

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA
VIGA PIEZELÉTRICA EXCITADA
MECANICAMENTE**

WESCLEY OLIVEIRA VIANA BARBOSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

**INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA EM UMA VIGA PIEZELÉTRICA
EXCITADA MECANICAMENTE**

WESCLEY OLIVEIRA VIANA BARBOSA

ORIENTADORA: ALINE SOUZA DE PAULA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM – 187A/2013

BRASÍLIA/DF: ABRIL – 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓSGRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA EM UMA VIGA PIEZELÉTRICA EXCITADA
MECANICAMENTE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.

APROVADA POR:

Prof^a. Aline Souza de Paula, Doutora (ENM-UnB)

(Orientador)

Prof^o. Marcus Vinícius Girão de Moraes, Doutor (ENM-UnB)

(Examinador Interno)

Prof^o. Edson Paulo da Silva, Doutor (ENM-UnB)

(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 30 DE ABRIL DE 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

BARBOSA, WESCLEY OLIVEIRA VIANA

Investigação Experimental da Geração de Energia Elétrica em uma Viga Piezelétrica Excitada Mecanicamente [Distrito Federal] 2013.

xvi, 74p., 210 x 297 mm (PPGCM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1. Material Piezelétrico

2. Viga Piezelétrica

3. Vibrações Mecânicas

4. Conversão de Energia

I. ENM/FT/UnB

II. Brasília

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARBOSA, W. O. V. Investigação Experimental da Geração de Energia Elétrica em uma Viga Piezelétrica Excitada Mecanicamente. Dissertação de Mestrado Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM – 187A/2013, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas, Universidade de Brasília –Faculdade de Tecnologia, Brasília, DF, 74p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Wescley Oliveira Viana Barbosa.

TÍTULO: Investigação Experimental da Geração de Energia Elétrica em uma Viga Piezelétrica Excitada Mecanicamente.

GRAU: Mestre ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Wescley Oliveira Viana Barbosa
QNN 06 conjunto L casa 41, Ceilândia.
72220-072 Brasília – DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de retornar à vida acadêmica, pela força e pela sabedoria que me foi dada durante esses dois anos de caminhada. Agradeço a minha esposa, Cristiane, uma mulher virtuosa e valorosa, que sempre foi paciente e tolerante. Esteve incentivando-me cotidianamente. Sua fé no meu sucesso fez-me alcançar esta vitória. Agradeço a minha pequenina filha, Isa, por ter nascido e alegrado as nossas vidas com sua doce companhia. Sua existência é uma motivação diária. Agradeço a minha orientadora, Aline, pois além de ter sido uma excelente professora, durante os cursos de Métodos Numéricos para Ciências Mecânicas e Vibrações Mecânicas, também foi uma orientadora presente, dedicada e comprometida com o desenvolvimento dessa pesquisa. Agradeço aos meus pais e irmãos pelos incentivos e palavras de conforto. Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília pelo compromisso em compartilhar os seus conhecimentos. Também agradeço aos colegas professores de Física do Colégio Militar Dom Pedro II, Márcio, Mike, Edson, Eliajime e Jairo, cujas experiências, valores e sabedoria contribuíram para o meu crescimento. Não posso esquecer-me do amigo e Mestre Ronaldo Rodrigues, cujos questionamentos científicos motivaram-me a pesquisar, indo além da mera curiosidade. E por fim, agradeço aos meus alunos de ontem, de hoje e de amanhã, pois todos vocês são o meu incentivo como professor neste país.

Wesley Oliveira Viana Barbosa

*Dedico este trabalho a todos aqueles que
me incentivaram a prosseguir.*

Wesley Oliveira Viana Barbosa

RESUMO

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM UMA VIGA PIEZELÉTRICA EXCITADA MECANICAMENTE.

Autor: Wesley Oliveira Viana Barbosa

Orientadora: Aline Sousa de Paula

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, 30 de abril de 2013.

A busca por fontes alternativas de energia cresce cada vez mais no cenário mundial. O conceito de converter energia mecânica em energia elétrica a partir do uso de materiais piezelétricos tem sido estudado por diversos pesquisadores. Estes materiais, quando submetidos a carregamentos mecânicos externos, produzem uma distribuição de cargas elétricas em suas superfícies (efeito piezelétrico direto). Por outro lado, quando são sujeitos a campos elétricos externos, exibem variações em sua forma e dimensões (efeito piezelétrico inverso). Para geração de energia elétrica, basicamente, o material piezelétrico é acoplado à estrutura vibrante e, enquanto a estrutura vibra, o material é deformado, gerando energia elétrica. Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma investigação experimental da capacidade de coleta de energia de uma viga piezelétrica de MFC excitada mecanicamente. Esse dispositivo é conceituado como “*Power harvesting*”. O objetivo desta dissertação é investigar o sistema quando submetido a oscilações harmônicas de base em uma faixa de frequência que engloba a primeira frequência de ressonância. Diferentes situações são consideradas com a variação da amplitude e da frequência de excitação da base e das cargas resistivas e reativas que compõem o circuito elétrico que está acoplado à viga. Para cada caso analisado, a tensão elétrica e a potência elétrica geradas, a potência mecânica fornecida e eficiência do dispositivo são avaliadas. Os resultados são discutidos com o propósito de definir o circuito mais apropriado.

ABSTRACT

EXPERIMENTAL RESEARCH OF ELECTRICITY GENERATION IN A BEAM PIEZOELECTRIC MECHANICALLY EXCITED.

Author: Wesley Oliveira Viana Barbosa

Supervisor: Aline Souza de Paua

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília, April 30, 2013.

The search for alternative energy sources grows increasingly on the world stage. The concept of converting mechanical energy into electrical energy through the use of piezoelectric materials has been studied by several researchers. These materials, when subjected to external mechanical loads produce a distribution of electrical charges on their surfaces (direct piezoelectric effect). Moreover, when subjected to external electric fields, exhibit variation in its shape and dimensions (inverse piezoelectric effect). For electricity generation, basically the piezoelectric material is attached to the vibrating structure, and while the structure vibrates, the material is deformed, generating electricity. This dissertation presents an experimental investigation of the energy harvesting capacity of a MFC piezoelectric beam mechanically excited. This device is known as a "Power harversting". The aim is to investigate the system when subjected to harmonic base oscillations in a frequency that includes first resonance frequency occurs. Different situations are considered, by varying the base amplitude and resistive and reactive loads that compose an electrical circuit that is coupled to the beam. For each analyzed case, the generated voltage and electrical power, the supplied mechanical power and efficiency of the device are evaluated. The results are discussed in order to further define the circuit more suitable.

LISTAS DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS OBTIDOS NA RESSONÂNCIA COM A VARIAÇÃO DA AMPLITUDE.	45
TABELA 2 - RESULTADOS OBTIDOS NA RESSONÂNCIA PARA AS TRÊS RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES OBSERVADAS.	49
TABELA 3 - RESULTADOS OBTIDOS NA RESSONÂNCIA PARA AS TRÊS CAPACITÂNCIAS UTILIZADAS.	52
TABELA 4 - RESULTADOS OBTIDOS PARA AS TRÊS INDUTÂNCIAS OBSERVADAS.	55
TABELA 5 - CARGAS UTILIZADAS NOS DIFERENTES CIRCUITOS.	55
TABELA 6 - RESULTADOS PARA OS CIRCUITOS R, RL, RC E RLC A E B.	61

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- REPRESENTAÇÃO DOS DOMÍNIOS FÍSICOS, SUAS RESPECTIVAS VARIÁVEIS DE ESTADO E TRÊS TIPOS DE MATERIAIS INTELIGENTES (LEO, 2007– COM ADAPTAÇÕES)....	2
FIGURA 2 – ESQUERDA: EFEITO PIEZELÉTRICO DIRETO; DIREITA: EFEITO PIEZELÉTRICO INVERSO. (YANG, 2005 – COM ADAPTAÇÕES).....	17
FIGURA 3- ESTRUTURA PEROVSKITA DAS CERÂMICAS PIEZELÉTRICAS TIPO PZT: 1) ABAIXO DA TEMPERATURA CURIE. 2) ACIMA DA TEMPERATURA CURIE (PEREIRA, 2010).....	19
FIGURA 4 – DIPOLOS ELÉTRICOS QUE LEVAM AO ACOPLAMENTO ELETROMECHANICO DOS MATERIAIS PIEZELÉTRICOS (LEO, 2007 – COM ADAPTAÇÕES).....	20
FIGURA 5 - PROCESSO DE POLARIZAÇÃO ASSOCIADO AOS MATERIAIS PIEZELÉTRICOS. (LEO, 2007 - COM ADAPTAÇÕES).....	21
FIGURA 6 - COLETOR DE ENERGIA PIEZELÉTRICO. (A) VIGA, (B) SISTEMA EQUIVALENTE MASSA-MOLA AMORTECIDO COM O CIRCUITO ELÉTRICO ACOPLADO. (PRIYA E INMAN, 2008; TRIPLETT E QUINN, 2009 - COM ADAPTAÇÕES).	24
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO REALIZADO.....	28
FIGURA 8 - VIGA DE MFC E SUPORTE METÁLICO.....	28
FIGURA 9 - <i>SHAKER</i> MODELO ET127 DA <i>LABWORKS</i> , ACELERÔMETRO 352C34 E VIGA PIEZELÉTRICA FIXADA ATRAVÉS SUPORTE METÁLICO.....	29
FIGURA 10 - CONTROLADORA <i>SIGNALSTAR SCALAR ABACUS LITE</i> DA <i>DATA PHISICS</i>	29
FIGURA 11 - CÉLULA DE CARGA, ACELERÔMETROS E SUPORTE METÁLICO UTILIZADOS NA FIXAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DA VIGA.....	30
FIGURA 12 - CHASSI E MÓDULOS DA NI.	31
FIGURA 13 - PAINEL FRONTAL E DIAGRAMA DE BLOCOS DESENVOLVIDOS NO LABVIEW 2009.	31
FIGURA 14 - SISTEMA EXPERIMENTAL COMPLETO.	32
FIGURA 15 - CIRCUITO DIVISOR DE TENSÃO.....	34
FIGURA 16 - CIRCUITO DIVISOR DE TENSÃO.....	35
FIGURA 17 - TENSÃO VERSUS TEMPO, PARA 17,3 HZ E 1,0 MM DE AMPLITUDE PICO A PICO. OS PONTOS AZUIS E PRETOS REPRESENTAM, RESPECTIVAMENTE, PICOS MÁXIMOS E MÍNIMOS.	36
FIGURA 18 - AJUSTE LINEAR DOS VALORES DE PICO MÁXIMOS E MÍNIMOS PELO MMQ. AS RETAS AZUIS REPRESENTAM A APROXIMAÇÃO LINEAR.	37

FIGURA 19 - FORÇA E VELOCIDADE NO TEMPO PARA A FREQUÊNCIA DE 17,3 HZ E AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO DA BASE PICO A PICO DE 1,0 MM.	38
FIGURA 20 - SINAL DA FORÇA E VELOCIDADE COMO ONDA QUADRADA.....	39
FIGURA 21 - CÁLCULO DA DIFERENÇA DE TEMPO T	39
FIGURA 22 - CIRCUITO ELÉTRICO USADO NOS TESTES. R – RESISTOR, C – CAPACITOR, L – INDUTOR.....	41
FIGURA 23 - TENSÃO VERSUS A FREQUÊNCIA.....	42
FIGURA 24 – MÓDULO DO ÂNGULO DE FASE VERSUS A FREQUÊNCIA PARA AMPLITUDE DE 0,5 MM.	42
FIGURA 25 - TENSÃO ELÉTRICA GERADA VARIANDO-SE FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO.....	43
FIGURA 26 - POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA VARIANDO-SE FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO.....	44
FIGURA 27 - POTÊNCIA MECÂNICA FORNECIDA VARIANDO-SE FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO.....	44
FIGURA 28 - EFICIÊNCIA DO DISPOSITIVO VARIANDO-SE FREQUÊNCIA E AMPLITUDE DE EXCITAÇÃO.....	45
FIGURA 29 - POTÊNCIA MECÂNICA PARA AMPLITUDE DE OSCILAÇÃO DE BASE DE 1.0 MM. ...	46
FIGURA 30 - TENSÃO ELÉTRICA GERADA PARA AS RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES DE 2,22 k Ω , 4,66 k Ω E 8,22 k Ω	47
FIGURA 31 - POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA PARA AS RESISTÊNCIAS EQUIVALENTES DE 2,22 k Ω , 4,66 k Ω E 8,22 k Ω	48
FIGURA 32- EFICIÊNCIA VERSUS A FREQUÊNCIA PARA CADA RESISTOR INSERIDO NO CIRCUITO.....	48
FIGURA 33 - CAPACITOR ELETROLÍTICO DE 4,7 μ F, UTILIZADO NOS TESTES.....	49
FIGURA 34 - TENSÃO ELÉTRICA GERADA PELA VIGA PARA OS DIFERENTES CAPACITORES. ...	50
FIGURA 35 - POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA PELA VIGA PARA OS DIFERENTES CAPACITORES. ...	50
FIGURA 36 - EFICIÊNCIA PARA DIFERENTES CAPACITORES INSERIDOS NO CIRCUITO.	51
FIGURA 37 - INDUTOR DE 346 MH.	53
FIGURA 38 - TENSÃO ELÉTRICA GERADA PELA VIGA PARA OS DIFERENTES INDUTORES.	53
FIGURA 39 - POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA PELA VIGA PARA OS DIFERENTES INDUTORES.	54
FIGURA 40 - EFICIÊNCIA PARA OS DIFERENTES INDUTORES.	54
FIGURA 41 - ÂNGULO DE FASE ENTRE A TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA APENAS COM RESISTOR.....	56

FIGURA 42 - ÂNGULO DE FASE ENTRE A TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA NO CIRCUITO RC...	57
FIGURA 43 - ÂNGULO DE FASE ENTRE A TENSÃO E CORRENTE ELÉTRICA NO CIRCUITO RL...	57
FIGURA 44 - FASE ENTRE A TENSÃO ELÉTRICA E A CORRENTE PARA O CIRCUITO RLC-A COM O INDUTOR DE 150 MH.	58
FIGURA 45 - FASE ENTRE A TENSÃO ELÉTRICA E A CORRENTE PARA O CIRCUITO RLC-B COM O INDUTOR DE 346MH.	58
FIGURA 46 - TENSÃO ELÉTRICA VERSUS A FREQUÊNCIA PARA OS CIRCUITOS R, RC, RL, RLC- A E RLC-B.	59
FIGURA 47 - POTÊNCIA ELÉTRICA VERSUS A FREQUÊNCIA PARA OS CIRCUITOS R, RC, RL, RLC-A E RCL-B.	59
FIGURA 48 - EFICIÊNCIA VERSUS A FREQUÊNCIA PARA OS CIRCUITOS R, RC, RL, RLC-A E RCL-B.	60
FIGURA 49 - ÂNGULO DE FASE ENTRE A TENSÃO E A CORRENTE ELÉTRICA PARA OS CIRCUITOS ACOPLADOS À VIGA.	60

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

MEMS	<i>Microelectromechanical Systems – Sistemas Microeletromecânicos</i>
MFC	<i>Micro Fiber Composite</i>
PZT	<i>Lead Zirconate Titanate – Titanato Zirconato de Chumbo</i>
PVDF	<i>Polyvinilidene Fluoride – Fluoreto Polivilideno</i>
CA	Corrente Alternada
DC	Corrente Contínua
RL	Circuito-Resistivo-Indutivo
RC	Circuito-Resistivo-Capacitivo
RLC	Circuito-Resistivo-Indutivo-Capacitivo
SSHI	<i>Synchronized Switch Harvesting on Inductor – Coletor Sincronizado com Chaveamento Indutivo</i>
SSHC	<i>Synchronized Switch Harvesting on Capacitor – Coletor Sincronizado com Chaveamento Capacitivo</i>
MOSFET	<i>Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor – Transistor Metal – Óxido – Semicondutor de Efeito de Campo</i>
SECE	<i>Synchronous Electric Charge Extraction – Extração Síncrona de Carga Elétrica</i>
d	Constantes piezelétricas que estabelecem a proporcionalidade entre a geração de cargas e as tensões mecânicas aplicadas
ε	Constantes dielétricas do material piezelétrico
s	Constantes elásticas que relacionam a proporcionalidade entre a deformação e a tensão aplicada

g	Razão entre as constantes d e ε
θ	Coefficiente de acoplamento eletromecânico do material piezolétrico
m	Massa concentrada
k	Rigidez elástica
b	Amortecimento viscoso linear.
C	Capacitância piezolétrica
$u(t)$	Deslocamento da base
$y(t)$	Deslocamento relativo da massa
Z	Impedância do circuito elétrico acoplado
F_e	Força proveniente do efeito piezolétrico
F_k	Força elástica
F_b	Força de amortecimento viscoso
\ddot{u}	Aceleração da base
\ddot{y}	Aceleração da massa
Q	Carga elétrica gerada na viga piezeletrica
\dot{y}	Velocidade da massa
V	Tensão elétrica gerada
\dot{Q} e i	Corrente elétrica
τ	Tempo adimensional
P	Potência elétrica gerada
\emptyset	Ângulo de fase entre a tensão e corrente elétrica

L	Indutância
X_C	Reatância capacitiva
X_L	Reatância indutiva
ρ	Módulo da impedância elétrica
θ	Ângulo de fase entre a força e velocidade
T	Diferença de tempo usado no cálculo dos ângulos de fase
f	Frequência do forçamento
π	Constante matemática pi.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	MOTIVAÇÃO	3
1.2.	OBJETIVOS	5
1.3.	METODOLOGIA.....	5
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.	MATERIAIS PIEZELÉTRICOS	17
4.	COLETORES DE ENERGIA PIEZELÉTRICOS (POWER HARVESTING)....	24
5.	APARATO	
	EXPERIMENTAL DO SISTEMA ESTUDADO	28
6.	METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS.....	33
6.1.	DIVISOR DE TENSÃO	33
6.2.	MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MMQ).....	36
6.3.	ÂNGULO DE FASE.....	38
7.	RESULTADOS	41
8.	CONCLUSÕES.....	63
8.1.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
	APÊNDICES	73

1. INTRODUÇÃO

Na natureza pode-se observar a existência de domínios físicos. Estes domínios físicos são quaisquer quantidades físicas que podem ser definidas por um conjunto de duas variáveis de estado (LEO, 2007). O domínio mecânico, por exemplo, pode ser caracterizado pelas variáveis de estado tensão e deformação; enquanto o domínio elétrico pode ser definido pelas variáveis campo elétrico e deslocamento elétrico. As variáveis de estado de um sistema são um conjunto de variáveis que descrevem esse estado ou domínio. Quando a alteração de uma variável de estado de um domínio físico provoca a mudança de uma variável de estado de outro domínio, tem-se o acoplamento. A denominação do acoplamento combina o nome dos respectivos domínios físicos (eletromecânico, termelétrico, termomecânico, etc).

Os materiais inteligentes são aqueles que apresentam acoplamento, pelo menos, entre dois domínios físicos e fazem a conversão de energia entre dois destes domínios (LEO, 2007). Alguns convertem estímulos elétricos em variação de volume, outros transformam deformações mecânicas em impulsos elétricos. Existem aqueles que convertem energia térmica em esforço mecânico ou em energia elétrica. Existem também materiais que transformam esforço mecânico ou variação de temperatura em deslocamento de espécies químicas. A Figura 1 apresenta os domínios físicos, suas respectivas variáveis de estado e três exemplos de materiais inteligentes (LEO, 2007).

Os materiais piezelétricos são aqueles que apresentam acoplamento entre os domínios mecânico e elétrico, ou seja, convertem a energia mecânica em energia elétrica ou vice-versa. No primeiro caso, os carregamentos mecânicos externos produzem uma distribuição de cargas elétricas em suas superfícies e o material piezelétrico opera como um sensor (efeito piezelétrico direto), por exemplo, monitoramento da integridade física de estruturas. Por outro lado, quando são sujeitos a campos elétricos externos, exibem variações em sua forma e dimensões, neste caso o material opera como atuador (efeito piezelétrico inverso), por exemplo, controle e amortecimento de vibrações (FLATAU e CHONG, 2002; JEON et al, 2005).

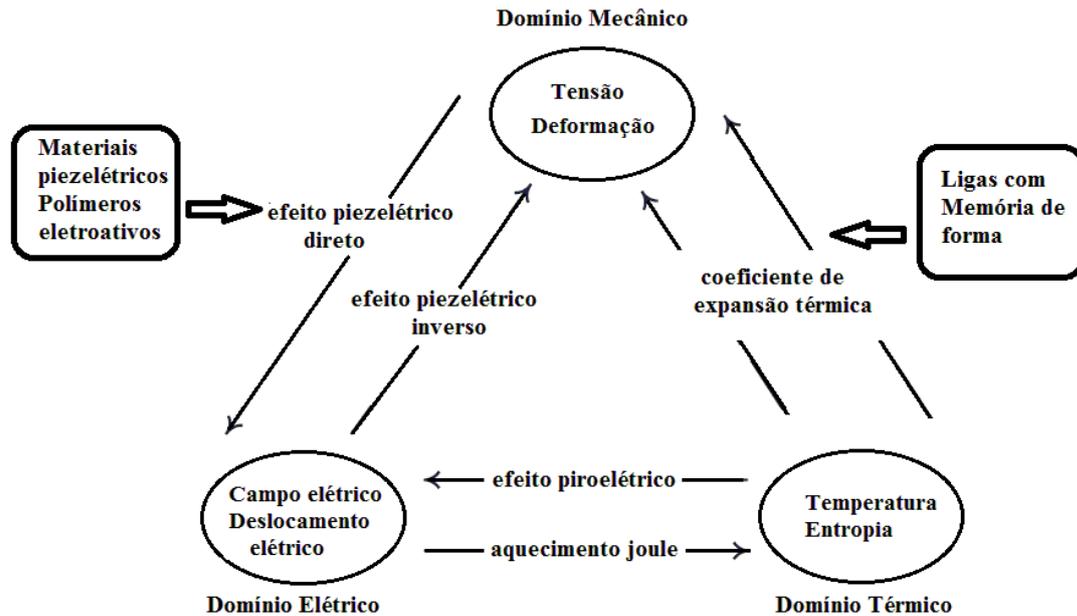


Figura 1- Representação dos domínios físicos, suas respectivas variáveis de estado e três tipos de materiais inteligentes (LEO, 2007– com adaptações).

Nas últimas décadas, a atenção das pesquisas sobre os materiais piezelétricos tem-se voltado para o uso destes na coleta de energia mecânica (livre no ambiente na forma de vibrações) e na conversão desta em energia elétrica. Esses dispositivos são chamados de coletores de energia ou “*Power Harvesting*” (ANTON e SODANO, 2007).

Devido ao efeito piezelétrico direto, os materiais piezelétricos são capazes de fornecer tensões elétricas de saída quando submetidos a vibrações mecânicas, como consequência da deformação do material. Essas tensões elétricas podem ser usadas para alimentar circuitos elétricos que necessitam de baixas tensões de alimentação, como sensores de monitoramento sem fio, circuitos eletrônicos e sistemas microeletromecânicos (MEMS) (HEHN et al., 2009; JEON et al., 2005; GALHARDI et al., 2008).

A aplicação de coletores de energia vibracional é bastante relevante no cenário atual, que busca explorar novas fontes alternativas de energia limpa e renovável sem agredir o meio ambiente. Além disso, com a evolução dos sistemas de sensoriamento e demais tecnologias MEMS, torna-se interessante que tais dispositivos sejam autoalimentados, pois, em certas situações, a substituição das baterias eletroquímicas usadas convencionalmente em sensores e rastreadores torna-se inviável. Dessa forma, o

uso de coletores de energia seria uma alternativa na criação de dispositivos autoalimentados (GALHARDI et al., 2008; HARB, 2011).

1.1. MOTIVAÇÃO

Uma questão que é exaustivamente discutida desde o fim do século XX está associada à questão energética. O crescente consumo energético, somado às questões ambientais e a constante ameaça do esgotamento dos combustíveis fósseis tem motivado vários pesquisadores a desenvolver técnicas para obtenção de fontes de energia renováveis e limpas (POIZOT E DOLHEM, 2011; GKOUMAS et al., 2012). Fontes de energia como a solar, eólica, de fluxos de fluidos, gravitacional e de gradientes térmicos passaram a ser exploradas de várias maneiras (PANWAR et al., 2011).

Além dessas fontes já conhecidas e divulgadas pelos veículos de comunicação, outra tem ganhado atenção considerável em decorrência do desenvolvimento e evolução da tecnologia microeletromecânica – MEMS, e o seu crescente uso no sensoriamento remoto, por meio de sensores sem fio (LIU et al., 2008): a energia presente no ambiente em forma de vibrações mecânicas (RENNO et al., 2009; VULLERS et al., 2009).

Essa tecnologia MEMS tem ganhado espaço por causa das suas vantagens, tais como: tamanho pequeno e miniaturização, flexibilidade de uso, livre de custos de cabeamento, baixo consumo de energia, baixo tempo de resposta, alta precisão e confiabilidade. No entanto, o uso de baterias convencionais na alimentação de dispositivos MEMS tem sido um limitador nas aplicações dessa tecnologia (BEEBY et al., 2006; TRÄNKLER e KANOUN, 2001; SHEN, 2009).

Sensores sem fio, processadores de sinal de baixa potência e demais dispositivos baseados na tecnologia MEMS precisam ser autoalimentados, tendo sua própria fonte de alimentação. Essa necessidade deve-se ao fato de que, em algumas situações, o processo de substituição de baterias torna-se inviável. Como exemplos, tem-se o uso de sensores biomédicos implantados no corpo humano, sensores de monitoramento estrutural embutidos em concreto para coleta de dados da integridade estrutural, sensores usados no monitoramento de animais silvestres e de GPS. A recuperação dessas baterias para reposição torna-se mais cara quando se leva em consideração o tempo de carga limitado (limitada vida útil) das baterias convencionais, pois os processos de substituição

ocorreriam com maior frequência (GALHARDI et al., 2008; HOWELLS, 2009; SODANO et al., 2004; ROUNDY et al., 2005; DO et al., 2011).

Portanto, o uso de dispositivos MEMS (sensores *wireless*) autoalimentados permitiria a remoção das baterias usuais, que apresentam problemas de manutenção e reciclagem. Dessa forma, haveria redução nos custos na implantação dos dispositivos de baixa potência com a diminuição do uso de fios de conexão e redução nos gastos com a substituição de baterias. Como a energia das vibrações é limpa, também haveria vantagens ambientais, tendo em vista a redução ou eliminação do descarte das baterias convencionais descarregadas (GALHARDI et al., 2008; HARB, 2011; ROUNDY et al., 2005; SHEN, 2009; RAMADASS e CHANDRAKASAN, 2010; BEEBY et al., 2006; TRÄNKLER e KANOUN, 2001).

