10.3390/M10100639](https://doi.org/10.3390/M10100639). Disponível em: <https://www.mdpi.com/540260>.
- [23] Li, Huidong; Tian, Chuan e Deng, Z. Daniel. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*, 1(4):041301, dec 2014. ISSN 1931-9401. doi: [10.1063/1.4900845](https://doi.org/10.1063/1.4900845). Disponível em: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4900845>.

- [24] DUTOIT, NOËL E.; WARDLE, BRIAN L. e KIM, SANG-GOOK. DESIGN CONSIDERATIONS FOR MEMS-SCALE PIEZOELECTRIC MECHANICAL VIBRATION ENERGY HARVESTERS. *Integrated Ferroelectrics*, 71(1):121–160, jul 2005. ISSN 1058-4587. doi: [10.1080/10584580590964574](https://doi.org/10.1080/10584580590964574). Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10584580590964574>.
- [25] Kim, Seon-Bae; Park, Hyejin; Kim, Seung-Hyun; Wickle, H. Clyde; Park, Jung-Hyun e Kim, Dong-Joo. Comparison of MEMS PZT Cantilevers Based on d_{31} and d_{33} Modes for Vibration Energy Harvesting. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 22(1):26–33, feb 2013. ISSN 1057-7157. doi: [10.1109/JMEMS.2012.2213069](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2213069). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6293833/>.
- [26] Sodano, Henry A; Lloyd, Justin e Inman, Daniel J. An experimental comparison between several active composite actuators for power generation. *Smart Materials and Structures*, 15(5):1211–1216, oct 2006. ISSN 0964-1726. doi: [10.1088/0964-1726/15/5/007](https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/5/007). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/15/5/007>.
- [27] Bilgen, Onur; Wang, Ya e Inman, Daniel J. Electro-mechanical comparison of cantilevered beams with multifunctional piezoceramic devices. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27:763–777, feb 2012. ISSN 08883270. doi: [10.1016/j.ymssp.2011.09.002](https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.09.002). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327011003700>.
- [28] Beckert, Wieland e Kreher, Wolfgang S. Modelling piezoelectric modules with interdigitated electrode structures. *Computational Materials Science*, 26:36–45, jan 2003. ISSN 09270256. doi: [10.1016/S0927-0256\(02\)00390-7](https://doi.org/10.1016/S0927-0256(02)00390-7). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927025602003907>.
- [29] Bowen, C. R.; Nelson, L. J.; Stevens, R.; Cain, M. G. e Stewart, M. Optimisation of interdigitated electrodes for piezoelectric actuators and active fibre composites. *Journal of Electroceramics*, 16(4):263–269, jul 2006. ISSN 1385-3449. doi: [10.1007/s10832-006-9862-8](https://doi.org/10.1007/s10832-006-9862-8). Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10832-006-9862-8>.
- [30] Cowen, Allen; Hames, Greg; Glukh, Konstantin e Hardy, Busnee. PiezoMUMPs™ Design Handbook. Technical report, MEMSCAP Inc., 2014.
- [31] Behrisch, Rainer. Introduction and overview. págs. 1–8. 1981. doi: [10.1007/3540105212_6](https://doi.org/10.1007/3540105212_6). Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/3540105212_6.
- [32] Uchino, K. The Development of Piezoelectric Materials and the New Perspective. Em *Advanced Piezoelectric Materials*, págs. 1–92. Elsevier, 2017. doi: [10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.00001-1). Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081021354000011>.
- [33] COMSOL Multiphysics® V. 5.6. www.comsol.com.
- [34] Elfrink, R; Renaud, M; Kamel, T M; Nooijer, C; Jambunathan, M; Goedbloed, M; Hohlfeld, D; Matova, S; Pop, V; Caballero, L e Schaijk, R. Vacuum-packaged piezoelectric vibration energy harvesters: damping contributions and autonomy for a wireless sensor system. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(10):104001, oct 2010. ISSN 0960-1317. doi: [10.1088/0960-1317/20/10/104001](https://doi.org/10.1088/0960-1317/20/10/104001). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/20/10/104001>.
- [35] COMSOL Multiphysics® V. 5.5. Structural Mechanics Module User's Guide, 2020.
- [36] Acuña, Cristian Gutiérrez. Rational Fraction Polynomial Method, 2007. Disponível em: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3805-rational-fraction-polynomial-method>.
- [37] Machado, Sebastián P; Febbo, Mariano; Gatti, Claudio D e Osinaga, Santiago M. A piezoelectric beam model with geometric, material and damping nonlinearities for energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 29(9):095009, sep 2020. ISSN 0964-1726. doi: [10.1088/1361-665X/ab9ddb](https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab9ddb). Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/ab9ddb>.