A energia das vibrações mecânicas, presentes no meio ambiente, pode ser aproveitada com o uso de coletores de energia (“*Power Harvesting*”). Esses coletores funcionariam como baterias autoalimentadas, substituindo as baterias convencionais na alimentação dos dispositivos de baixa potência. Os coletores de energia de vibrações mecânicas podem conter elementos eletromagnéticos ou incorporar elementos piezelétricos (CHOU et al., 2011; RAMADASS e CHANDRAKASAN, 2010).

Diversos dispositivos coletores de energia com elementos piezelétricos incorporados são modelados como um sistema massa-mola que operam em ressonância (FERRARI et al., 2009). Tradicionalmente, são vigas com elementos piezelétricos que possuem uma extremidade livre e a outra extremidade fixada à fonte de vibração. Essas vigas são capazes de coletar vibrações mecânicas, de baixa frequência, livres no ambiente (fontes de energia mecânica) e convertê-las primariamente, mas não exclusivamente, em energia elétrica.

Embora o processo de transdução seja muitas vezes bastante ineficiente, ainda sim é possível gerar energia elétrica suficiente para pequenas aplicações. Vários autores têm estimado o consumo de energia em nós de sensoriamento. Geralmente o consumo varia entre 1,0 e 20,0 μW . Todavia, o consumo depende fortemente das características e complexidade das transmissões (VULLERS et al., 2009).

Segundo testes efetuados, fontes de vibração apresentam densidade de energia gerada de aproximadamente 375,0 $\mu\text{W}/1,0 \text{ cm}^3$ para uma vibração inicial de 2,5 m/s^2 a

120,0 Hz. Com alguns modelos de coletores de energia desenvolvidos, pesquisadores conseguiram fornecer 120 μW a um transmissor de rádio de 1,9 GHz. Com outro modelo, conseguiram alimentar um transmissor de leitura de temperatura com uma potência média de 400 a 600 μW (ROUNDY et al., 2005).

Essa geração pode ser aumentada caso a frequência da fonte esteja próxima ou igual à frequência de ressonância do dispositivo coletor de energia. Conforme a configuração do sistema e o adequado armazenamento, pode-se fornecer a quantidade de energia necessária para suprir a demanda energética de dispositivos de baixa potência.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é investigar a capacidade de conversão de energia mecânica em energia elétrica em uma viga piezolétrica de MFC excitada mecanicamente para diferentes condições de forçamento.

Além disso, investiga-se a influência de circuitos elétricos na eficiência do sistema. Para isso, serão avaliados os efeitos produzidos por cargas resistivas, indutivas e capacitivas quando inseridas no circuito elétrico que está acoplado em série ao dispositivo coletor de energia.

1.3. METODOLOGIA

Este trabalho é baseado na análise experimental da resposta dinâmica de uma viga piezolétrica de MFC livre em uma extremidade e sujeita a uma excitação de base na outra, acoplada a diferentes circuitos elétricos. A excitação mecânica é fornecida por um *shaker*. Além disso, o forçamento é realizado em uma faixa de frequências que engloba a primeira frequência de ressonância. Três amplitudes de oscilação, pico a pico, da base são consideradas: 0,5 mm, 0,75 mm e 1,0 mm.

Diferentes circuitos de teste, montados em uma *protoboard*, são avaliados buscando-se observar a influência de cargas resistivas, capacitivas e indutivas.

Para cada situação de forçamento e circuito de teste analisa-se a capacidade da viga na coleta de energia a partir da avaliação das seguintes quantidades: a tensão elétrica e a potência elétrica geradas, a potência mecânica fornecida e a eficiência do dispositivo.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 8 capítulos. Neste primeiro capítulo uma introdução é apresentada, incluindo objetivos, motivação e metodologia. No segundo, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto e o presente trabalho é situado na literatura. No terceiro e quarto capítulo descreve-se brevemente os materiais piezelétricos e os dispositivos coletores de energia - *Power Harvesting*. Os capítulos cinco e seis apresentam, respectivamente, o aparato experimental do sistema estudado e a metodologia de processamento de dados aplicada nessa investigação. O capítulo sete apresenta os resultados obtidos nos ensaios. No oitavo e último capítulo são apresentadas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A descoberta do efeito piezelétrico foi anunciada em 02 de agosto de 1880 à Academia de Ciência da França pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, quando estudavam as relações entre os efeitos da piroeletricidade e a piezeletricidade em cristais (KATZIR, 2006). Baseados nesses estudos, diversos instrumentos experimentais, usados em laboratório, foram desenvolvidos. No entanto, o fenômeno só foi utilizado fora de laboratório 35 anos após sua descoberta, durante a primeira guerra mundial, na busca de um dispositivo capaz de detectar submarinos alemães. O sonar, produto dessa pesquisa, foi colocado em uso apenas após o fim da primeira guerra (KATZIR, 2003).

No ano de 1949, a United States Patent Office dos EUA registrou a patente 2.478.223 (ARGABRITE, 1949). Nesse registro, um transdutor constituído por cristais piezelétricos foi proposto para converter variações mecânicas oscilatórias em tensão elétrica. Nessa mesma patente o inventor também propôs o uso do efeito piezelétrico inverso, o qual ocorre quando uma tensão elétrica é aplicada sobre o cristal, o que resulta na deformação do material.

Em 1967, o organismo de registro de patentes dos EUA registrou a patente 3.456.134 (HO, 1969), que descrevia uma invenção baseada em um conversor piezelétrico para implantes eletrônicos no corpo humano. Sugeriu-se uma viga com material piezelétrico - um cristal de PZT-5H - no interior de um invólucro de vidro, plástico ou metal, resistente à corrosão provocada pelos fluidos do corpo humano. Com o movimento do corpo, a base desse envoltório movia-se e, conseqüentemente, colocava-se a viga, no interior desse invólucro, em oscilação. Alguns testes realizados em cães mostraram que, para uma frequência cardíaca de 80 batimentos por minuto, a tensão e a potência gerada eram iguais a 4,0 V e 160 μ W respectivamente, para uma resistência de carga de 105 Ω . A quantidade de energia era suficiente para operar um marca-passo.

No entanto, as pesquisas que aplicavam materiais piezelétricos ganharam mais atenção após 1990, mais precisamente nos últimos 20 anos, devido à possibilidade do esgotamento das fontes de energia modernas não renováveis, como os combustíveis fósseis, degradação ambiental e avanço da tecnologia dos dispositivos de sensoriamento

eletrônicos de baixa potência e da tecnologia microeletromecânica – MEMS (POIZOT E DOLHEM 2011; LIU et al., 2008; GKOUMAS et al., 2012).

Associado às vantagens de miniaturização dos dispositivos eletrônicos MEMS, aos avanços da tecnologia microeletromecânica e ao uso dela em dispositivos de sensoriamento sem fio, os materiais piezelétricos ganharam destaque como potencial fonte de alimentação. Sensores sem fio exigem baterias de longa duração ou autoalimentação conforme a utilização. Logo, materiais piezelétricos funcionariam como transdutores, que coletariam a energia das vibrações mecânicas livres no ambiente e a transformariam em energia elétrica. Recentes pesquisas apontam a necessidade de poucos μW na alimentação de dispositivos de baixa potência (JEON, 2005). Esses transdutores recebem o nome de *Power Harvesting* ou *Energy Scavenging*.

Diversos dispositivos coletores de energia com elementos piezelétricos incorporados são modelados como um sistema massa-mola que operam em ressonância (FERRARI et al., 2009; TRIPLETT E QUINN, 2009; COTTONE et al., 2012, MINAZARA et al., 2008; YE et al., 2009). Tradicionalmente, são vigas com elementos piezelétricos que possuem uma extremidade livre e a outra extremidade fixada à fonte de vibração. Essas vigas são capazes de coletar vibrações mecânicas, de baixa frequência, livres no ambiente (fontes de energia mecânica) e convertê-las primariamente, mas não exclusivamente, em energia elétrica.

A seguir são listados diversos trabalhos que avaliam o desempenho de vigas piezelétricas como coletores de energia, assim como algumas aplicações para esses coletores.

SODANO et al. (2004) testaram uma viga piezelétrica da *Midè Technology*, QP 40N. Um atuador bimorfo piezelétrico constituído por quatro camadas de PZT fixados em uma viga de kapton e epóxi com as dimensões iguais a 100,6 x 25,4 x 0,762 mm. Nesse trabalho, a corrente elétrica de saída gerada pela viga, para as frequências de excitação de 25 Hz e 50 Hz e resistências de carga de 100 Ω , 10k Ω e 100k Ω foi avaliada em 0,104 mA/0,20 mA, 0,106 mA/0,180 mA e 0,032 mA/0,032 mA. Em outra ocasião, SODANO et al. (2004) experimentaram uma viga de alumínio com um elemento piezelétrico de MFC (*macro fiber composite*) com dimensões de 555 x 50 x 0,5 mm. Todavia, investigaram apenas a capacidade de sensoriamento desse elemento.

RICART et al. (2010) testaram uma viga simples, presa em uma extremidade e livre na outra; constituída de Nitreto de Alumínio – piezelétrico AIN, depositados em um substrato de silício. Para frequência de ressonância de 143 Hz e amplitude de aceleração de 0,3g, a tensão gerada chegou a 6,0 V.

Semelhante aos trabalhos de SODANO et al. (2004) e RICART et al. (2010), KANNO et al. (2010) fabricaram um coletor de energia com um fino filme de PZT, unimorfo, depositado em uma viga flexível de titânio de 20 mm de comprimento, 3 mm de largura e 100 μm de espessura. Para 5,0 m/s^2 de amplitude de aceleração, a tensão medida para uma resistência de carga de 1,0 $\text{M}\Omega$ atingiu o valor de 95 mV. Ao variar a aceleração da fonte de vibração (um *shaker*) para 50 m/s^2 eles obtiveram tensões próximas de 1,1 V e 17 μW de potência.

ROUNDY et al. (2005) mostraram que as fontes de vibração apresentam densidade energética de aproximadamente 375 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$, ou seja, um protótipo coletor de energia formado por uma viga com elemento piezelétrico, para uma fonte de vibração inicial com 2,5 m/s^2 a 120 Hz poderia gerar até 375 μW . Com base nesse modelo, conseguiram alimentar um transmissor de rádio de 1.9 GHz com um consumo de 120 μW . Com um modelo maior, conseguiram fornecer energia para um sensor de temperatura na média de 400 a 600 μW .

ERTURK (2011) propôs o uso de coletores de energia piezelétricos para coletarem a energia das vibrações mecânicas em uma ponte e convertê-las em energia elétrica. A tensão obtida seria usada na alimentação de sensores que monitoravam a integridade estrutural dessa ponte. Ele considerou um adesivo constituído por uma placa quadrada do PZT – 5H, com dimensões de 30 X 30 X 0,2 mm e capacitância de 43 ηF . Os forçamentos, provenientes das oscilações, variavam entre 50 e 80 microstrain e entre -40 e -10 microstrain. Para uma resistência de carga de 369,7 $\text{k}\Omega$ e frequência igual a 10 Hz, a potência máxima obtida foi de 0,745 mW (resultante de 80 e -10 microstrain) e a potência mínima de 15,2 μW (resultante de 50 e -40 microstrain). A potência de pico foi de 0,951 mW para um forçamento resultante de 50 microstrain e frequência de 25 Hz.

GKOUMAS et al. (2012) avaliaram um dispositivo coletor de energia piezelétrico de média escala, que coletava as vibrações induzidas pelo vento em um *outdoor* de propagandas fabricado com PVC, com 25 m^2 de área. O material piezelétrico escolhido foi o PZT. Ele tinha a forma de um paralelepípedo de 0,3 x 0,3 x 0,2 m fixados nas pernas

desse *outdoor*. Com o fluxo do vento uma deformação era provocada nos cubos e conseqüentemente a tensão elétrica era gerada. A energia mecânica das vibrações era convertida em eletricidade e alimentava a iluminação do *outdoor*. Dessa forma, dispensavam-se os fios de instalação elétrica. A análise foi feita no domínio da frequência, para as frequências fundamentais de 1,06 Hz, 4,91 Hz e 17,94 Hz. A energia gerada nos cubos piezelétricos presos verticalmente às pernas do painel foi igual a 0,2 kWh e, naqueles que estavam presos na diagonal, de 0,1 kWh, em 90 dias de armazenamento.

ANDOSCA et al. (2012) testaram três tipos de dispositivos coletores de energia, constituídos por vigas de mesma largura, igual a 7,8 mm, e comprimentos úteis de 6,0 mm, 5,0 mm e 4,0 mm, envoltos por uma caixa de proteção que permitia a viga oscilar livremente por milímetros. Uma massa de 28,9 mg foi presa à extremidade livre. O elemento piezelétrico escolhido foi o PZT. As frequências naturais de ressonâncias medidas foram de 58 Hz, 75 Hz e 105 Hz. Um resistor variável foi conectado ao dispositivo para medir a melhor potência de saída. As tensões e potências de saída encontradas foram iguais a: 1,7/32, 2,3/63, 3,2/128 V/ μ W, para as acelerações de 0,5g, 0,7g e 1,0g, respectivamente. Em seguida, um sensor de temperatura sem fio - ez430-RF2500 – foi testado com sucesso, após ser conectado ao dispositivo coletor de energia cuja frequência de ressonância era de 58 Hz, o qual foi excitado por um *shaker* com aceleração de 0,7g. A tensão alternada fornecida para esse sensor sem fio foi de 2,3 V e a frequência foi de aproximadamente 60 Hz.

MURALT et al. (2009) estudaram um dispositivo formado por uma viga constituída por um filme de PZT de 5,0 μ m e com uma camada de 1,0 μ m de óxido de silício para compensação do estresse. A parte ativa da viga possuía 1,2 mm x 800 μ m. O restante da viga foi usado como massa sísmica. Foram efetuadas medições para valores de baixa e alta resistência. Para a resistência mais baixa, observou-se o pico de tensão na frequência de ressonância de 855 Hz. No maior valor de resistência, o pico de tensão foi observado fora da ressonância. Os 0,5 V necessários para a retificação dessa tensão, de contínua para alternada, foram obtidos com uma aceleração de 0,4 g. O dispositivo operou com uma aceleração de 1,5 g. Ao normalizar o valor da potência gerada, em termos da aceleração e da área, obtiveram 220 μ W/g/cm². Essa potência foi suficiente para alimentar um nó de sensoriamento sem fio.

MINAZARA et al. (2008) propuseram um gerador piezelétrico capaz de fornecer energia elétrica para lâmpadas de *led*, *displays* ou sensores, convertendo a energia mecânica em energia elétrica a bordo de bicicletas, como nova alternativa em relação aos usuais dínamos. No estudo, por meio de quatro acelerômetros, os autores determinaram a melhor faixa de frequência para a operação do sistema e o melhor lugar para fixação do dispositivo piezelétrico coletor de energia. Dessa forma, verificou-se que as vibrações máximas ocorriam no guidão e no garfo da bicicleta e que a banda de frequência para a melhor coleta de energia mecânica (80% da energia das vibrações) estava concentrada entre 10 a 30 Hz.

No guidão foi instalado um coletor de energia piezelétrico. Ele era constituído por uma viga de metal flexível com um elemento piezelétrico do tipo MFC (*Micro fiber composite*). A escolha foi motivada pela flexibilidade e resistência do MFC aos sucessivos ciclos de operação. Uma massa de prova de 5,32 g foi adicionada à extremidade livre da viga, para ajustar a sua frequência natural em 12,5 Hz e aumentar a deformação do elemento piezelétrico. Foram simuladas vibrações puramente sinusoidais para 12,5 Hz com amplitudes de aceleração de 0,5g com um *shaker*. A potência máxima gerada por esse dispositivo coletor de energia foi de 3,5 mW para uma resistência de carga de 100 k Ω . Essa potência foi suficiente para alimentar uma lâmpada de *led*.

SHENCK e PARADISO (2001) desenvolveram coletores de energia instalados em calçados. Eles exploraram a energia mecânica desperdiçada entre o calcanhar e as palmilhas dos tênis durante as caminhadas. Foram testados dois dispositivos. O primeiro consistia em duas pilhas de oito camadas de 28 microns do filme piezelétrico PVDF impressado em 2,0 mm de um substrato plástico flexível, colados com epoxy, com formato hexagonal e capacitância de 330 η F. O segundo dispositivo foi constituído por um transdutor de 5,0 x 5,0 cm, com uma tira 0,015 polegadas de PZT ligada a uma mola pré-esforçada em uma placa de 5,0 x 8,5 cm e capacitância de 140 η F.

O gerador piezelétrico de PVDF foi instalado em uma palmilha de um tênis Nike e o gerador bimorfo de PZT em uma palmilha ortopédica. A potência elétrica medida para a palmilha com PVDF foi de 1,3 mW para uma carga resistiva de 250 k Ω e ritmo da caminhada na frequência 0,9 Hz. No entanto, para o dispositivo de PZT a potência gerada foi de 8,4 mW, para o mesmo ritmo de caminhada e carga de 500 k Ω . As eficiências

avaliadas para o gerador de PVDF e para o gerador de PZT foram de 5% e 20% respectivamente.

ROCHA et al. (2010) verificaram que a tensão gerada em um coletor de energia piezelétrico é influenciada pela área do dispositivo, pelo posicionamento, geometria e número de camadas do material piezelétrico. Um dispositivo foi instalado no interior da sola de um sapato. O aparato era formado por uma fina camada do filme piezelétrico PVDF de 28 μm entre dois eletrodos condutores, de prata e alumínio. Para maximizar a energia transferida para uma carga, ou para uma bateria, foi usado um circuito retificador de onda completa com um gerador eletrostático em paralelo. A energia gerada pela folha de PVDF dentro dos sapatos variou de dezenas a centenas de miliwatts durante uma simples caminhada.

HOWELLS (2009) também propôs o uso de um coletor de energia instalado na sola de um sapato. O objetivo era gerar 0,5 W com uma frequência de caminhada de 1,0 Hz. Esse gerador foi construído com pilhas de PZT – 5A bimorfo, acoplado a um circuito eletrônico capaz de extrair, retificar, regular e armazenar, em um capacitor, a energia elétrica, no valor de 12 V contínuos. Em média, esse dispositivo produziu cerca de 90 mW.

BISHUR e SCHWESINGER (2010) exploraram as vibrações mecânicas produzidas em pisos de lugares públicos quando havia o trânsito de pessoas e/ou veículos. Foram criados coletores de energia de 1,1 m x 1,7 m de área de base, seccionados em espaços iguais, com áreas que variavam entre 200 cm^2 a 800 cm^2 . Esses espaços foram equipados com folhas esticadas do material piezelétrico PVDF, usadas como camada dielétrica de um capacitor de placas. Uma película de PVDF de 55 μm foi colocada entre camadas de alumínio de 10 μm . A escolha desse polímero piezelétrico foi motivada pela sua flexibilidade e elasticidade. As camadas de PVDF e de alumínio foram enroladas, alternadamente, de duas em duas e embaladas para proteção. Os módulos foram colocados em pisos de acesso público. Para retificar a tensão CA gerada, usaram-se retificadores de onda completa em ponte. Nessas investigações, percebeu-se a dependência do rendimento energético em relação ao peso da carga e ao número de camadas do PVDF usadas na confecção de todo o coletor. Também foi observado que o tamanho e geometria dos módulos podem influenciar fortemente na eficiência do dispositivo.

Com o objetivo de melhorar a geração de energia elétrica e aumentar a eficiência dos sistemas coletores de energia, várias pesquisas têm incorporado circuitos elétricos a

esses dispositivos. Não obstante, a maioria dos dispositivos eletrônicos de baixa potência necessita de fontes de tensão em corrente contínua. Os coletores de energia piezelétricos geram tensão alternada, portanto, circuitos retificadores de tensão conectados entre esses geradores e os dispositivos de baixo consumo energético tornam-se imprescindíveis (SZARKA et al., 2012, DO et al., 2011, ROCHA et al., 2010; HOWELLS 2009).

SAGGINI et al. (2010) propuseram um conversor DC – DC bidirecional que emulava a impedância de uma carga resistiva – indutiva (RL) para ser acoplado a um coletor de energia constituído por uma viga piezelétrica da *Midè technology* (V20W) com uma massa de 3 g na extremidade para alcançar uma frequência de 163 Hz. O conversor emulava uma impedância resistiva – indutiva (RL) adaptável. Como a impedância do material piezelétrico é altamente capacitiva, o uso de uma carga reativa (indutor) aumentava a geração de energia no gerador piezelétrico, especialmente para diferentes frequências de excitação das frequências de ressonância e fora da ressonância. Ao alterar, devidamente, os parâmetros resistivos e reativos, eles perceberam que ocorria o aumento da potência máxima colhida em qualquer frequência de excitação, independente da frequência de ressonância do gerador piezelétrico.

TURNER et al. (2012) apresentaram o resultado de simulações para três sistemas diferentes. Investigaram a eficiência de três modelos de circuitos acoplados a uma viga de PZT. Um modelo foi conversor eletrônico que emulava a impedância RL, proposto por SAGGINI et al. (2010). Os outros dois circuitos correspondiam a um circuito RL e um circuito resistivo. Os resultados mostraram que o sistema constituído pelo conversor bidirecional, que emulava um circuito RL, apresentava uma faixa de frequência mais ampla, pois operava tanto nas frequências de ressonância e fora da ressonância. Também verificaram que a eficiência do modelo de SAGGINI et al. (2010) apresentava a maior eficiência, com vantagens de 16% sobre o modelo RL. Não obstante, o modelo com menor eficiência foi o modelo resistivo.

AMMAR e BASROUR (2006) sugeriram o uso de técnicas não lineares, tais como a SSHI (*Synchronized Switch Harvesting on Inductor*) e SSHC (*Synchronized Switch Harvesting on Capacitor*) para aumentar a geração de energia do dispositivo coletor piezelétrico, com a amplificação da voltagem gerada. O gerador tinha dimensões iguais a 35 mm x 12,5 mm x 0,45 mm com uma massa de 2,5 g fixada na extremidade livre. A outra extremidade foi conectada a um *shaker*, que gerava excitações sinusoidais de 85 Hz

com amplitude de aceleração igual a $1,0 \text{ m/s}^2$. Para a aplicação dos métodos SSHI um indutor de 22 mH foi usado. No caso da técnica SSHC, usou-se o mesmo circuito, porém no lugar do indutor, um capacitor de $1,0 \mu\text{F}$

A técnica SSHI consiste no chaveamento de um indutor em paralelo com o gerador piezelétrico. O indutor é acionado quando o deslocamento da viga é máximo. O acionamento do indutor causa a inversão da tensão no gerador piezelétrico. Porém, a inversão não é perfeita por causa das perdas de energia em decorrência da rigidez dielétrica. O valor da amplificação deste método depende do valor da resistência da carga instalada e da capacitância do gerador piezelétrico. A técnica SSHC é baseada no funcionamento de um interruptor capacitivo em paralelo com o elemento piezelétrico. O momento do acionamento é sincronizado com a voltagem máxima e mínima. Nesse método o valor da amplificação máxima registrada foi igual a dois (AMMAR e BASROUR, 2006).

DO et al. (2011) também testaram um gerador piezelétrico com um retificador de onda completa associado e acoplado a um circuito que operava com a técnica SSHI. Contudo, usaram um esquema que simplificava o controle dos interruptores desse circuito. Ao introduzirem um indutor, criaram um ciclo ressonante no capacitor do elemento piezelétrico, com a inversão da tensão. Isso promoveu uma redução significativa nas perdas de energia e permitiu o aumento da eficiência do dispositivo. Com esse retificador, a eficiência atingiu valores superiores a 4,5 vezes a eficiência alcançada com o uso de retificadores de onda completa tradicionais.

MARINKOVIC et al. (2009) apresentaram um circuito retificador usado para melhorar o desempenho de dispositivos coletores de energia piezelétricos. Esse contava com o acionamento de um retificador auxiliar, associado em paralelo a um retificador síncrono e ao gerador piezelétrico. O acionamento do retificador auxiliar foi executado por um transistor MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, ou transistor de efeito de campo metal - óxido - semicondutor - TECMOS – ligado a um retificador síncrono e associado em paralelo. Com a ativação desse transistor, o retificador auxiliar era acionado e passava a operar. Assim havia um fornecimento adicional de carga e melhoramento da potência de saída.

HEHN et al. (2009) também utilizaram um circuito retificador formado por transistor MOSFET como interruptores e elementos retificadores associados aos coletores

de energia piezelétricos. Além disso, eles incluíram um indutor para armazenar temporariamente a energia fornecida pelo gerador piezelétrico. A técnica consistia na ativação e desativação de transistores, que funcionavam como interruptores no circuito. Assim a energia era levada para o indutor e para bateria simultaneamente. Os resultados obtidos demonstraram um aumento de 9% na eficiência.

ZHU et al. (2009) avaliaram pelo método dos elementos finitos a potência elétrica de saída de um dispositivo “*Power Harvesting*” piezelétrico conectado a um circuito composto por uma carga resistiva. Eles verificaram que a corrente elétrica, tensão elétrica e potência elétrica dissipada (esta era usada como um indicador da potência elétrica gerada) são influenciadas pela carga resistiva inserida ao circuito elétrico acoplado ao dispositivo coletor de energia. A tensão elétrica aumentava conforme se elevava os valores da resistência elétrica. Eles também observaram que as cargas resistivas influenciam no amortecimento das oscilações do dispositivo.

KWON e RICON-MORA (2009) tentaram reduzir as exigências da voltagem de entrada do retificador, extrair o máximo de energia possível do material piezelétrico e reduzir as perdas de energia do sistema. Para reduzir as exigências de voltagem e as perdas de energia associadas ao retificador, eles conectaram um pequeno condicionador de comutação magnética e um indutor diretamente ao dispositivo piezelétrico. O retificador oferecia dois caminhos de saída para a tensão: um para a tensão piezelétrica positiva e outra para a tensão negativa. Os conversores operavam em ciclos alternados, transferindo a energia do capacitor piezelétrico para uma fonte de armazenamento (uma bateria), energizando e desenergizando, em fases alternadas, o indutor conectado ao coletor. O conversor controlava os ciclos e suas respectivas fases pela sincronização dos picos positivos e negativos da tensão gerada no elemento piezelétrico. As simulações indicaram uma produção de 45, 10, 4 e 1,5 η J para voltagens de pico de 3,0, 1,5, 1,0 e 0,75 V e eficiências de 71, 69, 58 e 40 %.

LEFEUVRE et al. (2006) analisaram uma técnica de otimização não linear autossintonizado - “*Synchronous Electric Charge Extraction*” (SECE)”, e compararam-na com um circuito retificador padrão, acoplado a uma viga de aço com uma pastilha piezelétrica de PZT, composta por seis placas de 9x28x0,3 mm, e capacitância de 41,8 η F. Todo o sistema usado era constituído por um circuito retificador padrão com diodos dispostos em ponte e um capacitor de 2,2 μ F para suavização e um indutor. O indutor foi

escolhido conforme o valor da capacitância do elemento piezolétrico. Um transistor foi inserido como circuito de controle. Quando a tensão da ponte retificadora do SECE variava de 0,0 até o valor máximo, o transistor era acionado. A cada disparo do transistor, o conversor eliminava as cargas elétricas acumuladas nos eletrodos dos elementos piezolétricos e os transmitia para o capacitor de armazenamento através do indutor. Os resultados experimentais mostraram que a potência obtida com o retificador padrão era igual a 1,63 mW, enquanto que para o SECE era igual a 2,76 mW. Isso representou um ganho de potência próximo de 1,7. Contudo, verificaram que para alguns tipos de vibrações (baixas frequências com grandes amplitudes, misturadas a altas frequências e baixas amplitudes) os resultados obtidos com o SECE poderiam ser mais baixos do que aqueles obtidos com o retificador padrão.

Neste trabalho avalia-se a eficiência de um coletor piezolétrico composto por uma viga de MFC considerando-se diferentes circuitos elétricos e diferentes condições de forçamento. O dispositivo é montado de modo semelhante aos estudos de SODANO e INMAN (2004), TRIPLETT e QUINN (2009), RICART et al. (2010) e KANNO et al. (2010).

Entretanto, diferente desses trabalhos, o objetivo do presente estudo é avaliar a influência de cargas resistivas e reativas inseridas em série ao sistema coletor piezolétrico. A viga piezolétrica é um dispositivo altamente capacitivo. Com a excitação mecânica, a viga fornece uma tensão alternada como resposta. Essa tensão pode ser influenciada pelas reatâncias indutivas e capacitivas, pois estas promovem a defasagem da corrente elétrica alternada em relação à tensão gerada. A presença da reatância capacitiva adianta a corrente elétrica em relação à tensão, já a reatância indutiva atrasa a corrente elétrica em relação à tensão. O uso de um indutor ou de um capacitor conectados ao circuito da viga piezolétrica pode reduzir essa defasagem entre a tensão e a corrente elétrica, permitindo o aumento da eficiência do sistema. Os trabalhos de AMMAR e BASROUR (2006), HEHN et al. (2009), KWON e RICON-MORA (2009), SAGGINI et al. (2010) e TURNER et al. (2012) estudaram a variação da eficiência quando indutores eram inseridos nas configurações dos dispositivos piezolétricos coletores de energia. No entanto, diferente do presente trabalho, usaram acionamentos sincronizados e comandados por transistores.

3. MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Os materiais piezelétricos são materiais capazes de converter energia mecânica em energia elétrica e vice-versa. Essa descoberta foi feita pelos irmãos Jacques e Pierre Curie, em 1880, quando estudavam o efeito da piroeletricidade em vários cristais (turmalina, quartzo e sal rochelle). Eles observaram que um campo elétrico era produzido quando um forçamento mecânico era aplicado sobre esses cristais. Não obstante, também verificaram que a aplicação de um campo elétrico sobre os mesmos cristais produzia uma deformação mecânica (KATZIR, 2003; SCHWARTZ, 2009).

Essas observações evidenciaram a existência do efeito piezelétrico, o qual ocorre de duas formas. A primeira representa o efeito piezelétrico direto, onde o material é capaz de converter qualquer deformação mecânica em carga elétrica. Nesse efeito os materiais funcionam como transdutores aplicados no sensoramento. A segunda forma é o efeito inverso, no qual o material ao receber o estímulo de um campo elétrico, converte energia elétrica em deformação mecânica. Nessa situação o material funciona como um atuador. Esses efeitos demonstram o acoplamento eletromecânico existente nesses materiais. A Figura 2 exemplifica o efeito piezelétrico direto e inverso, (YANG, 2005 – com adaptações).

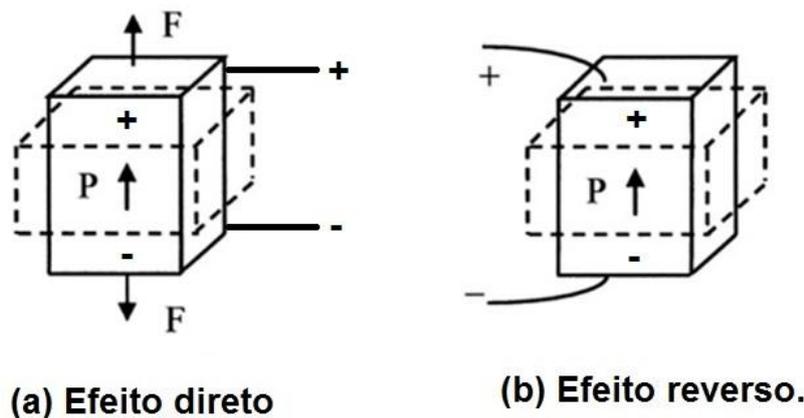


Figura 2 – Esquerda: efeito piezelétrico direto; Direita: efeito piezelétrico inverso. (YANG, 2005 – com adaptações).

Os materiais piezelétricos não despertaram grande interesse no final do século XIX por causa da baixa energia elétrica gerada e pequena deformação mecânica produzida, combinadas à baixa precisão dos instrumentos existentes naquela época para medir essa tensão ou deformação. Porém, o interesse por esses materiais aumentou após as primeiras aplicações deles na engenharia, durante as duas guerras mundiais (KATZIR, 2006).

Para utilizar a piezeletricidade, estudos foram realizados no sentido de melhorá-la, pois o efeito piezelétrico nos cristais era pequeno, tendo em vista o fraco acoplamento eletromecânico. Isso resultou na síntese de materiais que exibiam propriedades piezelétricas mais fortes. Assim, na metade do século XX, ocorreram aplicações práticas de materiais piezelétricos sintéticos com propriedades piezelétricas elevadas e maiores acoplamentos eletromecânicos.

A fabricação de materiais piezelétricos sintéticos utiliza como matéria prima materiais em pó. Uma mistura típica de materiais que exibem propriedades piezelétricas como o chumbo (Pb), zircônio (Zr) e titânio (Ti).

Em 1940, o titanato de bário foi o primeiro piezelétrico sintetizado a exibir propriedades piezelétricas e térmicas superiores aos cristais de quartzo. A evolução desses materiais sintéticos permitiu o uso deles como filtros cerâmicos em sistemas de rádio comunicação, cartuchos fonográficos e vitrolas (SCHWARTZ, 2002; LEO, 2007).

O desenvolvimento do piezo-cerâmico titanato de bário levou os pesquisadores a sintetizarem outros materiais. As pesquisas alcançaram a síntese do titanato zirconato de chumbo (PZT) entre 1950 e 1960. O PZT passou a ser o piezocerâmico mais usado por apresentar propriedades piezelétricas superiores ao titanato de bário. As cerâmicas piezelétricas apresentam melhores propriedades que os cristais após serem “polarizadas”, pois elas oferecem geometrias e dimensões flexíveis, em decorrência dos processos de sinterização de pós-cerâmicos via prensagem ou extrusão (LEO, 2007; PEREIRA, 2010; SCHWARTZ, 2002).

Atualmente, além dos cristais simples, diversos materiais sintéticos apresentam o efeito piezelétrico. Dentre eles destacam-se os materiais piezocerâmicos, os polímeros piezelétricos, os filmes finos e os compósitos (SCHWARTZ, 2009; PEREIRA, 2010).

Os cristais simples são utilizados em aplicações, tais como osciladores com frequência constante e dispositivos acústicos de superfície. Pertencem a esse grupo os

cristais de quartzo, niobato de lítio (LiNbO_3) e tantalato de lítio (LiTaO_3), sendo que o quartzo possui o menor acoplamento eletromecânico. Eles são anisotrópicos e possuem diferentes propriedades, conforme o corte aplicado sobre o cristal. (SCHWARTZ, 2009).

As cerâmicas piezelétricas apresentam uma estrutura cristalina tipo Perovskita com simetria tetragonal romboédrica ou cúbica simples, variando conforme a temperatura. Abaixo da temperatura Curie, a estrutura Perovskita apresenta simetria tetragonal em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, originando um dipolo elétrico. A presença desse dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico quando sujeita a uma deformação mecânica (PEREIRA, 2010). A Figura 3 apresenta a estrutura Perovskita das cerâmicas piezelétricas do tipo PZT, acima e abaixo da temperatura *Curie* (PEREIRA, 2010).

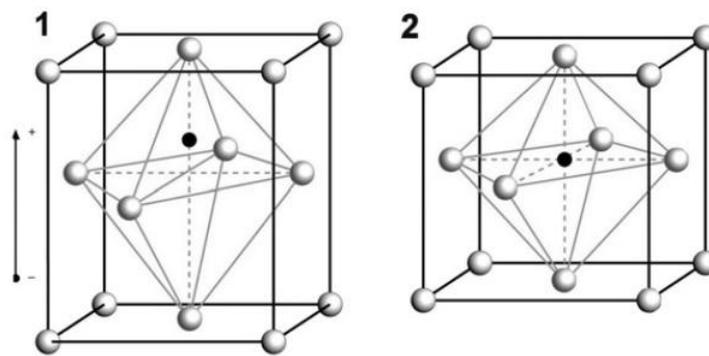


Figura 3- Estrutura Perovskita das cerâmicas piezelétricas tipo PZT: 1) Abaixo da temperatura Curie. 2) Acima da temperatura Curie (PEREIRA, 2010).

O Titanato de bário (BaTiO_3) foi uma das primeiras cerâmicas piezelétricas sintetizadas. Tornou-se atrativa dentro da microeletromecânica. É aplicada em capacitores, resistores, possui alta densidade de armazenamento de dados óticos, é usado em transdutores de ultrassom, dispositivos semicondutores e dispositivos piezelétricos. O piezocerâmico titanato zirconato de chumbo PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$) possui propriedades piezelétricas superiores ao titanato de bário e ao titanato de chumbo. Por isso ele é um piezocerâmico amplamente usado (SCHWARTZ, 2009; PEREIRA, 2010).

As piezocerâmicas possuem natureza frágil em relação às tensões mecânicas aplicadas sobre elas. Além disso, são susceptíveis a trincas por fadiga quando submetidas a ciclos de carregamento em altas frequências (ANTON e SODANO, 2007).

O PVDF é um representante dos polímeros piezelétricos. Eles são utilizados em microfones direcionais e hidrofones ultrassônicos. Sua flexibilidade é bem maior, em comparação ao PZT, contudo o acoplamento eletromecânico é menor (PRYA e SHASHANK, 2009; SCHWARTZ, 2002).

Os filmes finos piezelétricos são formados pela deposição de materiais piezelétricos sobre uma variedade de substratos finos. Em geral, os materiais depositados são óxido de zinco (ZnO), nitrido de alumínio (AlN) ou PZT (PRYA e SHASHANK, 2009).

Os compósitos são constituídos por cerâmicas piezelétricas e polímeros. Eles são mais flexíveis e menos frágeis que os piezocerâmicos por causa da sua matriz polimérica. Possuem coeficientes de acoplamento maiores e baixa impedância acústica. Um representante comercial dos compósitos é o “*macro fiber composite*” – MFC. Ele é constituído por fibras finas de PZT, retangulares, alinhadas uniaxialmente e embutidas em uma matriz de polímero (kapton), cobertas por eletrodos interdigitados. Ele foi desenvolvido pela NASA Langley Research Center em 1996. O MFC produz menor carga elétrica em relação às cerâmicas piezelétricas (SCHWARTZ, 2002; SODANO et al., 2004; ANTON e SODANO, 2007; MINAZARA et al., 2008; PRYA e SHASHANK, 2009).

A natureza piezelétrica pertence a uma classe maior de materiais inteligentes (“*smart materials*”) chamados de ferroelétricos, cujas características são definidas por sua estrutura molecular, a qual apresenta separações locais de cargas semelhantes a dipolos elétricos. Esses dipolos orientam-se aleatoriamente no material. A Figura 4 ilustra os dipolos elétricos devido à estrutura dos materiais ferroelétricos.

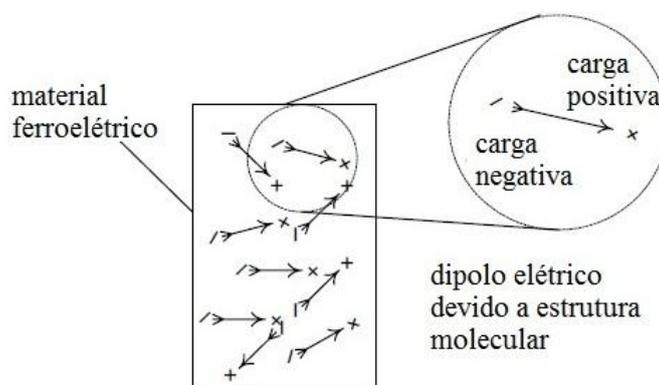


Figura 4 – Dipolos elétricos que levam ao acoplamento eletromecânico dos materiais piezelétricos (Leo, 2007 – com adaptações).

O processamento de uma cerâmica piezométrica comea com o aquecimento do material a temperaturas entre 1200 a 1500 °C. Os materiais aquecidos s3o ent3o formados e dimensionados com m3todos convencionais tais como moagem ou meios abrasivos. Em geral, ap3s o processamento, o material n3o apresenta propriedades piezométricas fortes, pois os dipolos el3tricos no material possuem orienta33es aleat3rias, portanto o efeito piezométrico resultante desses dipolos 3 muito pequeno.

Para que o material apresente acoplamento eletromec4nico forte, 3 necess4rio que os dipolos el3tricos do material estejam alinhados. O alinhamento desses dipolos 3 efetuado pelo processo denominado “*poling*”. Esse processo requer que o material piezométrico seja aquecido acima da sua temperatura *Curie* e, em seguida, colocado dentro de um forte campo el3trico, da ordem de kV/mm. A temperatura *Curie* 3 a temperatura cr3tica na qual a estrutura cristalina do material sofre a transi33o de fase da simetria tetragonal para a c3bica (PEREIRA, 2010).

A combina33o entre o aquecimento e o campo el3trico produz o movimento dos dipolos el3tricos. O aquecimento permite que os dipolos girem livremente, uma vez que o material apresenta-se mais macio em altas temperaturas. O campo el3trico induz os polos a orientarem-se conforme a dire33o dele. Com a r4pida redu33o da temperatura e com a retirada do campo el3trico, o material mant3m os seus dipolos el3tricos orientados. Essa dire33o 3 conhecida como dire33o de polariza33o do material. A Figura 5 representa esse processo de polariza33o.

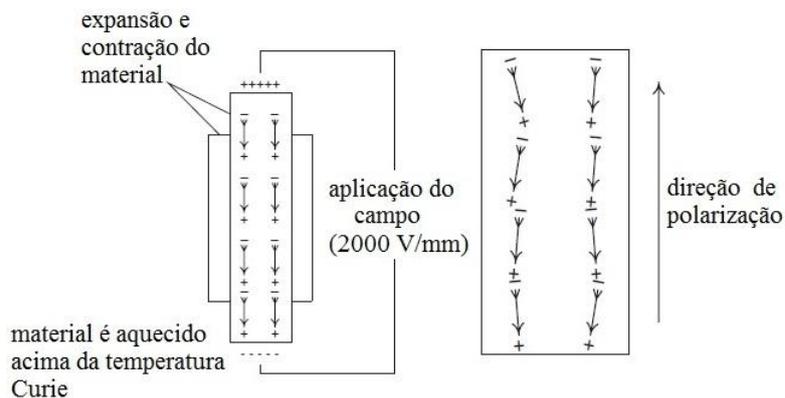


Figura 5 - Processo de polariza33o associado aos materiais piezométricos. (Leo, 2007 - com adapta333es).

A orienta33o dos dipolos produz o aumento do efeito piezométrico no material. Assim, se um campo el3trico for aplicado, o material se deformar4. Por outro lado, a aplica33o de uma deformaa3o provocar4 um deslocamento el3trico em todos os dipolos,

resultando em uma carga elétrica de saída total no material, evidenciando a formação de um campo elétrico e de uma diferença de potencial.

As equações constitutivas dos materiais piezelétricos podem ser combinadas em uma expressão matricial, a qual relaciona o deslocamento elétrico “D” (C/m²) como função do vetor campo elétrico “E” (V/m) e das constantes dielétricas do material piezelétrico “ε” (F/m), e a deformação mecânica “S” como uma função exclusiva das tensões mecânicas “T” e das constantes elásticas “s” (N/m²). A notação matricial é apresentada abaixo (LEO, 2007):

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s & d \\ d & \varepsilon \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix}. \quad (3.1)$$

A parte superior da equação (3.1) representa matematicamente o efeito piezelétrico inverso, enquanto a parte inferior representa o efeito piezelétrico direto. A simetria da matriz dos coeficientes representa a reciprocidade entre os mecanismos de transdução eletromecânicos do material. Os termos da diagonal principal representam as características mecânicas (“s”) e elétricas (“ε”) do material, respectivamente. A diagonal secundária representa o acoplamento eletromecânico. O aumento dos termos dessa diagonal implica no aumento do trabalho realizado pelo material, quando um campo elétrico for aplicado sobre ele, ou no aumento do deslocamento elétrico, quando uma força for aplicada sobre o material. Se os termos dessa diagonal tenderem a zero, o material apresentará pequeno acoplamento eletromecânico.

Nos materiais piezelétricos o acoplamento ocorre entre variáveis mecânicas e elétricas, ou seja, no mesmo tempo em que a deformação depende das tensões mecânicas, ela também depende do campo elétrico. Ao mesmo tempo em que o deslocamento elétrico depende do campo elétrico, ele também depende da deformação mecânica.

Existe um conjunto de coeficientes e constantes d , ε , s e g que representam o desempenho piezelétrico do material:

- Constantes piezelétricas “d”: O caráter piezelétrico de diversos materiais pode ser comparado por meio dessas constantes. Elas estabelecem a proporcionalidade entre a geração de cargas e as tensões mecânicas aplicadas, e entre a deformação em função de um campo elétrico aplicado;

- Constantes dielétricas do material piezelétrico “ ϵ ”: definem a relação de proporcionalidade entre o deslocamento elétrico e o campo elétrico aplicado;
- Constantes elásticas “ s ”: Relacionam a proporcionalidade entre a deformação e a tensão aplicada. São as constantes de mola do material;
- Constantes piezelétricas “ g ”: São a razão entre as constantes d e ϵ , correlacionam a resposta em tensão elétrica do material a uma tensão mecânica aplicada.

Outro coeficiente piezelétrico importante é o coeficiente de acoplamento “ θ ”. Ele define o acoplamento eletromecânico, sendo interpretado como o rendimento do material no processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica e vice-versa.

4. COLETORES DE ENERGIA PIEZELÉTRICOS (POWER HARVESTING)

Semelhante aos trabalhos de Sodano e Inman (2004), Triplett e Quinn (2009), Ricart et al. (2010) e Kanno et al. (2010) o sistema estudado neste trabalho consiste em uma viga piezométrica de MFC livre em uma de suas extremidades e sujeita a um forçamento harmônico de base na outra. A Figura 6 representa esquematicamente o sistema em questão.

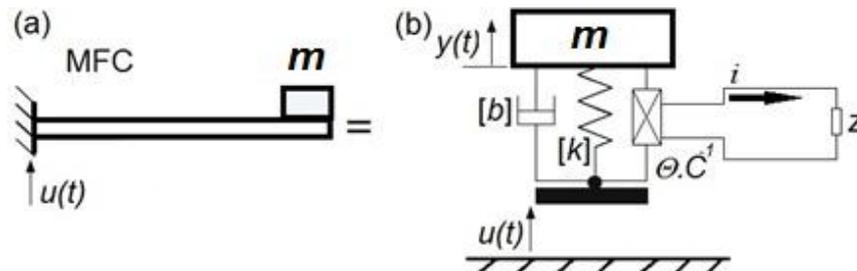


Figura 6 - Coletor de Energia piezométrico. (a) Viga, (b) Sistema equivalente massa-mola amortecido com o circuito elétrico acoplado. (PRIYA e INMAN, 2008; TRIPLETT e QUINN, 2009 - com adaptações).

Para a modelagem da parte mecânica, apresentada na Figura 6(a), é comum uma abordagem simplificada que representa o sistema como massa-mola-amortecedor de 1 grau de liberdade (1GDL), conforme apresentado na Figura 6(b). O circuito acoplado, apresentado na figura 6(b), é usado para avaliar a potência elétrica obtida. A variável m representa a massa concentrada, k é a rigidez elástica, b representa o amortecimento viscoso linear, θ é o coeficiente de acoplamento eletromecânico do material piezométrico, C a capacitância piezométrica e Q é a carga elétrica desenvolvida no circuito acoplado à viga piezométrica. A carga Z representa a impedância do circuito elétrico acoplado, sendo constituída por cargas resistivas, capacitivas e/ou indutivas. Além disso, a coordenada $u(t)$ é o deslocamento da base e $y(t)$ o movimento relativo da massa.

Utilizando-se a abordagem Newtoniana, a equação do movimento do sistema com 1 GDL é:

$$F_e + F_k + F_b = -m(\ddot{u} + \ddot{y}). \quad (4.1)$$

As forças F_e , F_k e F_b representam respectivamente, a força proveniente do efeito piezométrico, a força elástica ($F_k = ky(1 + ay^2)$) e a força de amortecimento viscoso

($F_b = b\dot{y}$). O termo $m(\ddot{u} + \dot{y})$ representa a força resultante onde $(\ddot{u} + \dot{y})$ representa a aceleração da massa m .

A força F_e é expressa pela relação:

$$F_e = -\frac{\theta(y)}{c} Q. \quad (4.2)$$

Com as devidas substituições, tem-se a seguinte equação do movimento:

$$m\ddot{y} + ky(1 + ay^2) + b\dot{y} - \frac{\theta(y)}{c} Q = -m\ddot{u}. \quad (4.3)$$

As notações “ $(\dot{}) = \frac{d}{dt}$ ” e “ $(\ddot{}) = \frac{d^2}{dt^2}$ ” representam, respectivamente, as derivadas primeira e segunda em relação ao tempo.

A tensão gerada no elemento piezoelectrico, como resposta às vibrações, é dada pela relação:

$$V = -\frac{\theta(y)}{c} y + \frac{Q}{c}. \quad (4.4)$$

Onde Q a carga elétrica que cruza a viga piezoelectrica.

A carga total instalada nesse circuito é representada pela impedância “ Z ”. Pela 1ª Lei de Ohm, a tensão elétrica é dada pela relação:

$$V = Z\dot{Q}, \quad (4.5)$$

onde \dot{Q} é a corrente elétrica que percorre todo circuito. Assim, substituindo Eq. (4.5) na Eq. (4.4) obtém-se:

$$Z\dot{Q} - \frac{\theta(y)}{c} y + \frac{Q}{c} = 0. \quad (4.6)$$

As equações (4.3) e (4.6) podem ser escritas na forma adimensionalizada:

$$\frac{d^2x}{d\tau^2} + 2\epsilon\zeta \frac{dx}{d\tau} + x(1 + \epsilon\alpha x^2) - \epsilon\theta(1 + \beta|x|)q = \epsilon\gamma \sin(\omega\tau). \quad (4.7)$$

$$\rho \frac{dq}{d\tau} - (1 + \beta|x|)x + q = 0. \quad (4.8)$$

No processo de adimensionalização as coordenadas e o tempo são escalados conforme as relações $y = c_x x$, $u = c_x v$, $\tau = \sqrt{k/m} t$. Além disso, são definidas variáveis adimensionais $Q = c_p q$, $\xi = b/\sqrt{km}$, $\epsilon\alpha = ac_x^2$ e $\rho = Zc\sqrt{km}$. O coeficiente

piezoelétrico adimensionalizado é $\hat{\theta}(x) = (c_x/c_q)\theta(c_x x)$ e o parâmetro “ ϵ ” é expresso por $\epsilon = (c_q/c_x)^2 / (C k)$. O coeficiente piezoelétrico de acoplamento foi aproximado para $\theta(z) = \theta_{lin}(1 + \theta_{nl}|y|)$ e a contraparte não-dimensional igual a $\hat{\theta}(x) = \theta(1 + \beta|x|)$, sendo $\theta \equiv (c_x/c_q)\theta_{lin}$ e $\beta \equiv c_x\theta_{nl}$. Para a aceleração de base harmônica $-\ddot{u}(t) = A\sin(\Omega t)$, pela adimensionalização, obteve-se $-mAsen(\Omega t) = \epsilon\gamma sen(\omega\tau)$, onde $\omega = \Omega/\sqrt{k/m}$ e $\gamma = (c_x/c_q)^2 mAC$.

A abordagem matemática apresentada é semelhante à feita por Triplett e Quinn (2009), mas difere-se pela inserção da impedância no lugar da carga puramente resistiva “R”. Além disso, Triplett e Quinn propuseram que a potência elétrica gerada e a potência média podem ser definidas pelas equações (4.9) e (4.10):

$$P = \rho \left(\frac{dq}{d\tau} \right)^2. \quad (4.9)$$

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T P(\tau) d\tau. \quad (4.10)$$

Contudo, neste trabalho, a potência elétrica gerada pela viga piezoelétrica quando acoplada a circuitos constituídos por resistores, indutores e capacitores, é calculada em termos da tensão gerada pela viga V , da corrente elétrica total i que percorre o circuito elétrico e do ângulo ϕ , que representa o ângulo de fase entre a tensão elétrica e a corrente total que percorre o circuito.

Assim, a potência elétrica gerada é obtida pela equação:

$$P = V i \cos\phi. \quad (4.11)$$

Porém, conforme a equação (4.5), a potência elétrica gerada também pode ser determinada em termos da tensão (V) e impedância (Z). Assim a equação (4.11) pode ser escrita como:

$$P = \frac{V^2}{Z} \cos\phi. \quad (4.12)$$

No trabalho realizado, o sistema é estudado experimentalmente. Contudo, a formulação matemática é apresentada de forma a melhorar o entendimento do sistema estudado e facilitar a compreensão da metodologia aplicada na obtenção dos resultados.

Nas próximas seções serão apresentados o aparato experimental, a metodologia de tratamento de dados e os resultados obtidos.

5. APARATO EXPERIMENTAL DO SISTEMA ESTUDADO

A Figura 7 apresenta um fluxograma do procedimento realizado.

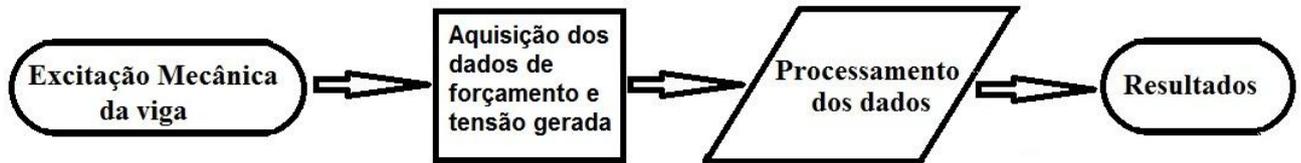


Figura 7 - Fluxograma do procedimento realizado.

A viga usada no experimento, apresentada na Figura 8, é uma viga de MFC, modelo M2814-P2 da *Smart Materials* com dimensões do elemento piezelétrico iguais a 28 X 14 mm, dimensões totais de 37 X 18 mm e capacitância igual a 25,7 η F. A viga é fixada por uma de suas extremidades ao *shaker* por meio de um suporte metálico, conforme mostrado na Figura 8.



Figura 8 - Viga de MFC e suporte metálico.

A viga é excitada por um *shaker* eletrodinâmico da *LabWorks Inc*, modelo ET127 (Figura 9), a partir de um forçamento de base harmônico impondo-se amplitude de deslocamento constante. O controle do *shaker* é executado pela controladora da *Data Physics Signalstar Scalar Abacus Lite*, mostrada na Figura 10, utilizando um acelerômetro modelo 352C34 da *PCB Piezotronics*. O acelerômetro 352C34 de controle é fixado sobre o

shaker e conectado a um dos canais de entrada da controladora. Esse sensor apresenta sensibilidade de 100 mV/g para a faixa de frequência de 0,5 a 10 kHz, faixa de medida entre ± 50 g de pico (± 490 m/s² de pico), resolução em banda larga (1 a 10000 Hz) 0,00015 g rms (0,0015 m / s² rms), faixa de frequência igual a 0,5 a 10000 Hz ($\pm 5\%$) e peso de 5,8 g.

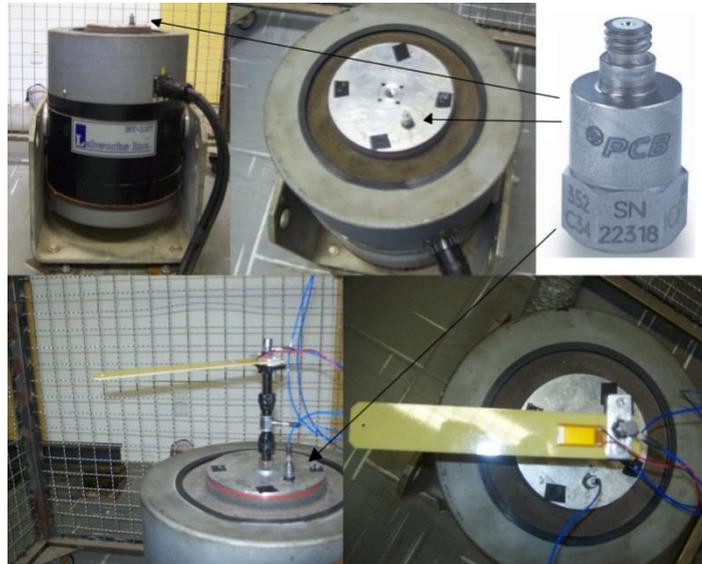


Figura 9 - Shaker modelo ET127 da Labworks, acelerômetro 352C34 e viga piezolétrica fixada através suporte metálico.

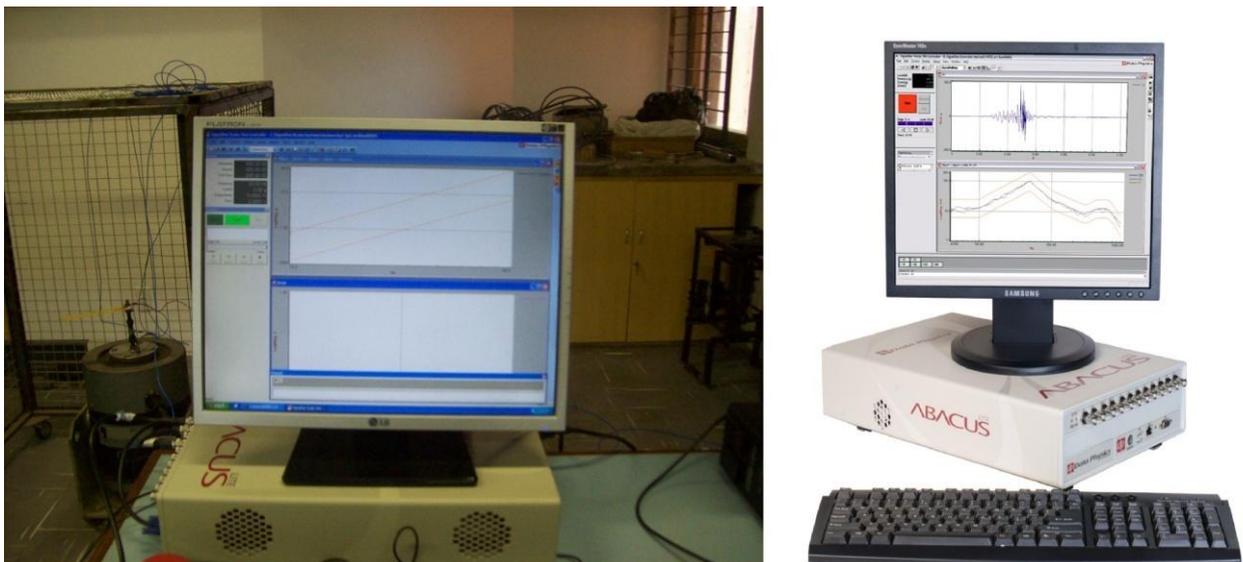


Figura 10 - Controladora *SignalStar Scalar Abacus Lite* da Data Phisics.

A medição do forçamento da viga e da aceleração imposta pelo *shaker* é realizado por uma célula de carga e por um acelerômetro da PCB *Piezotronics*, modelos 208C03 e 352C33, respectivamente.

O acelerômetro PCB 352C33 apresenta características semelhantes àsquelas do PCB 352C34. O sensor de força 208C03 possui sensibilidade de 10 mV/lb (2248 mV/kN), 500 lb (2,224 kN) de compressão e tensão estática, máxima força de compressão de 3000 lb (13,5 kN) e máxima força de tensão estática de 500 lb (2,224 kN), resolução em banda larga de 1 a 10000 Hz (0,005 lb-rms / 0,02 N-rms) e tensão de excitação de 20 a 30 VDC.

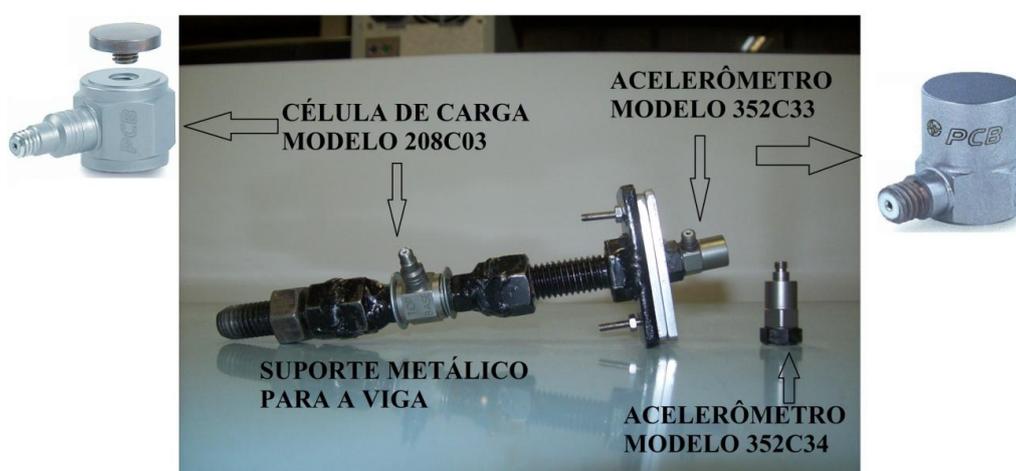


Figura 11 - Célula de carga, acelerômetros e suporte metálico utilizados na fixação e instrumentação da viga.

Para aquisição e monitoração dos dados é usado um chassi, dois módulos e o *software labview*, todos da *National Instruments*. O chassi escolhido é o USB NI cDAQ-9178 de 8 *slots*, 15 W e faixa de tensão de entrada de 9 a 30 V. Os módulos NI 9201 e NI 9234 utilizados são conectados ao chassi. O NI 9201 é um módulo com 8 canais de entrada analógica para medição de voltagem e taxa máxima de amostragem de 500 kS/s, com conectores terminais tipo parafuso e faixa máxima de tensão de ± 10 V. O NI 9234 é um módulo com 4 canais de alta precisão para medição de frequência e taxa de amostragem de 51,2 kS/s, conectores BNC, ideal para condicionamento de sinais de sensores, tais como acelerômetros, células de carga e microfones. A faixa máxima de tensão é de ± 5 V.



Figura 12 - Chassi e Módulos da NI.

O *Labview* é um *software* aplicativo de projeto que oferece ferramentas que permitem o desenvolvimento de sistemas de medição e controle. Essas ferramentas são um conjunto de ícones que possuem funções de aquisição, manipulação e análise dos dados. A programação é feita por meio de fluxo de dados. Cada rotina desenvolvida é conhecida como instrumento virtual (extensão “.vi”). Esses instrumentos são compostos pelo painel frontal, que contém a interface gráfica, e pelo diagrama de blocos, que possui o código fonte (gráfico) do programa. A Figura 13 mostra o painel frontal e o diagrama de blocos da rotina usada neste trabalho.

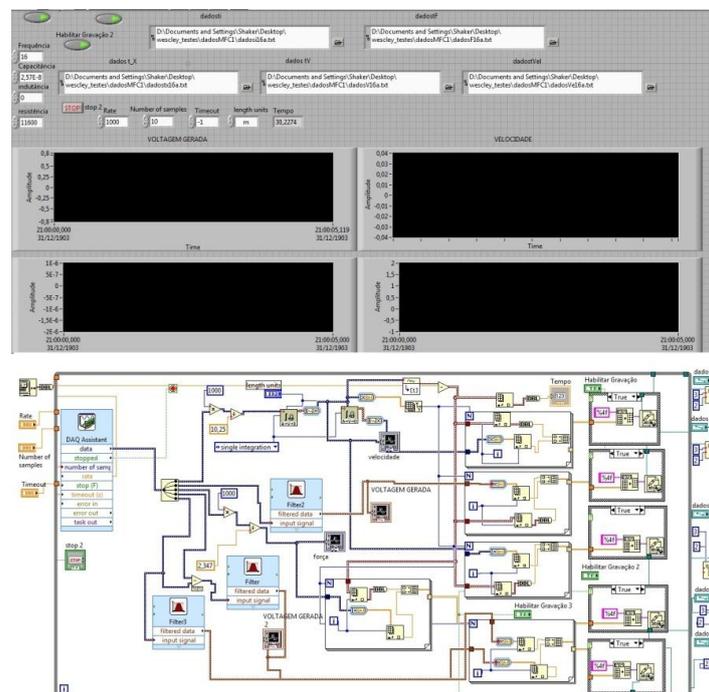


Figura 13 - Painel frontal e diagrama de blocos desenvolvidos no Labview 2009.

Inicialmente, é interessante identificar a frequência de ressonância do sistema de forma a determinar a faixa de frequência a ser analisada. Por meio de uma varredura, tem-

se que a primeira frequência de ressonância da viga ocorre em próximo a 17 Hz. Desta forma, para análise do sistema, a faixa de frequência entre 16,8 a 17,8 Hz é considerada. Além disso, três amplitudes de deslocamento imposto à viga são avaliadas: 0,5 mm, 0,75 mm e 1,0 mm, pico a pico. A escolha dessas amplitudes levou em consideração as especificações técnicas do *shaker* e da viga piezelétrica.

Para cada uma das amplitudes, as vibrações aplicadas sobre a viga são monitoradas durante 25,0 s de forçamento, após 100 períodos, para que as vibrações alcancem o regime permanente. Os dados coletados relativos à tensão elétrica gerada, deslocamento e velocidade do *shaker*, força e corrente elétrica foram salvos para posterior processamento.

Em seguida, o processamento de dados é realizado por meio de rotinas elaboradas no *software* Matlab 2008. O *Matlab* (nome formado pelas iniciais dos vocábulos em inglês *Matrix* e *Laboratory*) é um software destinado à execução de cálculos numéricos, análise de sistemas, desenvolvimento de algoritmos e construção de gráficos científicos e de engenharia. Seu ambiente comporta recursos de linguagem de programação assemelhadas aos recursos do FORTRAN, ANSI C e do Pascal, além da possibilidade de operar com instruções simbólicas e de construir ferramentas próprias por meio da programação de arquivos com extensão “m”. Sua interface segue uma linguagem parecida com aquela usada na álgebra linear. Isso torna o aplicativo um facilitador no tratamento de matrizes e vetores.

As rotinas desenvolvidas em *Matlab* avaliam a potência mecânica fornecida, a partir dos dados de força e velocidade, a potência elétrica obtida, a partir da tensão e corrente geradas, e a eficiência da conversão.



Figura 14 - Sistema experimental completo.

6. METODOLOGIA DO PROCESSAMENTO DE DADOS

Como descrito anteriormente, a viga é excitada harmonicamente pelo *shaker* a partir da excitação de base com amplitude constante. Como resposta à excitação, uma tensão é gerada na viga. Nesse processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica, o rendimento é baixo. Portanto, para obter a eficiência do sistema é necessário determinar a potência elétrica gerada e a potência mecânica fornecida. Para avaliar a potência mecânica, monitora-se a velocidade do *shaker* e a força presente e obtém-se o ângulo de fase entre essas grandezas. Para a potência elétrica monitora-se a tensão e corrente elétrica gerada e calcula-se o ângulo de fase entre essas quantidades. No processo de aquisição e tratamento de dados alguns procedimentos foram adotados conforme descritos a seguir.

6.1. DIVISOR DE TENSÃO

Durante o experimento, verificou-se a possibilidade da tensão elétrica gerada pela viga superar a tensão máxima de entrada permitida pelo módulo NI 9201. Para evitar possíveis sobretensões, o que provocaria danos ao módulo, optou-se pelo uso do circuito divisor de tensão. Esse circuito, além de proteger o módulo de aquisição, também funcionou como uma ferramenta para análise das demais cargas incluídas no sistema.

O circuito divisor de tensão é usado para realizar ajustes no valor da voltagem de saída de um dispositivo. Basicamente, consiste em um circuito com resistências associadas em série (ou série e paralelo). Nessas resistências, a tensão de saída V_n é proporcional à tensão de entrada V_E . Aplicando-se o princípio da conservação da carga elétrica e o princípio da conservação da energia em uma associação de resistores em série, pode-se calcular a queda de tensão em cada resistor. Com base no circuito apresentado na Figura 15, a tensão elétrica de entrada é a soma da queda de tensão em cada resistor. Assim:

$$V_E = V_1 + V_2 + \dots + V_n. \quad (6.1)$$

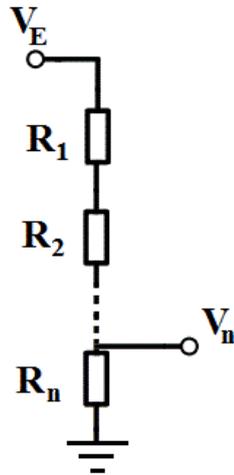


Figura 15 - Circuito divisor de tensão.

Para a corrente elétrica, a carga total que percorre o circuito elétrico no tempo é a mesma que percorre cada resistor. Assim:

$$i = i_1 = i_2 = \dots = i_n. \quad (6.2)$$

Considerando a resistência equivalente de todo o circuito, temos pela lei de Ohm:

$$i = \frac{V_E}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}. \quad (6.3)$$

Aplicando a Lei de Ohm para a resistência R_n , tem-se:

$$i = \frac{V_n}{R_n}. \quad (6.4)$$

Como $i = i_n$, para uma associação de resistores em série, então:

$$\frac{V_n}{R_n} = \frac{V_E}{R_1 + R_2 + \dots + R_n}. \quad (6.5)$$

Assim:

$$V_n = V_E \left(\frac{R_n}{R_1 + R_2 + \dots + R_n} \right). \quad (6.6)$$

A equação (6.6) representa a equação do divisor de tensão. Observa-se, por meio dessa relação, que a tensão elétrica no resistor “n” é na verdade uma fração da tensão de entrada V_E .

O circuito divisor de tensão usado neste trabalho é constituído por 2 resistores e um potenciômetro, com valores nominais de resistência respectivamente iguais a 4,7 k Ω e de 2 k Ω , associados em série sobre uma *protoboard* de 1680 pontos da Minipa, modelo MP-1680.

A tensão monitorada é medida entre o primeiro e segundo resistor, ou entre o segundo resistor e o potenciômetro. O valor da tensão avaliada é multiplicado pelos fatores aproximados de 1,7015 ou 5,6600 na fase de processamento de dados (valores obtidos conforme a posição escolhida para a medida da tensão, ou entre o primeiro e segundo resistor, ou entre o segundo resistor e o potenciômetro, respectivamente). Um multímetro da Minipa ET-1002 é usado para monitorar, antes do módulo NI 9201, a tensão proveniente da viga piezelétrica elétrica.

O *protoboard* também foi utilizado para a montagem de circuitos com cargas resistivas, capacitivas e indutivas, associadas em série à viga. A Figura 16 apresenta o circuito divisor de tensão montado sobre o *protoboard*.

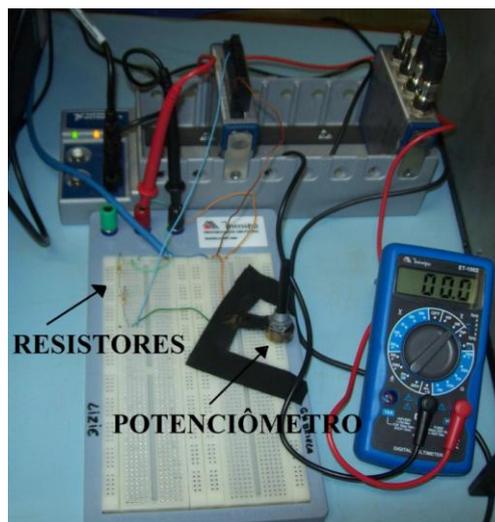


Figura 16 - Circuito divisor de tensão.

6.2. MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS (MMQ)

Os dados obtidos no experimento apresentam variações dos picos, tanto positivos quanto negativos. Dessa forma, não apresentam valores máximos e mínimos constantes no tempo. A Figura 17 apresenta a curva obtida para a força, na frequência de 14 Hz e amplitude de oscilação da base pico a pico de 0,5 mm.

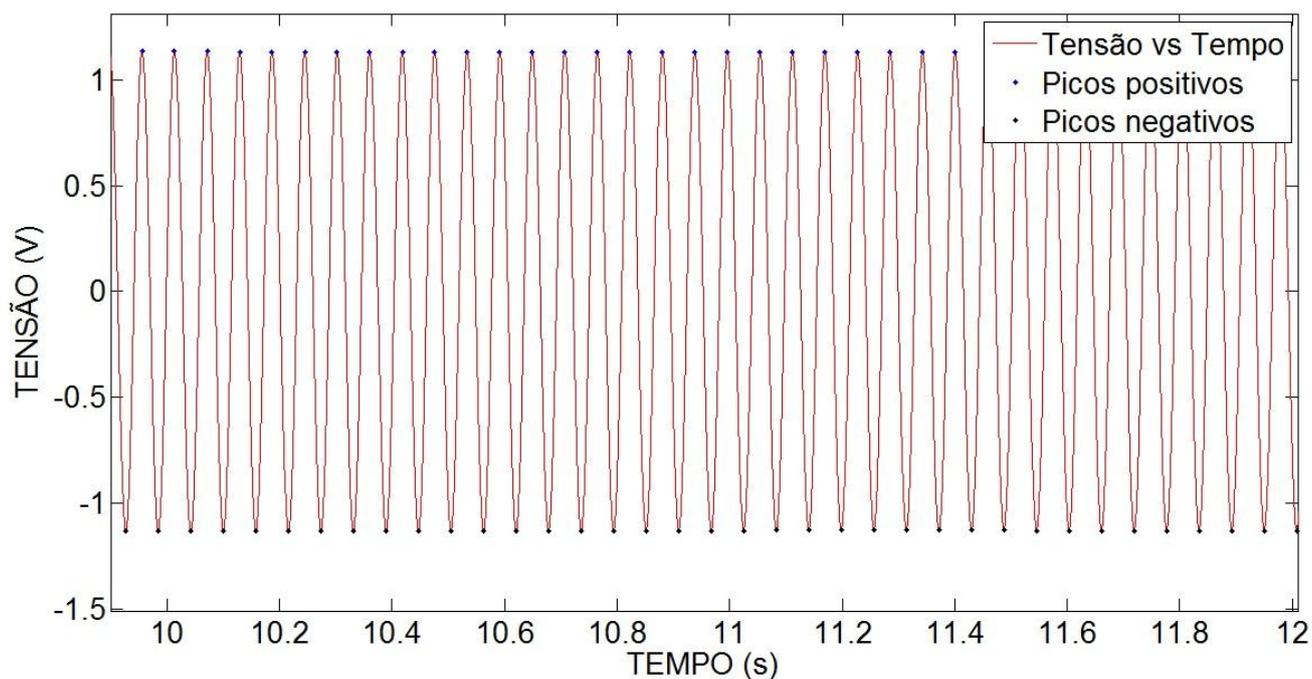


Figura 17 - Tensão versus Tempo, para 17,3 Hz e 1,0 mm de amplitude pico a pico. Os pontos azuis e pretos representam, respectivamente, picos máximos e mínimos.

Para avaliar as amplitudes máximas e mínimas da tensão, utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Neste método, o polinômio que ajusta o conjunto de pontos é obtido minimizando-se a soma dos quadrados das diferenças entre os valores estimados e os dados observados, sem necessariamente passar por qualquer um desses pontos.

O polinômio de ajuste considerado é linear:

$$y_i = ax_i + b, \quad \text{sendo } i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (6.7)$$

No caso, x_i representa o tempo e y_i os picos de tensão. O desvio e_i de cada valor de x_i é dado pela relação:

$$e_i = Y_i - y_i, \quad \text{sendo } i = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (6.8)$$

onde Y_i consistem nos picos obtidos a partir dos dados experimentais (dados observados).

A soma do quadrado dos desvios define uma função $S(a, b)$ (HOFFMAN, 2001):

$$S(a, b) = \sum_{i=1}^N (e_i)^2 = \sum_{i=1}^N (Y_i - ax_i - b)^2. \quad (6.9)$$

A função $S(a, b)$ é mínima quando $\frac{\partial S}{\partial a} = \frac{\partial S}{\partial b} = 0$ (HOFFMAN, 2001). Assim:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - bx_i - a) (-1) = 0, \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial S}{\partial b} = \sum_{i=1}^N 2(Y_i - bx_i - a) (-x_i) = 0. \quad (6.11)$$

Ao dividir as equações (6.10) e (6.11) e reorganizando, as equações normais para a aproximação linear do MMQ são definidas (HOFFMAN, 2001):

$$aN + b \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N Y_i, \quad (6.12)$$

$$a \sum_{i=1}^N x_i + b \sum_{i=1}^N x_i^2 = \sum_{i=1}^N x_i Y_i. \quad (6.13)$$

A Figura 18 apresenta a aproximação linear dos picos máximos e mínimos, obtida para os dados apresentados na Figura 17.

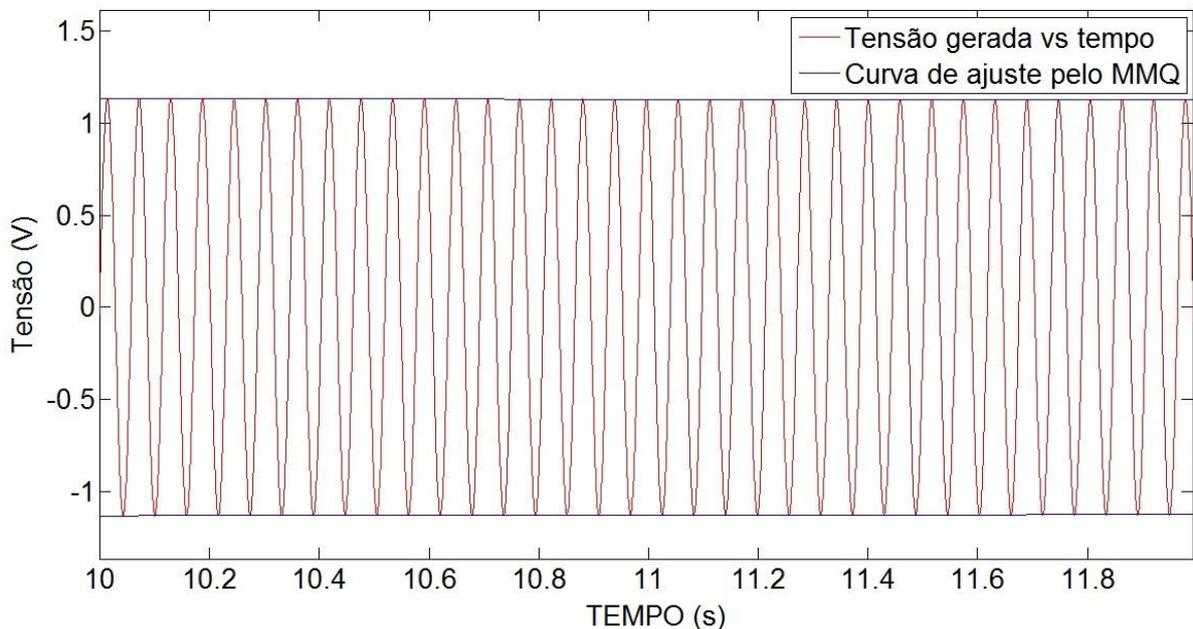


Figura 18 - Ajuste linear dos valores de pico máximos e mínimos pelo MMQ. As retas azuis representam a aproximação linear.

Os coeficientes angular e linear da curva de ajuste dos picos positivos são iguais a -0,0035 e 1,1679, respectivamente. Para a curva de ajuste dos picos negativos esses coeficientes são iguais a 0,0035 e -1,1679, respectivamente.

6.3. ÂNGULO DE FASE

Neste item é apresentada a metodologia para o cálculo do ângulo de fase entre dois sinais, necessário para obter a potência mecânica fornecida pelo *shaker*. A potência mecânica é calculada conforme a equação (6.14):

$$P = F V \cos\theta. \quad (6.14)$$

A defasagem existe porque a força e velocidade, durante as oscilações, não atingem os seus valores máximos e mínimos no mesmo instante de tempo. Dessa forma, se for determinada a diferença de tempo T entre dois pontos de máximos ou mínimos consecutivos de cada uma das formas de onda (da força e da velocidade), é possível determinar o ângulo de fase entre elas. A Figura 19 apresenta as formas de onda da força e velocidade (estando ambos os sinais normalizados pelos seus valores máximos), para três décimos de segundos de oscilação.

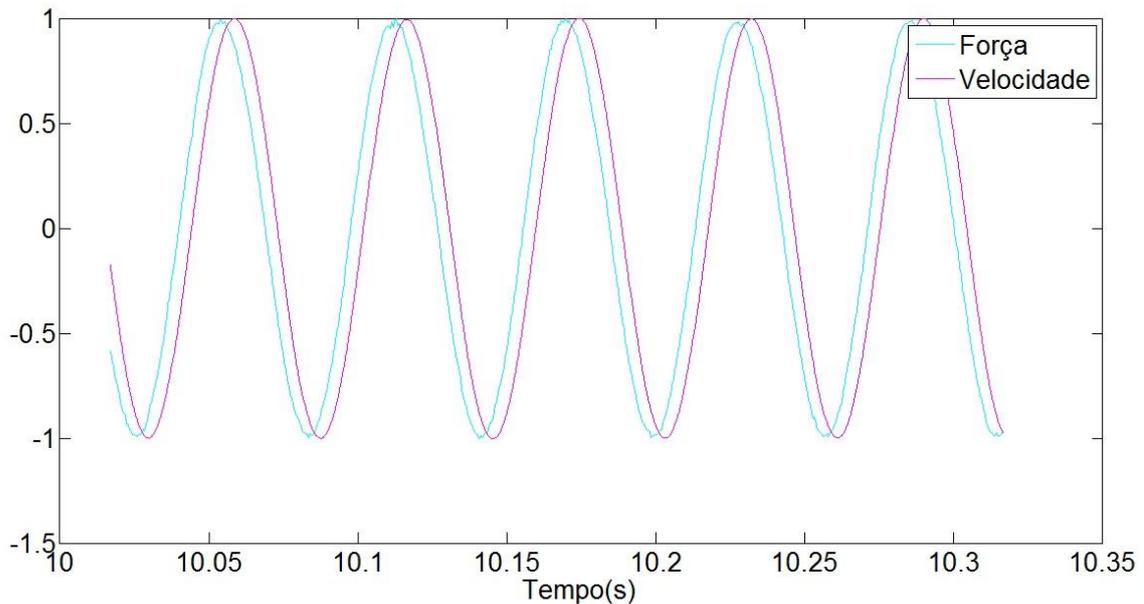


Figura 19 - Força e velocidade no tempo para a frequência de 17,3 Hz e amplitude de excitação da base pico a pico de 1,0 mm.

Para determinar a diferença de tempo entre os sinais, as formas de onda foram convertidas em ondas quadradas onde os valores positivos assumem valor de +1 e os valores negativos assumem valor de -1. Essas ondas quadradas são apresentadas na Figura 20.

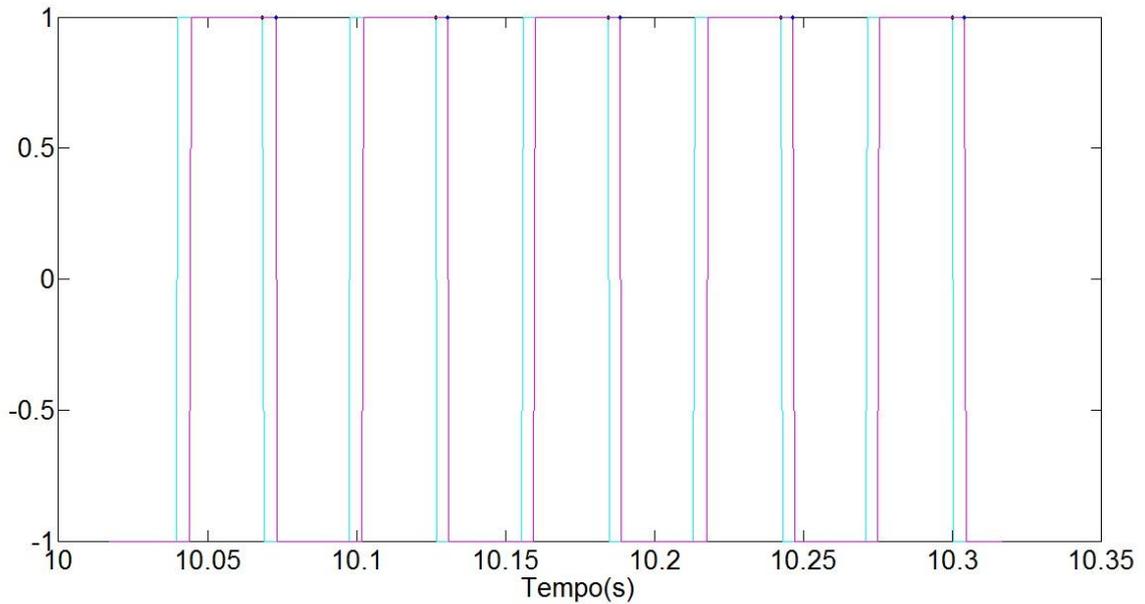


Figura 20 - Sinal da força e velocidade como onda quadrada.

Os valores máximos das ondas quadradas são uma referência para o cálculo da diferença de tempo T entre as duas ondas quadradas.

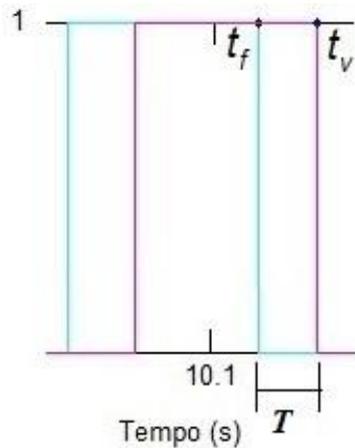


Figura 21 - Cálculo da diferença de tempo T .

A diferença de tempo, T , é dada por:

$$T = T_V - T_F. \quad (6.15)$$

Após determinar o valor da defasagem entre os sinais T (em segundos), e aplicando-se a frequência de excitação já conhecida, pode-se determinar o ângulo de fase entre a força e velocidade.

$$\theta = 2\pi fT. \quad (6.16)$$

Essa metodologia também é aplicada na obtenção do ângulo de fase \emptyset entre a corrente elétrica e a tensão elétrica gerada na viga.

7. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na investigação da resposta dinâmica da viga de MFC com avaliação da eficiência na conversão de energia mecânica em elétrica. O estudo é realizado em três etapas, buscando avaliar o comportamento do sistema devido à variação: da frequência de excitação da base, da amplitude de oscilação da base e das cargas do circuito elétrico.

O circuito acoplado à viga de MFC é constituído por uma associação em série com o resistor de 80Ω e com as cargas resistivas e reativas que são introduzidas entre os terminais A e B. O resistor de 80Ω é usado na obtenção da corrente elétrica e da potência gerada. O valor do resistor é mantido constante de forma a permitir as comparações adequadas entre cada situação estudada. A Figura 22 apresenta o circuito elétrico utilizado.

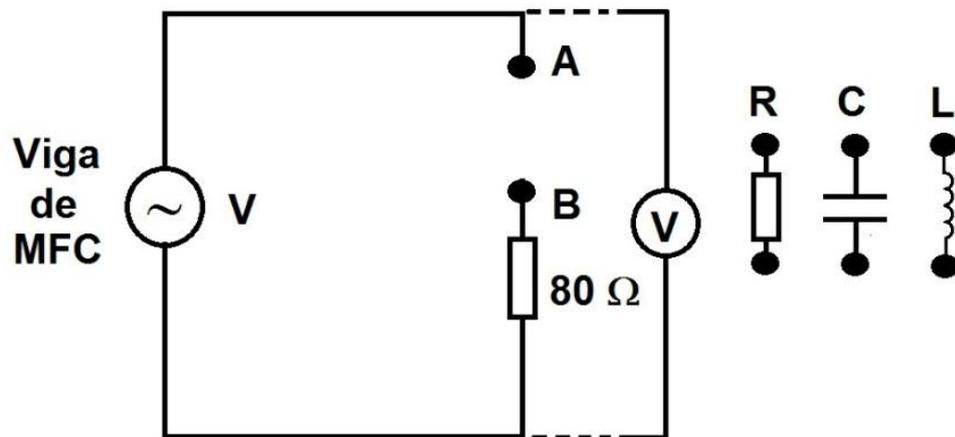


Figura 22 - Circuito elétrico usado nos testes. R – resistor, C – capacitor, L – indutor.

Este circuito é uma representação análoga ao circuito equivalente de Thévenin, usado por KONG et al. (2010). A viga piezoeletrica é considerada uma fonte de tensão alternada, em série com uma impedância elétrica.

- **Variação da Frequência de Excitação de Base - Investigação da Frequência de Ressonância da Viga**

Inicialmente, avalia-se a tensão gerada pela viga e o ângulo de fase entre a velocidade e força, para a faixa de frequências entre 14 a 22 Hz e amplitude de oscilação harmônica de base igual a 0,5 mm. Deseja-se, nessa etapa, determinar a frequência de ressonância da viga e definir uma faixa de frequência a ser utilizada nos demais ensaios. As Figuras 23 e 24 apresentam os resultados obtidos.

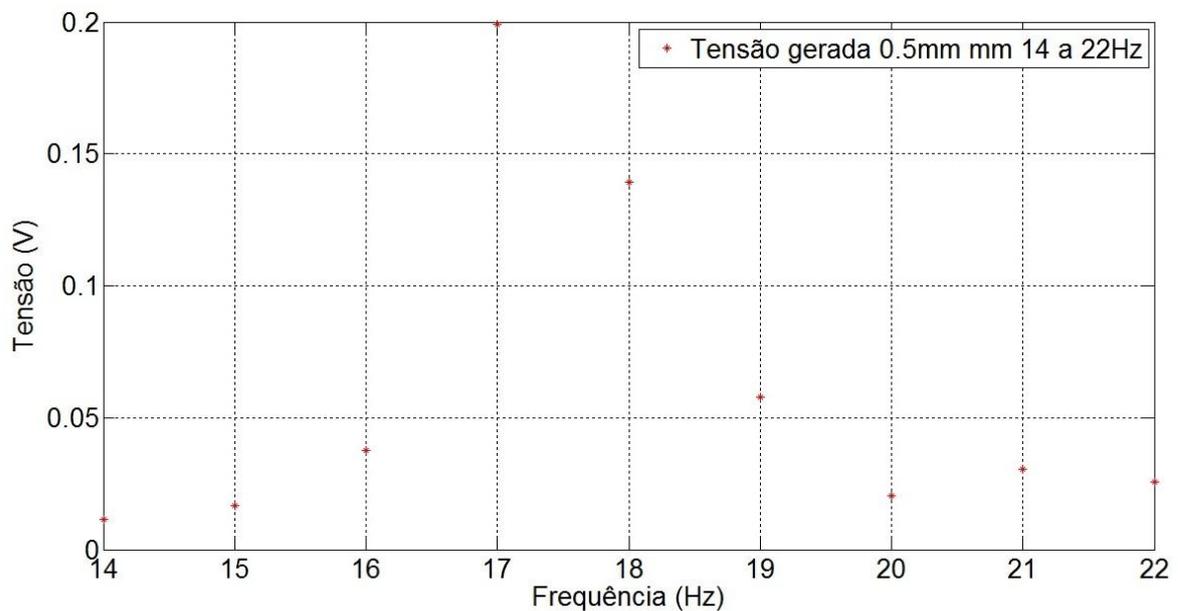


Figura 23 - Tensão versus a Frequência.

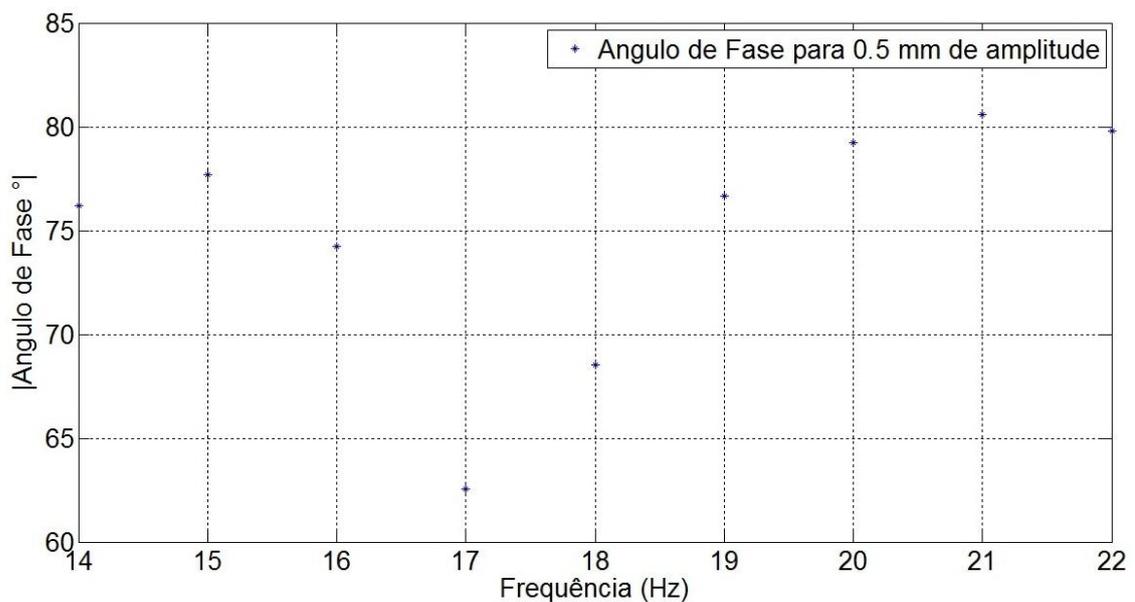


Figura 24 – Módulo do ângulo de fase versus a frequência para amplitude de 0,5 mm.

Nessa primeira investigação um resistor de 1,28 k Ω foi inserido entre os terminais **A** e **B** do circuito da Figura 22. Observa-se que a tensão máxima gerada é aproximadamente 0,2 V, na frequência de 17 Hz (Figura 23). O menor ângulo de fase também é encontrado nessa frequência, 62°, conforme mostra a Figura 24. Os resultados indicam que a primeira frequência de ressonância ocorre em torno de 17 Hz. Dessa forma, a faixa de 16,8 Hz a 17,8 Hz é escolhida para as demais análises, com incremento da frequência de 0,1 Hz.

- **Variação da Amplitude de Oscilação de Base**

Com a utilização da faixa de frequência estabelecida na primeira etapa, avalia-se a energia elétrica gerada pela viga quando a amplitude de excitação de base é variada. As amplitudes de oscilação escolhidas são 0,50 mm, 0,75 mm e 1,00 mm. A resistência elétrica do circuito é alterada para 2,22 k Ω , sendo mantida constante em todos os ensaios. A quantidade de energia elétrica gerada é avaliada com a medição da tensão elétrica fornecida pela viga durante o forçamento. Para avaliar a eficiência da conversão, são calculadas as potências elétrica e mecânica. As Figuras 25 a 28 apresentam os resultados obtidos da tensão elétrica, potência elétrica, potência mecânica e eficiência.

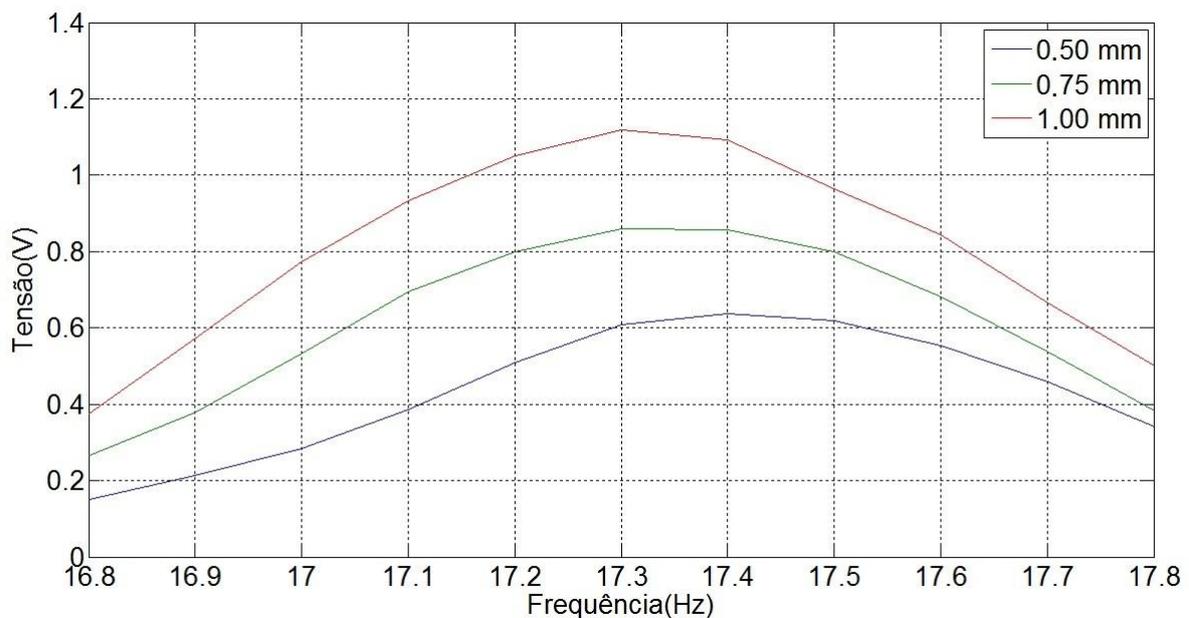


Figura 25 - Tensão elétrica gerada variando-se frequência e amplitude de excitação.

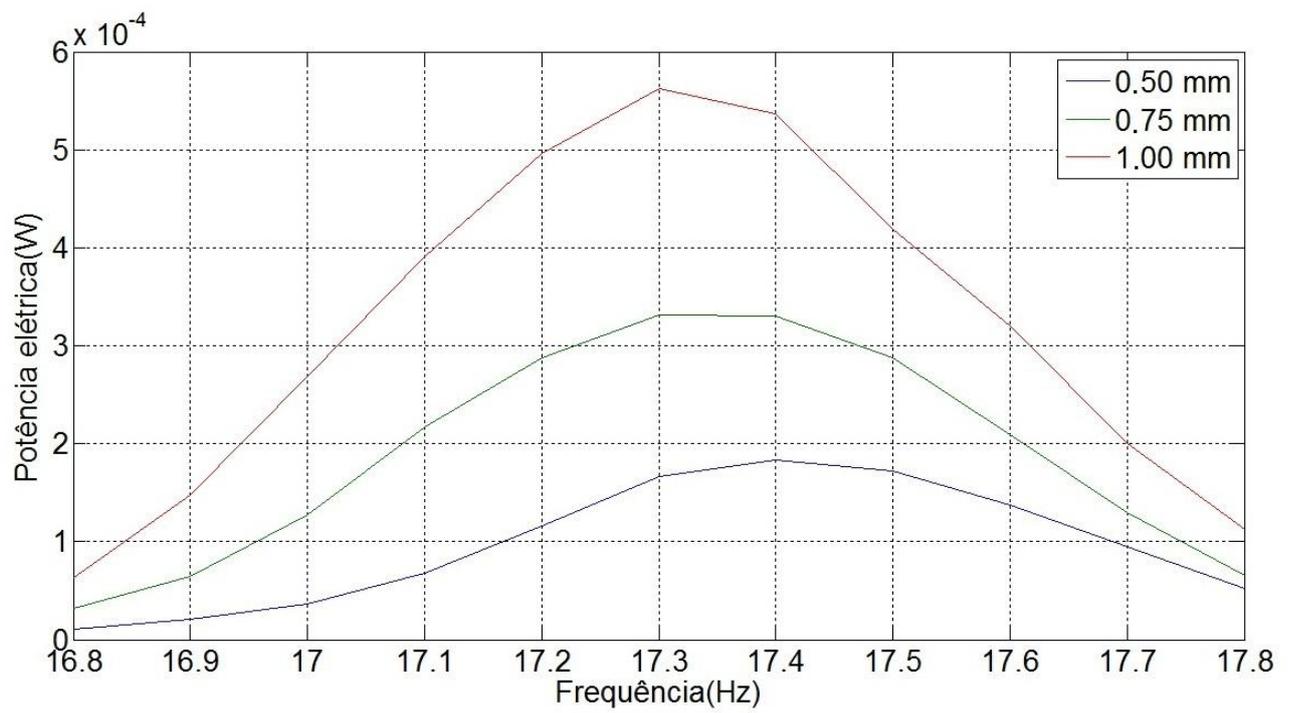


Figura 26 - Potência elétrica gerada variando-se frequência e amplitude de excitação.

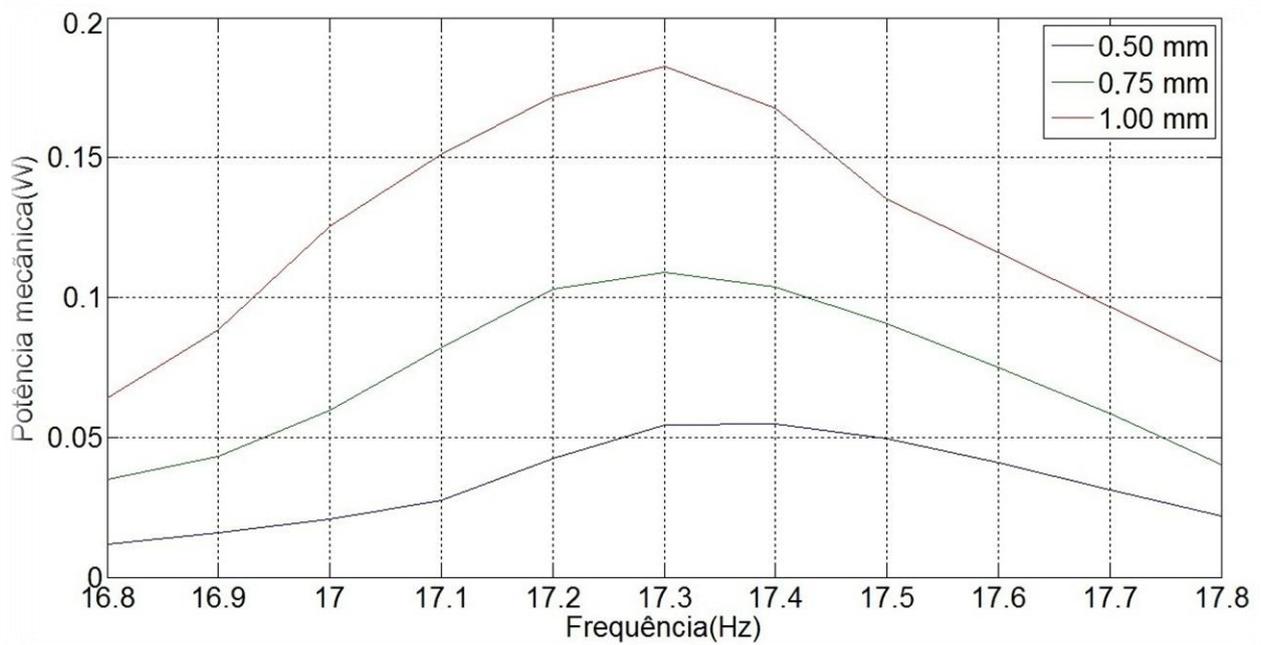


Figura 27 - Potência mecânica fornecida variando-se frequência e amplitude de excitação.

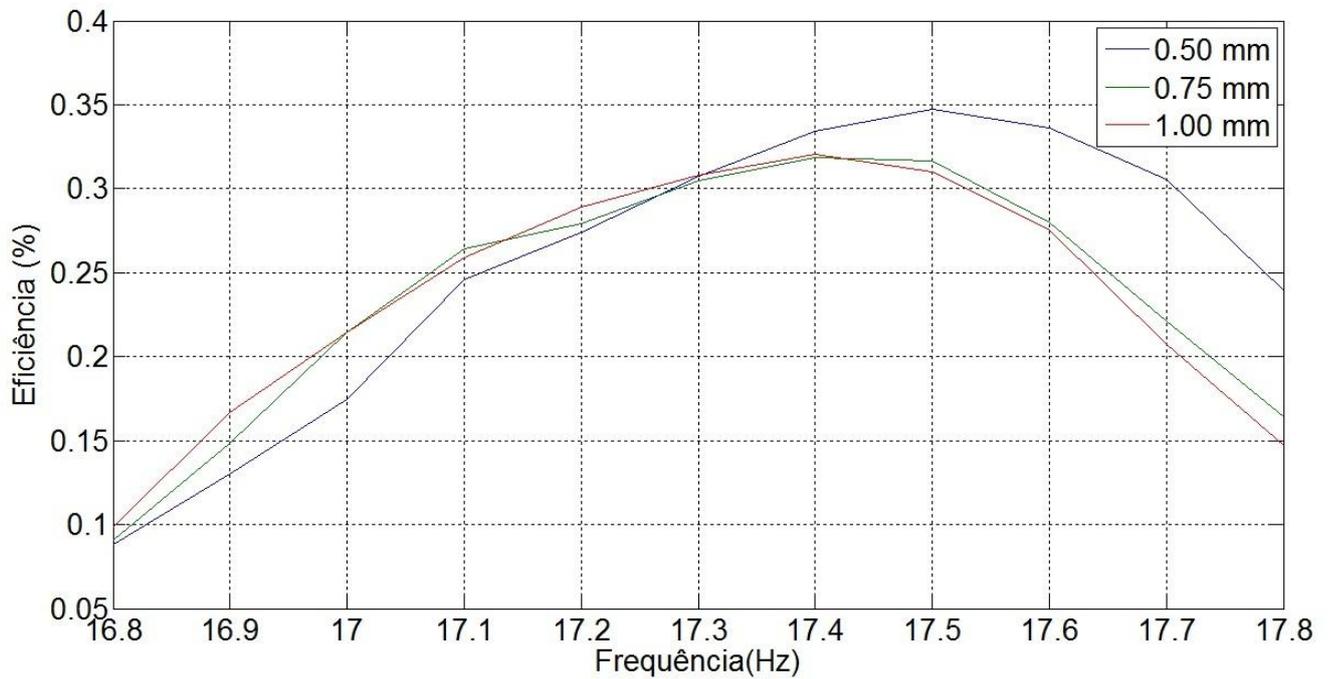


Figura 28 - Eficiência do dispositivo variando-se frequência e amplitude de excitação.

Observa-se que o aumento da amplitude de excitação de base aumenta a tensão e, conseqüentemente, a potência elétrica gerada, sem, no entanto, alterar a eficiência do dispositivo “*Power Harvesting*” de maneira significativa. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para as amplitudes na frequência de ressonância.

Tabela 1 - Resultados obtidos na ressonância com a variação da amplitude.

Amplitude (mm)	FreqRess (Hz)	Tensão (V)	Potência Mecânica (mW)	Potência Elétrica (mW)	Eficiência (%)
0,50	17,40	0,64	54,90	0,18	0,33
0,75	17,30	0,86	108,95	0,33	0,30
1,00	17,30	1,12	182,49	0,56	0,31

- **Resposta do sistema à variação de cargas resistivas e reativas**

Nessa etapa é observado o comportamento do dispositivo coletor de energia durante a variação das cargas inseridas entre os terminais A e B da Figura 22. A amplitude de oscilação é mantida constante em 1,0 mm, pois se deseja obter resultados que sejam influenciados apenas pela variação da resistência, capacitância e indutância do circuito.

Inicialmente, três resistores são testados. A seguir, são inseridos três capacitores e depois três indutores. Nessa avaliação, prefere-se usar capacitores e indutores cujas reatâncias sejam da mesma ordem de grandeza das resistências equivalentes usadas nos testes com os resistores. Mais adiante, comparam-se os resultados obtidos quando a viga está associada a um circuito resistivo – R, resistivo - capacitivo (RC), resistivo – indutivo (RL) e resistivo – indutivo – capacitivo (RLC) em série.

Para todos os testes que envolvem a variação das cargas resistivas e reativas, a eficiência é obtida por meio da razão entre a potência elétrica gerada pela viga e a potência mecânica fornecida pelo dispositivo *shaker* quando a amplitude de oscilação de base é de 1.0 mm conforme apresentado na Figura 29.

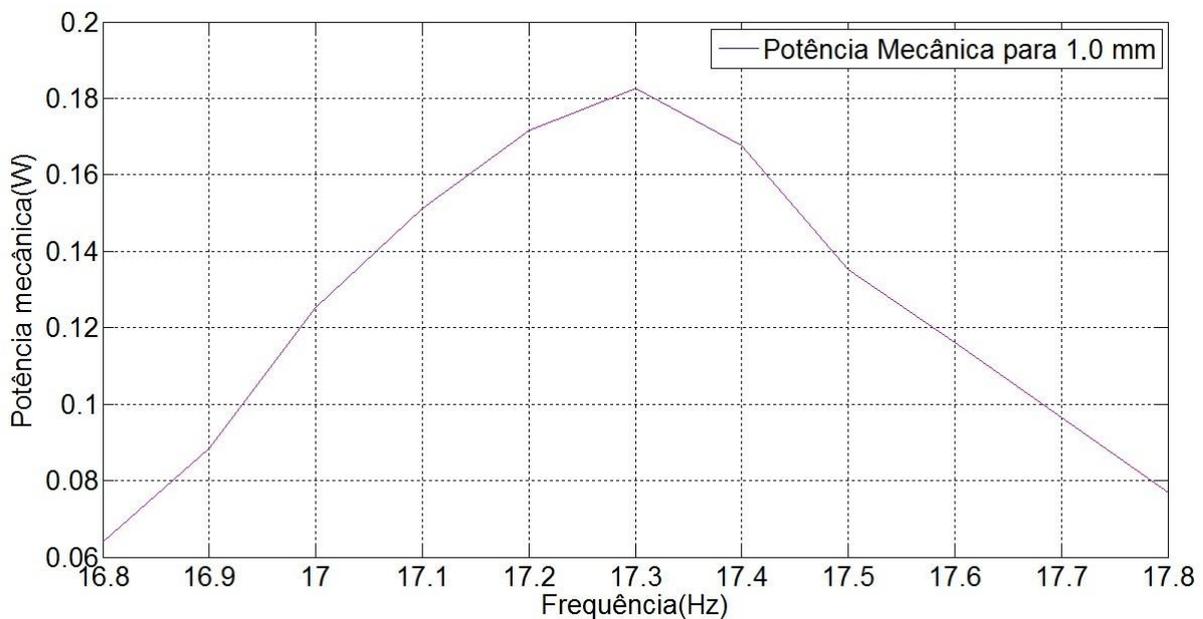


Figura 29 - Potência mecânica para amplitude de oscilação de base de 1.0 mm.

Testes com os três resistores

Os testes com resistores são iniciados com a inserção de um resistor por vez entre os terminais do circuito da Figura 21. Eles são associados em série com o resistor de 80Ω . Os resistores são de $2,14 \text{ k}\Omega$, $4,56 \text{ k}\Omega$ e $8,14 \text{ k}\Omega$. A partir dos resultados, observa-se que a tensão obtida aumenta na medida em que a resistência equivalente do circuito é elevada. Para cada uma das resistências equivalentes testadas, os valores máximos de tensão obtidos são $1,12 \text{ V}$, $2,31 \text{ V}$ e $3,90 \text{ V}$, respectivamente, conforme apresentado na Figura 30.

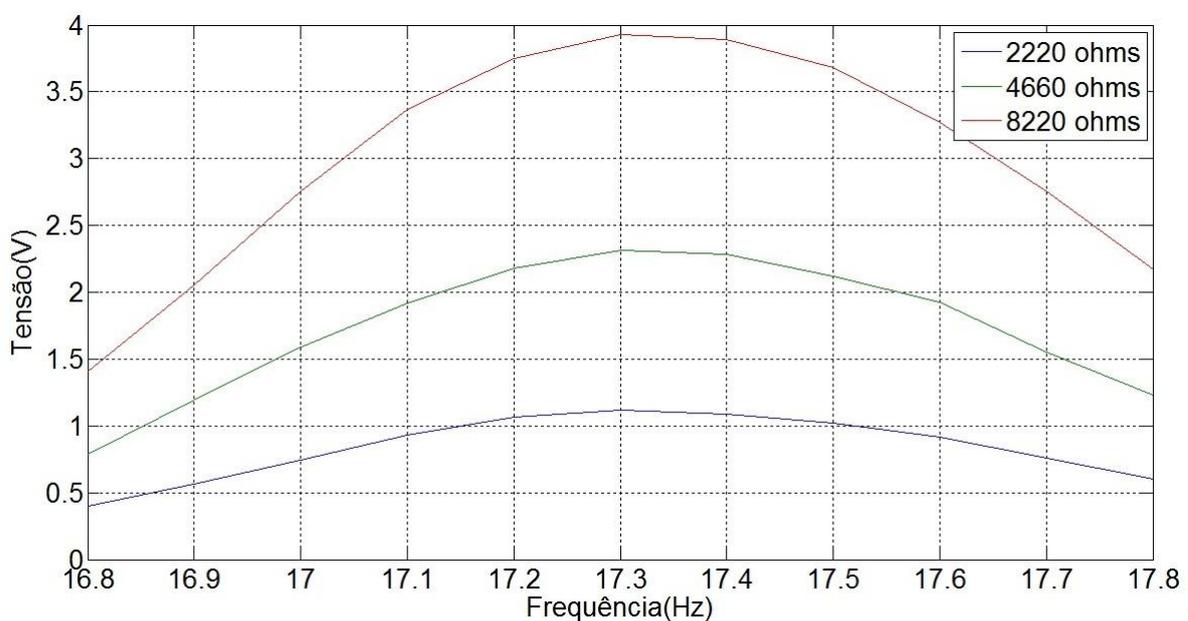


Figura 30 - Tensão elétrica gerada para as resistências equivalentes de $2,22 \text{ k}\Omega$, $4,66 \text{ k}\Omega$ e $8,22 \text{ k}\Omega$.

Essa variação da tensão elétrica, provocada pelo aumento da resistência equivalente do circuito elétrico acoplado, foi observada no trabalho de ZHU et al. (2009) nos resultados obtidos por simulações realizadas pelo método dos elementos finitos. A potência elétrica é calculada pelo produto entre a tensão elétrica medida e o fluxo de corrente que percorre o circuito, considerando que, para cargas resistivas, a tensão e corrente elétrica estão em fase.

A Figura 31 apresenta os resultados para potência elétrica gerada, enquanto a Figura 32 apresenta a eficiência do dispositivo.

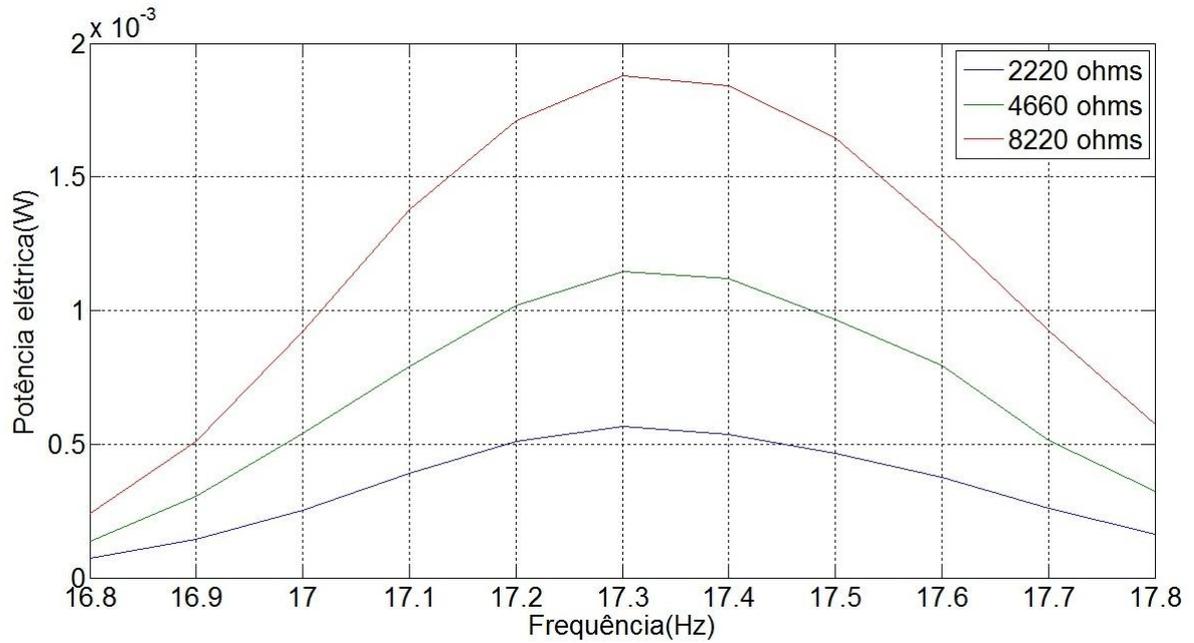


Figura 31 - Potência elétrica gerada para as resistências equivalentes de 2,22 kΩ, 4,66 kΩ e 8,22 kΩ.

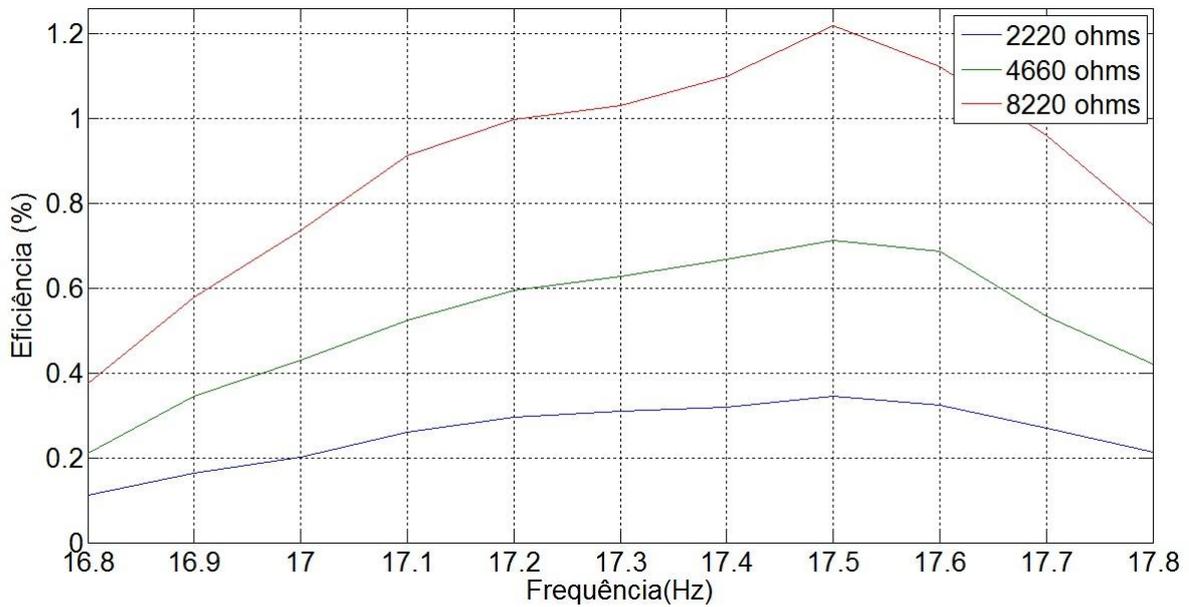


Figura 32- Eficiência versus a frequência para cada resistor inserido no circuito.

Os resultados da tensão elétrica, potência elétrica e eficiência para cada um dos três resistores são apresentados na Tabela 2. Verifica-se um aumento significativo da eficiência do sistema em relação ao aumento da resistência, sendo esse aumento de 103 % para 4,66 kΩ e 233% para 8,22 kΩ quando comparados ao caso com resistência de 2,22 kΩ.

Tabela 2 - Resultados obtidos na ressonância para as três resistências equivalentes observadas.

Amplitude (mm)	FreqRess (Hz)	Resistência Equivalente (kΩ)	Tensão (V)	Potência Mecânica (mW)	Potência Elétrica (mW)	Eficiência (%)
1,00	17,30	2,22	1,12	182,49	0,56	0,31
1,00	17,30	4,66	2,31	182,49	1,33	0,63
1,00	17,30	8,22	3,90	182,49	1,90	1,03

Testes com os três capacitores

Foram testados três capacitores eletrolíticos, inseridos entre os terminais A e B do circuito da Figura 22. Os valores das reatâncias capacitivas possuem ordem de grandezas semelhantes às ordens de grandeza das resistências equivalentes testadas anteriormente. As respectivas capacitâncias são aproximadamente 1,0 μF , 2,2 μF e 4,7 μF . A Figura 33 apresenta um dos capacitores usados nos ensaios.



Figura 33 - Capacitor eletrolítico de 4,7 μF , utilizado nos testes.

As Figuras 34-36 apresentam os resultados obtidos para tensão gerada, potência elétrica gerada e eficiência, respectivamente.

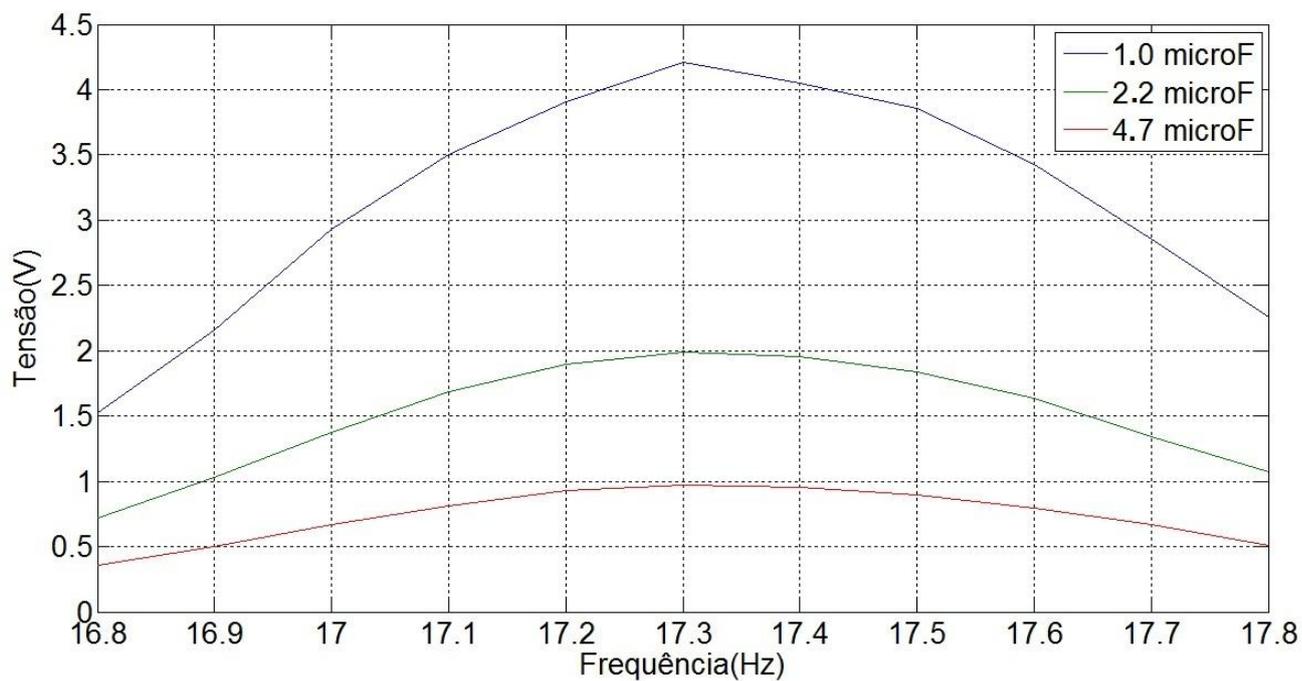


Figura 34 - Tensão elétrica gerada pela viga para os diferentes capacitores.

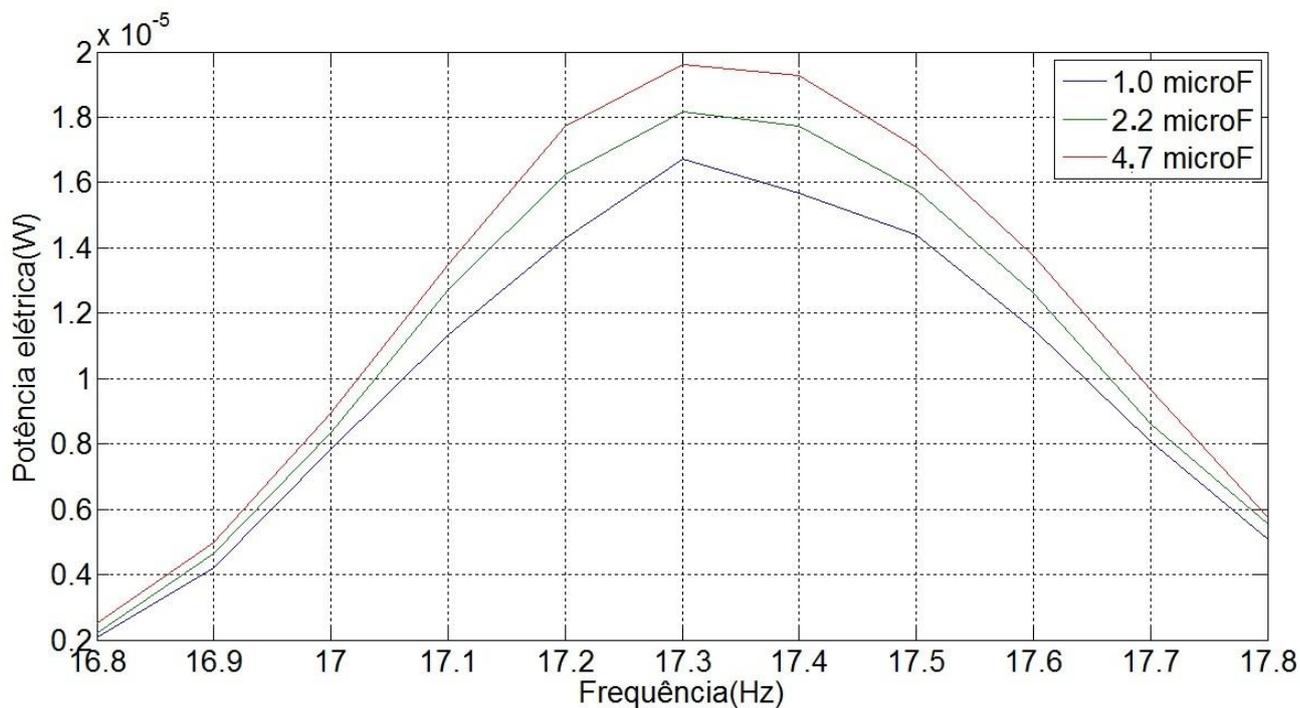


Figura 35 - Potência elétrica gerada pela viga para os diferentes capacitores.

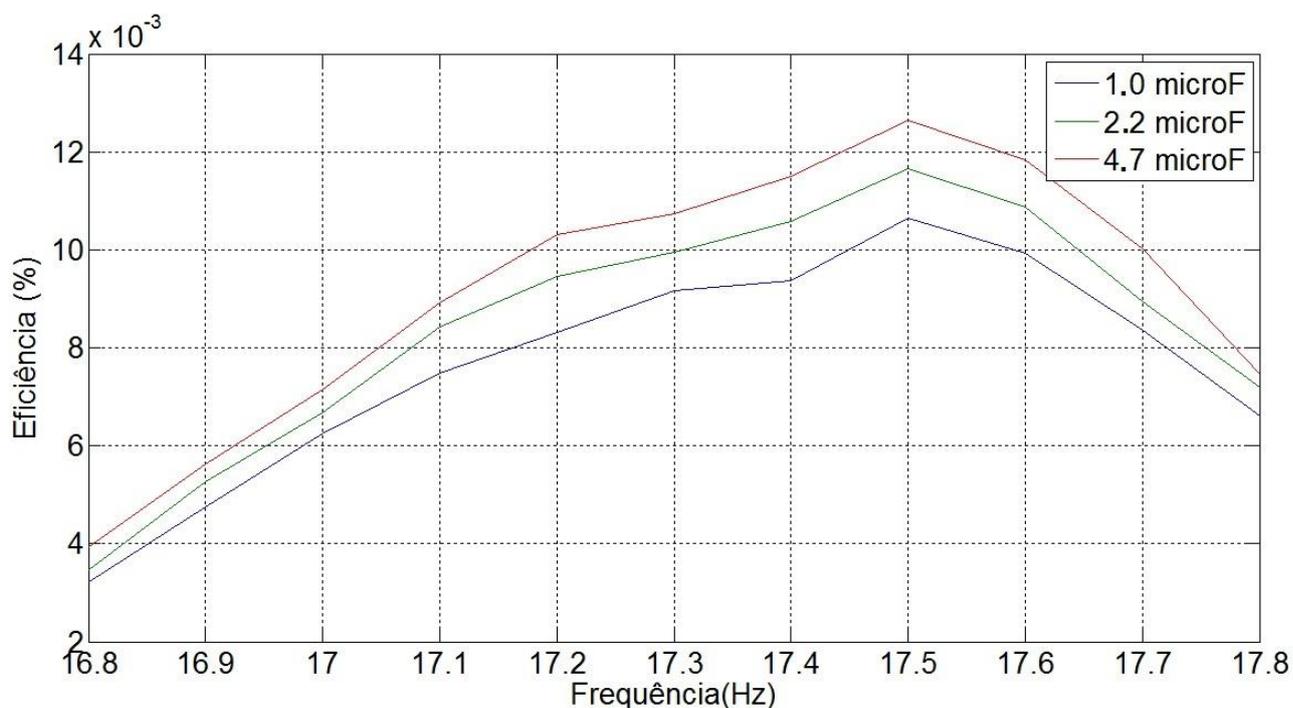


Figura 36 - Eficiência para diferentes capacitores inseridos no circuito.

Embora a tensão elétrica obtida com os resistores e capacitores tenham se aproximado, a potência elétrica obtida com os capacitores foi praticamente 100 vezes inferior quando comparada a potência elétrica obtida com os resistores. Essa diferença é provocada pelo ângulo de fase entre a tensão elétrica e a corrente elétrica. Para cargas puramente resistivas, a corrente elétrica está em fase com a tensão. Contudo, para cargas capacitivas ou indutivas, a corrente e tensão estão defasadas. Isso altera os resultados da potência elétrica.

Deve-se considerar que a inserção de um capacitor em série com a viga piezoeletrica produz uma diminuição na capacitância equivalente do circuito. Essa redução na capacitância pode alterar a tensão elétrica gerada na viga, pois a capacitância é inversamente proporcional à tensão elétrica entre as placas de um capacitor. A Tabela 3 reúne os resultados obtidos na frequência de ressonância para cada capacitor utilizado. Em termos de eficiência, observa-se que os valores são consideravelmente inferiores aos observados na Tabela 2.

Tabela 3 - Resultados obtidos na ressonância para as três capacitâncias utilizadas.

Amplitude (mm)	FreqRess (Hz)	Capacitância (μF)	Tensão (V)	Potência Mecânica (mW)	Potência Elétrica (μW)	Eficiência (%)
1,00	17,30	1,0	4,21	182,49	16,7	0,001
1,00	17,30	2,2	1,99	182,49	18,2	0,010
1,00	17,30	4,7	0,97	182,49	19,6	0,011

Testes com os três indutores

No teste com indutores, desejam-se reatâncias que sejam de mesma ordem de grandeza das resistências equivalentes usadas nos ensaios com os resistores. Todavia, indutores de elevada indutância não são encontrados comercialmente. Dessa forma, três indutores são construídos no laboratório.

Para construção dos indutores, utiliza-se um molde feito com um pedaço de um tubo de PVC de 40 mm de diâmetro por 1,0 cm de largura. Nele são enroladas, respectivamente, 2200 voltas, 4220 voltas e 8000 voltas de um fio fino de cobre, esmaltado, usado no enrolamento de transformadores e motores elétricos. Os indutores construídos apresentam aproximadamente 150 mH, 346 mH e 611 mH. As reatâncias estimadas, na frequência de ressonância da viga, são, respectivamente, 16,30 Ω , 37,71 Ω e 66 Ω . Esses valores estão abaixo da ordem de grandeza das cargas testadas anteriormente. A indutância necessária deveria ser, pelo menos, próxima de 80 H para que as reatâncias indutivas alcançassem os valores das resistências e reatâncias capacitivas. Comercialmente, indutores de elevadas indutâncias são obtidos mediante encomendas aos fabricantes. Para serem construídos no laboratório, seria necessário utilizar aproximadamente duzentos e oitenta e duas mil voltas de fio. Isso torna o indutor muito grande, o que torna inviável o uso deles no circuito.

Outra alternativa seria usar núcleos específicos de materiais ferromagnéticos para elevar a indutância e, conseqüentemente, as reatâncias. Diante da inviabilidade de se trabalhar com indutores muito grandes e da dificuldade em se obter núcleos ferromagnéticos para estes ensaios, os testes são realizados com estes indutores de baixa reatância. A Figura 37 apresenta o indutor de 346 mH, construído para esse ensaio.



Figura 37 - Indutor de 346 mH.

Os três indutores são inseridos no circuito de modo análogo aos procedimentos adotados nos testes com os resistores e capacitores. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 38-40.

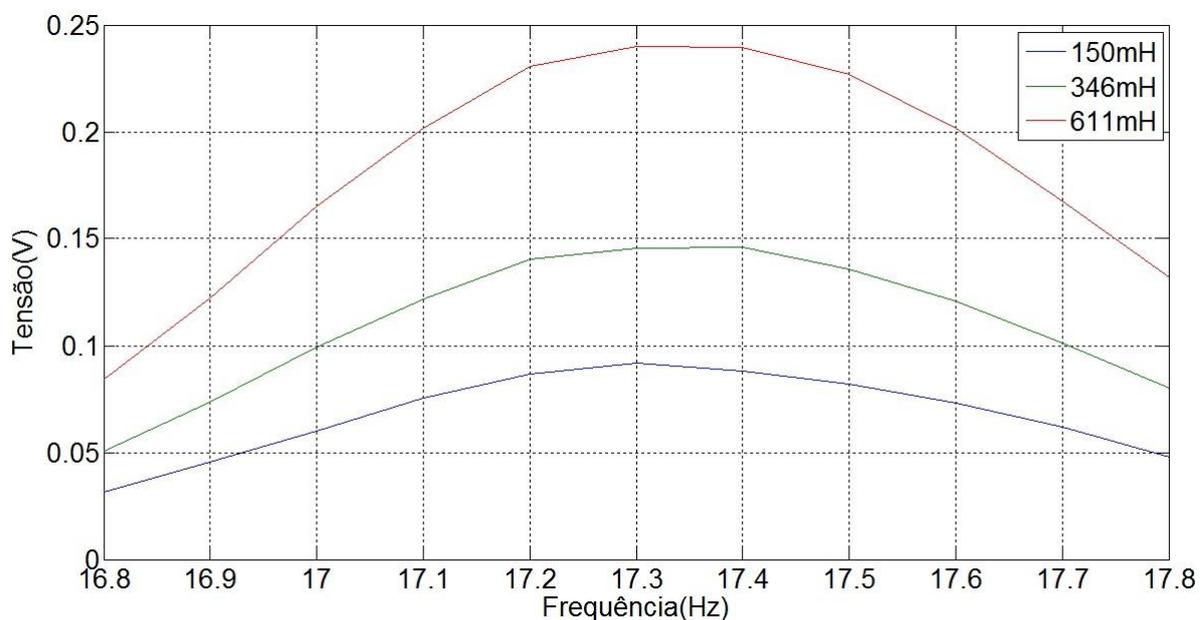


Figura 38 - Tensão elétrica gerada pela viga para os diferentes indutores.

Observa-se que a tensão obtida com os indutores é bem menor do que a tensão avaliada com os resistores e capacitores. No entanto, deve-se considerar que a ordem de grandeza das reatâncias indutivas é de $10^1 \Omega$, enquanto que para os resistores e capacitores a ordem de grandeza é $10^3 \Omega$.

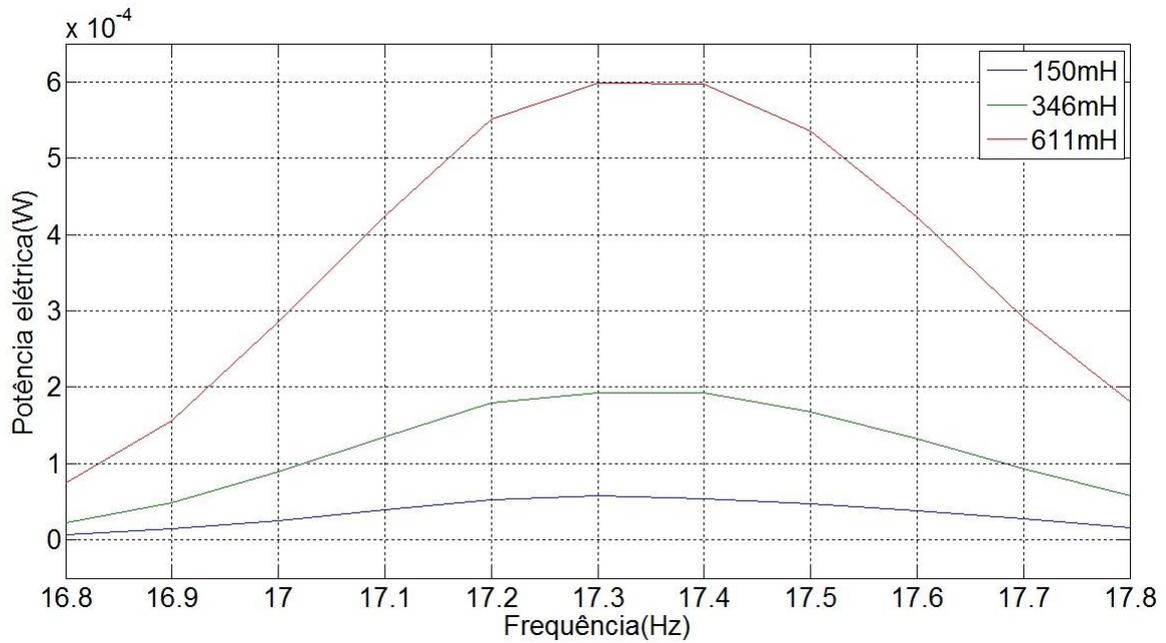


Figura 39 - Potência elétrica gerada pela viga para os diferentes indutores.

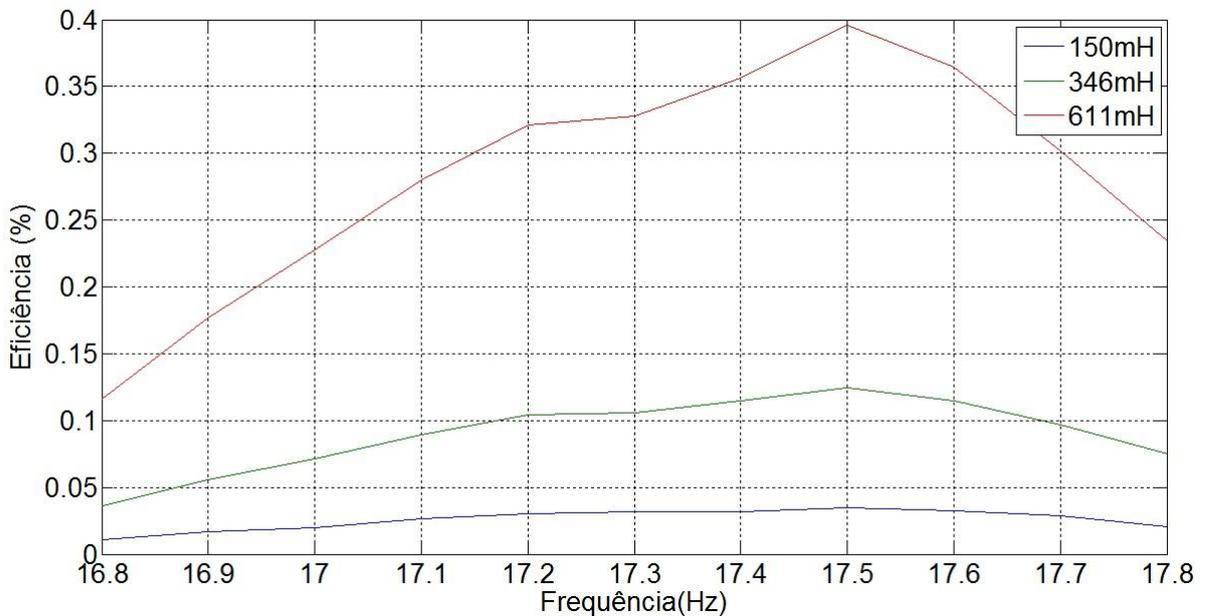


Figura 40 - Eficiência para os diferentes indutores.

Como o ângulo de fase entre a tensão gerada e corrente elétrica do circuito é pequeno, a potência elétrica gerada com o uso dos indutores apresenta-se mais elevada do que a potência elétrica obtida com os capacitores e menor do que a potência elétrica obtida com os resistores. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na frequência de ressonância para os três indutores. Vale ressaltar que, embora as reatâncias indutivas sejam inferiores às reatâncias capacitivas, a eficiência obtida com os indutores é praticamente 11 vezes maior do que a eficiência obtida com os capacitores.

Tabela 4 - Resultados obtidos para as três indutâncias observadas.

Amplitude (mm)	FreqRess (Hz)	Indutância (mH)	Tensão (V)	Potência Mecânica (mW)	Potência Elétrica (mW)	Eficiência (%)
1,00	17,30	150	0,09	182,49	0,06	0,03
1,00	17,30	346	0,15	182,49	0,20	0,11
1,00	17,30	611	0,24	182,49	0,60	0,33

Estudo do ângulo de fase entre a tensão elétrica e corrente elétrica e comparações dos resultados obtidos com circuitos RC, RL e RLC

Nesta etapa, compara-se a resposta da viga ao ser associada a diferentes circuitos: resistivo (R); resistivo - capacitivo (RC); resistivo – indutivo (RL); e resistivo – indutivo – capacitivo (RLC) em série. Nesses testes, as impedâncias das cargas apresentam a mesma ordem de grandeza. A Tabela 5 apresenta os valores das cargas associadas ao circuito, que é conectado ao terminal AB da Figura 22.

Tabela 5 - Cargas utilizadas nos diferentes circuitos.

Circuitos	Resistência (Ω)	Capacitância (μF)	Indutância (mH)
R	80	0	0
RC	80	68	0
RL	80	0	346
RLC-A	80	68	150
RLC-B	80	68	346

Durante os testes, além da tensão gerada, da potência elétrica e da eficiência, é observado o ângulo de fase ϕ entre a tensão elétrica e a corrente elétrica do circuito em cada situação. O objetivo é verificar a influência desse ângulo na tensão gerada, na potência elétrica e na eficiência do sistema.

Uma carga puramente resistiva, instalada em um circuito alimentado por uma fonte de corrente alternada, não interfere no ângulo de fase entre a tensão e corrente elétrica. Dessa forma, elas permanecem em fase. Contudo, quando um capacitor ou indutor estão inseridos nesse circuito, a tensão e corrente elétrica defasam-se. Para o capacitor, a corrente elétrica está adiantada em relação à tensão. Com o indutor, a corrente elétrica atrasa-se em relação à tensão elétrica. Essa defasagem altera a potência elétrica gerada, conforme as equações 4.11 e 4.12, e modifica a eficiência do sistema.

A viga piezelétrica utilizada neste trabalho apresenta uma capacitância de aproximadamente 25,8 nF e uma resistência elétrica da ordem de $10^8 \Omega$, embora esses parâmetros variem de acordo com o forçamento e deformação da viga. Estima-se que a defasagem da tensão e corrente elétrica produzidas pela impedância da viga seja muito pequena, tendo em vista esses valores de resistência e capacitância.

Dessa forma, a defasagem encontrada nos ensaios deve-se as cargas resistivas e reativas inseridas no circuito elétrico. As Figuras 41 a 45 apresentam a defasagem entre a tensão e a corrente elétrica para cada tipo de circuito analisado.

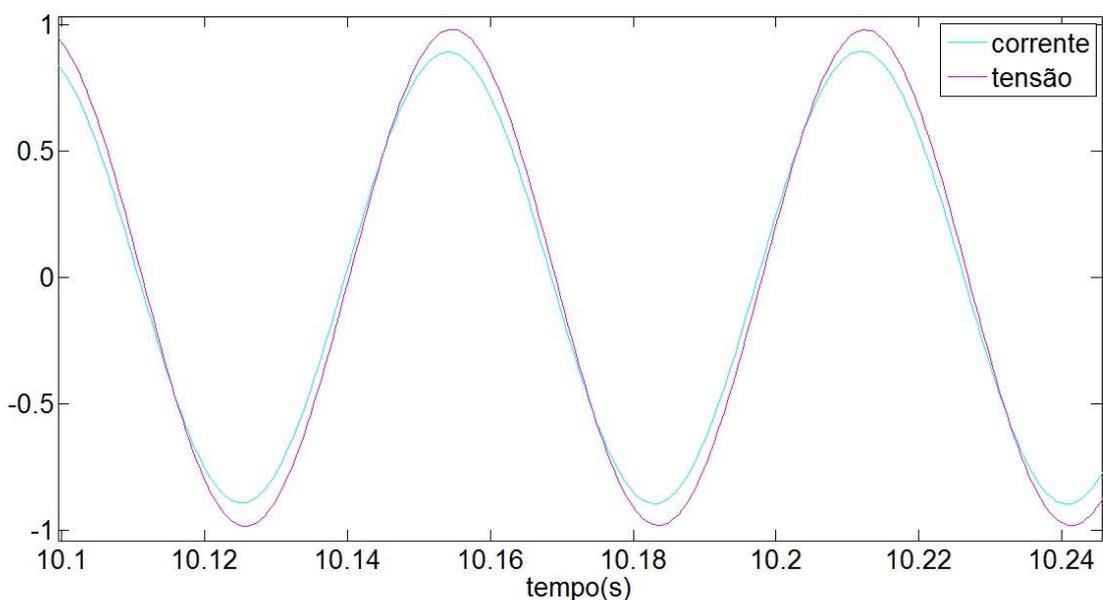


Figura 41 - Ângulo de fase entre a tensão e corrente elétrica apenas com resistor.

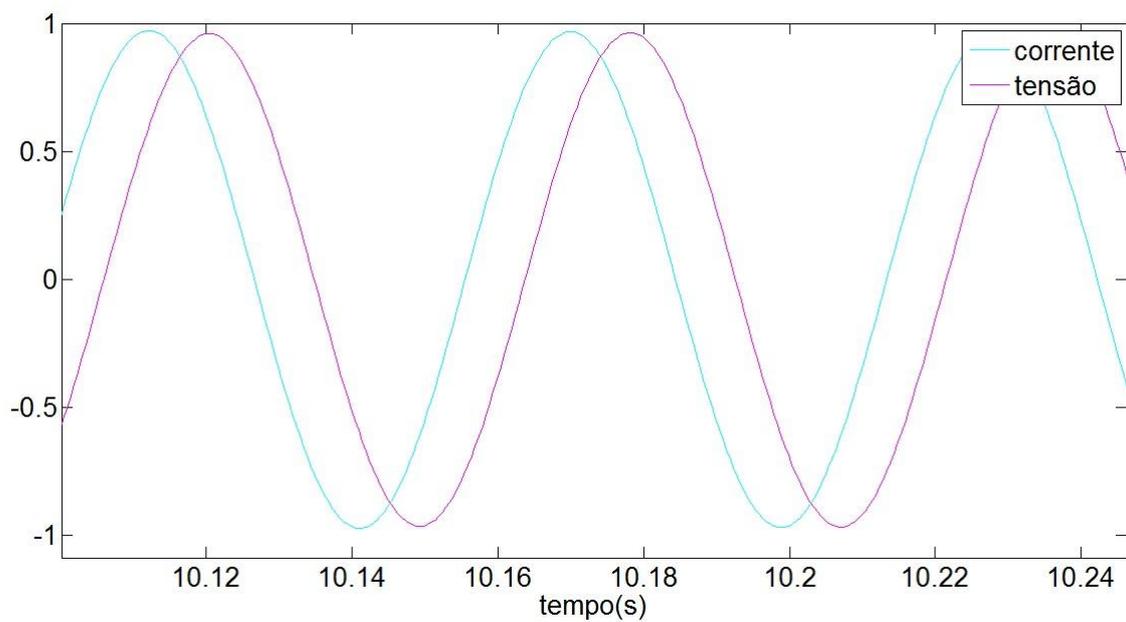


Figura 42 - Ângulo de fase entre a tensão e corrente elétrica no circuito RC.

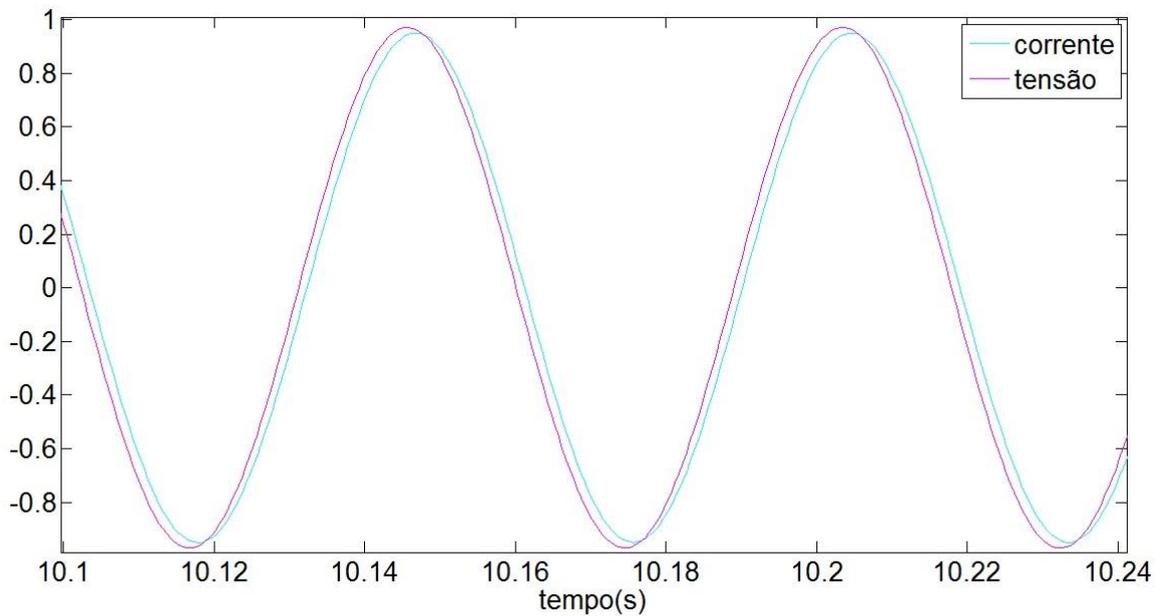


Figura 43 - Ângulo de fase entre a tensão e corrente elétrica no circuito RL.

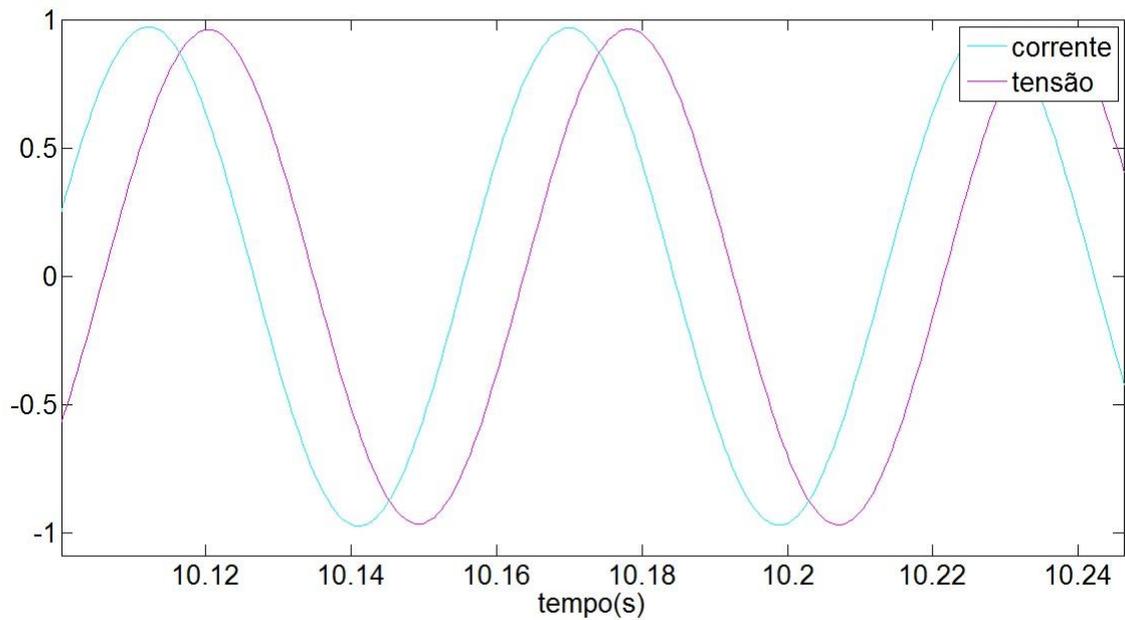


Figura 44 - Fase entre a tensão elétrica e a corrente para o circuito RLC-A com o indutor de 150 mH.

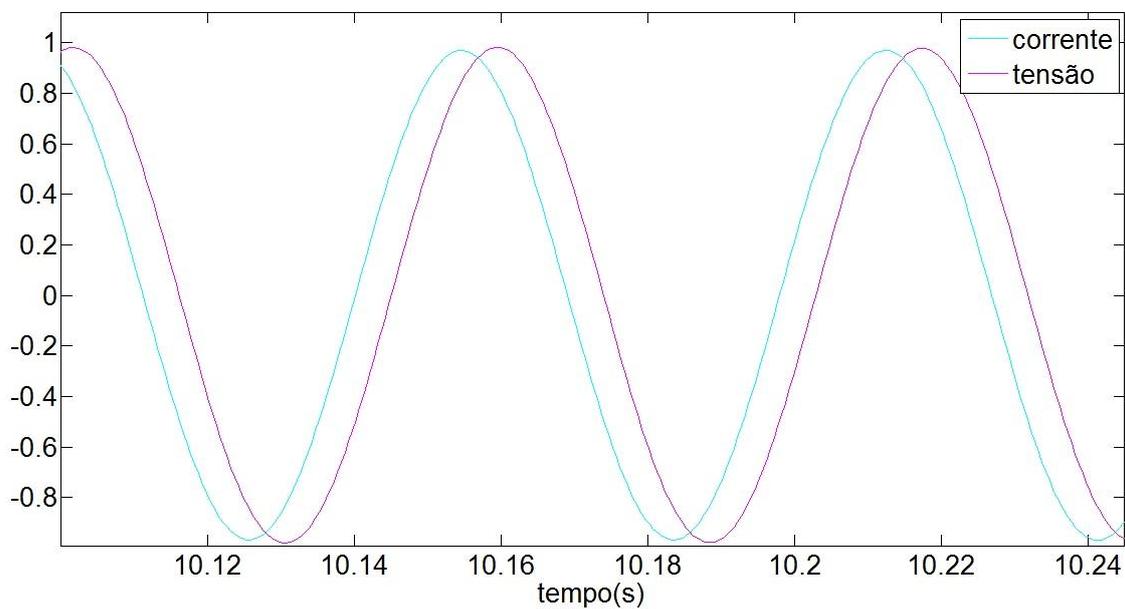


Figura 45 - Fase entre a tensão elétrica e a corrente para o circuito RLC-B com o indutor de 346mH.

A partir das Figuras 44 e 45 observa-se que a variação da carga indutiva do circuito RLC promove uma alteração na fase entre a tensão elétrica e a corrente em relação ao

circuito RC. Há uma compensação entre as reatâncias indutivas e capacitivas, resultando na diminuição da defasagem entre a tensão e corrente elétrica. As Figuras 46 a 48 apresentam os resultados obtidos para tensão elétrica gerada, potência elétrica e eficiência, para cada circuito avaliado. Enquanto a Figura 49 apresenta o comportamento do ângulo de fase entre tensão e corrente.

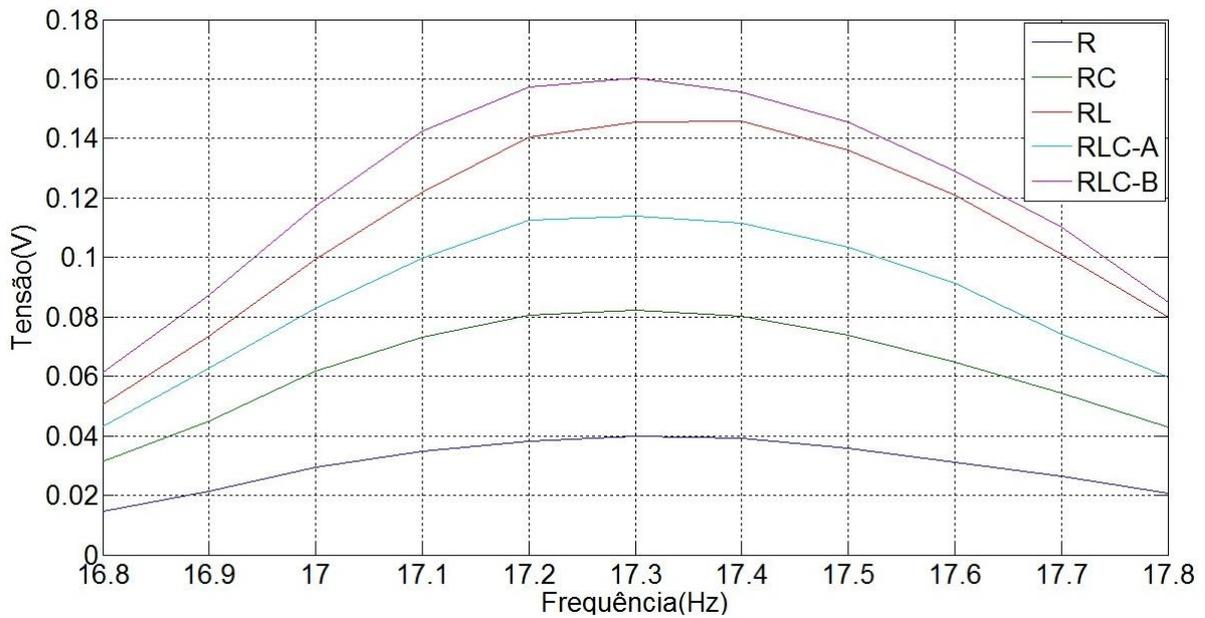


Figura 46 - Tensão elétrica versus a frequência para os circuitos R, RC, RL, RLC-A e RLC-B.

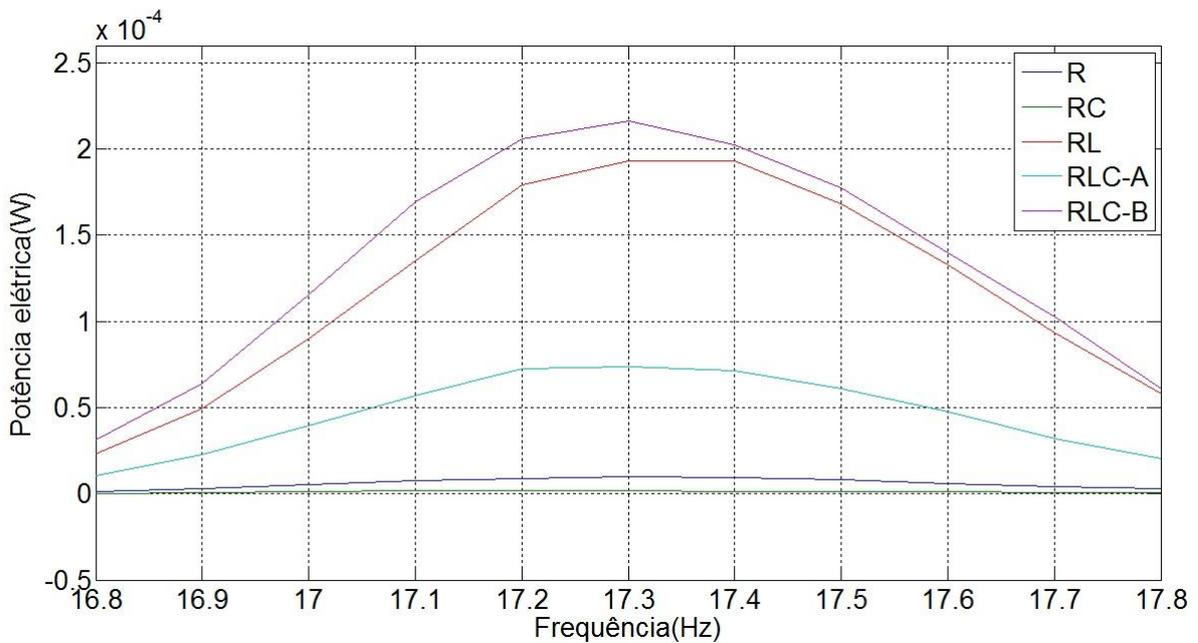


Figura 47 - Potência elétrica versus a frequência para os circuitos R, RC, RL, RLC-A e RLC-B.

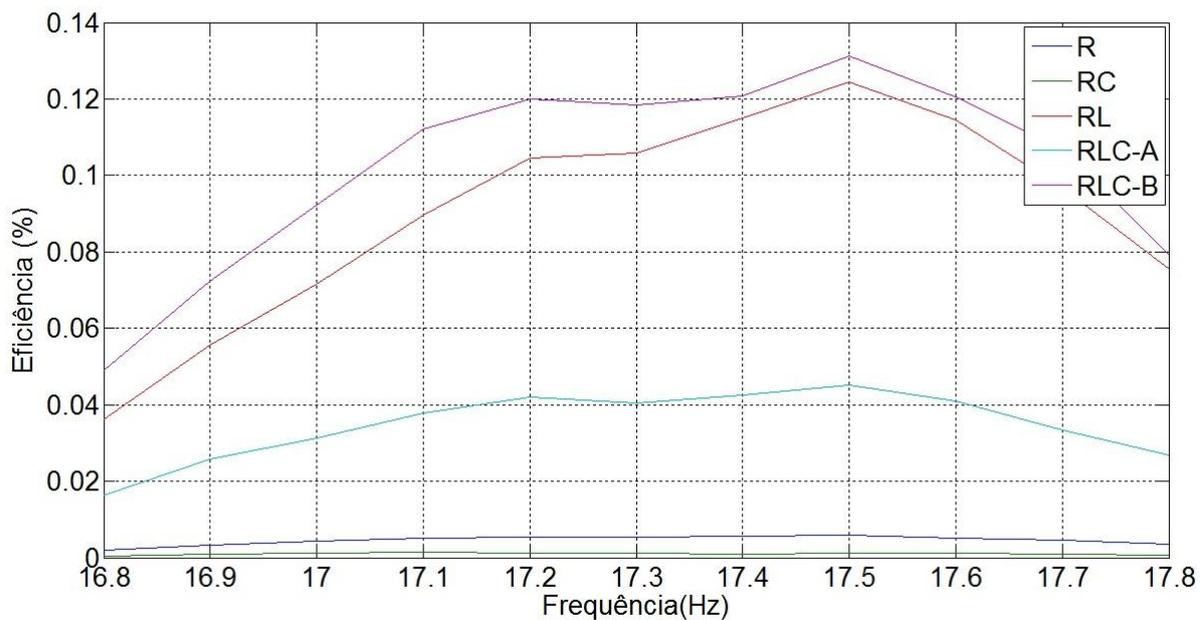


Figura 48 – Eficiência versus a frequência para os circuitos R, RC, RL, RLC-A e RCL-B.

Nas Figuras 47 e 48 observa-se que a maior potência elétrica gerada e a maior eficiência estão relacionadas ao circuito RLC-B. Um dos fatores para esse resultado é o ângulo de fase entre a tensão elétrica e a corrente elétrica.

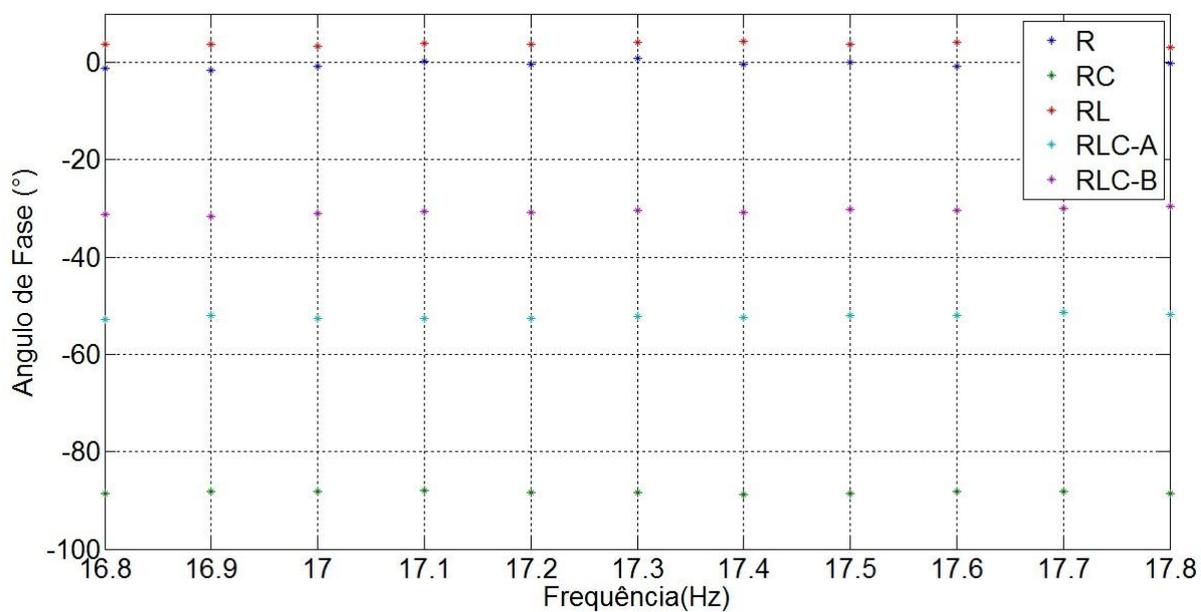


Figura 49 - Ângulo de fase entre a tensão e a corrente elétrica para os circuitos acoplados à viga.

A Tabela 6 apresenta as comparações dos resultados obtidos na frequência de ressonância para os cinco circuitos considerados.

Tabela 6 - Resultados para os circuitos R, RL, RC e RLC A e B.

Circuito	FreqRess. (Hz)	Tensão(V)	Potência Mecânica (mW)	Potência Elétrica (mW)	Eficiência (%)	Ângulo de Fase $V \times i$ (°)
R	17,3	0,04	182,49	0,001	0,005	0,772
RC	17,3	0,08	182,49	0,002	0,001	-88,3
RL	17,3	0,15	182,49	0,193	0,110	4,12
RLC A	17,3	0,11	182,49	0,074	0,040	-52,3
RLC B	17,3	0,16	182,49	0,216	0,118	-30,5

É interessante frisar que, embora a tensão elétrica e a corrente estejam em fase no circuito puramente resistivo, a tensão e potência elétrica ainda são menores em comparação com os resultados obtidos quando ocorre a inserção do indutor no circuito.

O indutor é um dispositivo capaz de armazenar energia na forma de campo magnético. Esse dispositivo opõe-se a variação do campo magnético e, conseqüentemente, a variação da corrente elétrica. Essa reação é responsável pela elevação da tensão elétrica em todo o sistema. Os capacitores também armazenam energia com o acúmulo de cargas elétricas entre suas placas. Essa energia é armazenada na forma de um campo elétrico.

A viga piezelétrica, como uma fonte de corrente alternada, fornece uma tensão elétrica para o circuito que altera sua polaridade constantemente. Isso faz com que a corrente elétrica do circuito inverta o sentido, segundo a frequência de oscilação. Por sua vez, o campo magnético do indutor, que possui energia armazenada, altera o seu sentido. Essa mudança do campo magnético do indutor faz com que ele descarregue a energia armazenada no circuito. Como o circuito recebe a energia elétrica proveniente da viga piezelétrica e a energia reativa do indutor, devolvida durante a inversão do sentido da corrente, ocorre um aumento na energia de todo o sistema. O resistor associado ao indutor dissipa parte dessa energia por meio do aquecimento. No entanto, como esse processo se repete, mesmo com a dissipação de energia elétrica na forma de calor, percebe-se a elevação da energia elétrica no circuito.

Isso também ocorre com o circuito RLC. Todavia, o indutor e o capacitor trocam energia entre si durante as variações de sentido da corrente elétrica. Essa troca de energia

entre o capacitor e indutor, somada ao constante fornecimento de tensão elétrica pela viga ao circuito, durante as oscilações, eleva a energia do circuito acoplado à viga, mesmo ocorrendo à dissipação de energia no resistor por efeito joule. Consequentemente, em relação ao circuito RL, a eficiência do circuito RLC é maior.

É evidente que o ângulo de fase entre a tensão e corrente produz variações na potência elétrica. Contudo, como visto nas Figuras 46 a 49, e considerando que o circuito RL e RLC-B possuem a mesma indutância de 346 mH, embora o ângulo de fase do circuito RL seja mais próximo de 0° , a combinação RLC-B é mais eficiente, pois as trocas de energia entre o indutor e o capacitor favoreceram o aumento da energia no circuito.

8. CONCLUSÕES

Os materiais piezelétricos são uma classe de materiais inteligentes que possuem acoplamento eletromecânico, portanto, são capazes de converter energia mecânica em energia elétrica, pelo efeito piezelétrico direto, ou transformar a energia elétrica em energia mecânica, pelo efeito piezelétrico inverso. Neste trabalho explora-se o efeito piezelétrico direto, a partir da geração de energia elétrica em uma viga de MFC submetida a excitações harmônicas de base. Verifica-se, a partir de uma varredura inicial de 14 Hz a 22 Hz, que a primeira frequência de ressonância da viga é aproximadamente 17 Hz, pois nessa frequência a tensão elétrica gerada é máxima e o ângulo de fase entre a força e velocidade das vibrações mecânicas aplicadas é mínimo.

Os ensaios que exploram a variação da amplitude de excitação de base mostram que o aumento das amplitudes produz o aumento na energia elétrica gerada, pois quanto maior a amplitude de oscilação maior é a deformação da viga. A eficiência, no entanto, mantém-se entre 0,30% a 0,33%, visto que, com o aumento da amplitude de oscilação de base, os valores da velocidade das oscilações e da intensidade do forçamento aplicado pelo *shaker* são elevados, provocando a elevação da potência mecânica.

Os resultados obtidos com os resistores, para amplitude de excitação de base constante, mostram que a viga piezelétrica, quando acoplada a um circuito puramente resistivo, apresenta um aumento na geração de potência elétrica. Isso é evidenciado pelo aumento na tensão elétrica. Não obstante, a resistência elétrica não produz defasagem entre a tensão e corrente elétrica, assim, a eficiência do dispositivo alcança 1,03 %.

Os valores observados com os capacitores sugerem um aumento da tensão elétrica gerada na mesma faixa do aumento apresentado pelos três resistores observados. Contudo a potência elétrica avaliada no experimento com as reatâncias capacitivas é bem inferior, tendo em vista a defasagem entre corrente elétrica do circuito e a tensão elétrica gerada. Nesse caso, a eficiência máxima obtida é 0,011%.

Não foi possível obter indutores adequados à ordem de grandeza das resistências elétricas e reatâncias capacitivas. Por esta razão são utilizados três indutores de baixa indutância para avaliar os resultados decorrentes da inserção de um indutor no circuito acoplado ao dispositivo gerador piezelétrico. Os resultados com os indutores apresentam

tensões baixas, porém observa-se que a potência elétrica gerada é dez vezes maior do que a potência elétrica gerada com os capacitores. Essa diferença deve-se as baixas indutâncias, pois, além de influenciarem o valor da tensão elétrica, elas geram pequenas defasagens entre a corrente e a tensão elétrica gerada. A eficiência, quando comparada com aquela obtida com os capacitores, é maior.

Os testes realizados com os circuitos R, RC, RL e RLC mostram que a inserção de indutores no circuito acoplado à viga piezelétrica produz o aumento da tensão gerada e da potência elétrica. Todos os componentes resistivos e reativos apresentam valores de resistência e reatâncias próximos em ordens de grandeza. Os circuitos que usam indutores superam os resultados obtidos com o circuito puramente resistivo e resistivo - capacitivo. Mesmo com a defasagem entre a tensão e corrente elétrica produzida pelas cargas, observa-se a elevação da tensão elétrica gerada e da potência elétrica. Contudo, comparando-se o circuito RL com o circuito RLC-B, percebe-se que a tensão gerada por este é maior do que a gerada por aquele, e a eficiência do circuito RLC-B é aproximadamente 7,3 % maior do que a eficiência do circuito RL. Acredita-se que, se fossem inseridos no circuito indutores maiores, seria possível elevar ainda mais esses resultados, por causa da redução do ângulo de fase entre a corrente elétrica e a tensão gerada, aproximando-o ainda mais de 0° .

Esse aumento de energia observado no circuito RLC é resultado das trocas de energia que ocorrem entre o capacitor e indutor. Ambos os dispositivos armazenam energia em forma de campo elétrico e campo magnético, respectivamente. A inversão da polaridade produzida durante a oscilação da viga altera a polaridade no indutor e capacitor, havendo trocas de energia entre eles. Isso conduz a sucessivas cargas e descargas entre os dispositivos, havendo devolução da energia reativa ao circuito. Essa energia “devolvida” para o circuito é somada coma geração de eletricidade pela viga. Isso produz o aumento da energia elétrica que é observada na forma de maior tensão e maior potência elétrica.

Tendo em vista as limitações físicas dos indutores com elevadas indutâncias, torna-se difícil a utilização desses componentes em circuitos acoplados com vigas piezelétricas. Essa dificuldade justifica a adoção, pela literatura, de dispositivos emuladores de elevadas indutâncias, do uso técnicas de sintonização, chaveamento e casamento de impedâncias, capazes de melhorar a eficiência dos dispositivos “*Power Harvesting*” piezelétricos, tais como: conversores DC-DC (SAGGINI et al., 2010), técnicas SSHI (AMMAR e

BASROUR, 2006; DO et al.,2011), circuitos retificadores acionados por transistores MOSFET associados a indutores (MARINKOVIC et al., 2009; HEHN et al., 2009), condicionadores de comutação magnética associados a indutores (KWON e RICONMORA, 2009), técnicas de otimização não linear autossintonizadas - “*Synchronous Electric Charge Extraction*” (SECE)” associadas a indutores e capacitores (LEFEUVRE et al., 2006), conversores *Buck-busters* adaptadores de impedância (KONG et al., 2010).

Percebe-se, conforme sugere a literatura, que os materiais piezelétricos apresentam potencial aplicação como coletores da energia mecânica, presente no ambiente em forma de vibrações, convertendo-a em energia elétrica. Todavia, considerando as baixas tensões, modestas potências elétricas geradas, e pequenas eficiências, percebe-se que os dispositivos “Power Harvesting” piezelétricos são adequados como fonte de alimentação de dispositivos eletrônicos de baixo consumo energético, tais como sensores, dispositivos eletroeletrônicos e demais sistemas baseados na tecnologia MEMS.

A eficiência desses coletores e conversores de energia pode ser elevada se for realizado o adequado dimensionamento das cargas resistivas e reativas que são inseridas no circuito acoplado ao dispositivo piezelétrico. Esse dimensionamento pode ser associado a outras técnicas mecânicas não-lineares, capazes de melhorar ainda mais a eficiência do coletor de energia piezelétrico. O uso desses geradores piezelétricos pode ser capaz de tornar os dispositivos de baixo consumo energético e sistemas MEMS autônomos energeticamente.

8.1. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho investigou a geração de energia elétrica em uma viga piezelétrica quando excitada mecanicamente, avaliando-se a tensão, potência elétrica e eficiência do dispositivo *Power Harvesting*. Os experimentos observaram a resposta dinâmica da viga quando se variavam as amplitudes de oscilação de base, bem como os tipos e valores das cargas resistivas e reativas que compunham o circuito acoplado à viga.

Todavia, alguns efeitos não foram avaliados, tais como o amortecimento da amplitude de oscilação da viga produzido durante a geração de energia elétrica e as alterações nas características vibracionais da viga piezelétrica que constitui o dispositivo *Power Harvesting*, produzidas pelas cargas resistivas e reativas. Não obstante, também não se avaliou as possíveis modificações na energia elétrica gerada, quando as cargas resistivas

e reativas são inseridas no circuito acoplado à viga em associações paralelas. Esses pontos devem ser objetos de futuras observações.

Outra abordagem que será discutida em trabalhos futuros é referente à coleta, conversão, retificação e armazenamento da energia elétrica produzida por esses geradores piezelétricos. Como a tensão gerada é alternada, para que essa eletricidade tenha aplicações práticas é necessário retificá-la, pois, os dispositivos de pequena potência funcionam em corrente contínua. Portanto, será necessário avaliar os circuitos retificadores capazes de realizar essa tarefa. Circuitos constituídos por semicondutores (como diodos ou transistores) bem como suas configurações no circuito (meia onda, onda completa e em ponte) deverão ser investigados. Para o armazenamento será interessante considerar as baterias recarregáveis, bem como o uso de capacitores.

A eficiência desses coletores e conversores de energia pode ser aumentada se for realizado o adequado dimensionamento das cargas resistivas e reativas que são inseridas no circuito acoplado ao dispositivo piezelétrico. Esse dimensionamento pode ser associado a outras técnicas mecânicas não-lineares, capazes de melhorar ainda mais a eficiência do coletor de energia piezelétrico. Propõe-se dar continuidade a essa investigação, avaliando-se numericamente e experimentalmente a aplicação da energia elétrica gerada pelos dispositivos “*Power harvesting*” em sensores e sistemas de baixo consumo energético, baseados na tecnologia MEMS. Esse estudo poderá prover a utilização de materiais piezelétricos como substitutos das baterias usuais, utilizadas na alimentação desses dispositivos, garantindo a eles a autonomia energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMMAR, Y.; BASROUR, S. **Non-linear Techniques for Increasing Harvesting Energy from Piezoelectric and Electromagnetic Micro-Power Generators**. Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS DTIP. Stresa, Lago Maggiore, Italy: [s.n.]. 2006.

ANDOSCA, R; MCDONALD, T. GUS; GENOVA, VICENT; ROSENBERG, STEVEN; KEATINGD, JOSEPH; BENEDIXEN, COLE; WU, JUNRU. Experimental and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 178, p. 76-87, mAY 2012.

ANTON, S. R.; SODANO, H. A. A review of power harversting using piezoelectrics materials (2003-2006). **Smart Materials and Structures**, v. 16, n. 3, p. 1-21, May 2007.

ARGABRITE, G. A. **Electrostrictive Translator**. US 2478223. Aug 02,1949., 02 August 1949.

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

BISCHUR, E.; SCHWESINGER, N. **Energy Harvesting in floors**. Proceedings Power MEMS. Leuven, Belgium: [s.n.]. Novembre/December 2010. p. 387-390.

CHOU, S. K; YANG, W. M; CHUA, K. J; LI, J; ZHANG, K.L. Development of micro power generators - A review. **Aplied Energy**, v. 88, n. 1, p. 1-16, january 2011.

COTTONE, F; GAMMAITONI, L.; VOCCA, H.; FERRARI, M.; FERRARI, V. Piezoelectric buckled beams for random vibration energy harvesting. **Smart Materials and Structures**, v. 21, p. 1-12, Febraury 2012. ISSN 3.

DO, XUAN-DIEN; KO, YOUNG-HUN; NGUYEN, HUY-HIEU; LE, HUY-BINH; LEE, SANG-GUG. **An efficient parallel SSHI rectifier for piezoelectric energy scavenging systems**. 13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Phoenix Park, Korea (South): IEEXplore. 2011. p. 1394-1397.

ERTURK, A. Piezoelectric energy harvesting for civil infrastructure system applications: Moving loads and surface strain fluctuations. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 22, n. 17, p. 1959-1973, November 2011.

FERRARI, M.; FERRARI, VITTORIO; GUIZZETTI, MICHELE; ANDÒ, BRUNO; BAGLIO, SALVATORI; TRIGONA, CARLO. Improved Energy Harvesting from Wideband Vibrations by Nonlinear Piezoelectric Converters. **Procedia Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 1203-1206, september 2009.

FLATAU, A. B.; CHONG, K. P. Dynamic smart material and structural systems. *Engineering Structures*, Volume 24, v. 24, n. 3, p. 261-270(10), March 2002.

GALHARDI, M. A.; GUILHERME, T. H.; JÚNIOR, V. L. **A Review of Power Harvesting on Mechanical Vibration**. 7th Brazilian Conference on Dynamics, COntrol and Aplications. Presidente Prudente, São Paulo: [s.n.]. 2008. p. 1-9.

GKOUMAS, K.; GAUDENZI, O. D.; PETRINI, F. Energy Harvesting applications in transportation infrastructure networks. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 48, n. issue especial Transport Research Arena 2012, p. 1097–1107., 2012.

HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. **Renewable Energy**, v. 36, n. 10, p. 2641–2654, October 2011.

HEHN, T.; HAGEDORN, F.; MANOLI, Y. Highly Efficient Energy Extraction from Piezoelectric Generators. **Procedia Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 1451-1454, September 2009.

HO, W. H. **Piezoeletric Energy Converter for Electronic Implants**. US 3456134, 15 July 1969.

HOFFMAN, J. D. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. Second Edition. ed. New York: Marcel Dekker Inc, 2001. ISBN Hoffman, Joe D. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. Second Edition, Marcel Dekker Inc, New York, 2001..

HOWELLS, C. A. Piezoelectric energy harvesting. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 7, p. 1847-1850, July 2009.

JEON, Y. B; SOOD, R.; JEONG, J.-H.; KIM, S.-G. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 122, n. 1, p. 16-22, july 2005.

KANNO, I; SAGAWA, K.; OKA, R.; KOTERA, H.; OGAWA, J.; YAMAUCHI, N.; AIZAWA, K.; MATSUSHIMA, T. Piezoelectric Energy Harvesters of PZT films deposited on Titanium Cantilevers. Proceedings Power MEMS. Leuven, Belgium: [s.n.]. 2010. p. 379-382.

KATZIR, S. The Discovery of the Piezoelectric Effect. Archive for History of Exact Sciences, v. 57, n. 1, p. 61-91, JANUARY 2003.

KATZIR, SHAUL. The Beginnings of piezoelectricity: A Study in Mundane Physics. Boston Studies in Philosophy of Science, v. 246, Holanda, 2006.

KONG, NA; HA, DONG SAM; ERTURK, ALPER; INMAN, DANIEL J. Harvesting, Resistive Impedance Matching Circuit for Piezoelectric Energy. Journal of **Intelligent Material Systems and Structures**, v. 21, n. 13, p. 1293-1302, september 2010.

KWON, D.; RINCON-MORA, G. A. A Rectifier-Free Piezoelectric Energy Harvesting Circuit. **IEEE International Symposium on Digital Object Identifier**, p. 1085-1088, May 2009.

LEFEUVRE, E; BADEL, A; RICHARD, C; GUYOMAR, D; PETIT, L. Petit. **Optimization of piezoelectric electrical generators powered by random vibrations**. Symposium Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS. Stresa, Lago Maggiore, Italy: [s.n.]. 2006.

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

LIU, J.-Q; Fang, HUA-BIN; XU, ZHENG; MAO, XIN-HUI; SHEN, XIU-CHENG; CHEN, DI; LIAO, HUANG; CAI, BING-CHU. A MEMS based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting. **Microelectronics Journal**, v. 39, n. 5, p. 802-806, may 2008.

MARINKOVIC, D; FREY, ALEXANDER; KUEHNE, INGO; SCHOLL, GERD. A New Rectifier and Trigger Circuit for a Piezoelectric Microgenerator. **Procedia Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 1447-1450, September 2009.

- MINAZARA, E.; VASIC, D.; COSTA, F. **Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable**. International Conference on Renewable Energier and Power Quality. Santander: [s.n.]. 2008. p. 1-6.
- MURALT, P; MARZENCKI, M; BELGACEM; CALAME, F; BASROUR, S. Vibration Energy Harvesting with PZT Micro Device. **Procedia Chemistry**, v. 1, n. 1, p. 1191-1194, September 2009.
- PANWAR, N.L; KAUSHOKB, S. C.; KOTHARIA, SURENDRA. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.15, n. 03, April 2011, p. 1513–1524.
- PEREIRA, A.H.A. Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades. ATCP Engenharia Física, ww.atcp.com.br, março de 2010.
- POIZOT, P.; DOLHEM, F. Clean energy new deal for a sustainable world: from non-CO2 generating energy sources to greener electrochemical storage devices. **Energy & Environmental Science**, v. 4, n. 6, p. 2003-2019, 2011.
- PRIYA, SHASHANK; INMAN, DANIEL J. *Energy Harvesting Technologies*. Springer Science & Business Media – LLC, New York, USA, 2009.
- RAMADASS, YOGESH K.; CHANDRAKASAN, ANANTHA P. An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v.45, n.1, January 2010, p.189-204.
- RENNO, J. M.; DAQAQ, M. F.; INMAN, D. J. On the optimal energy harvesting from a vibration source. **Journal of Sound and Vibration**, v. 320, n. 1-2, p. 386-405, February 2009.
- RICART, T; DEFAY, E; ABERGELI, J.; RASCLE, A; RHUN, G.L.; LASSAGNE, P.; PERRUCHOT, F; AID, M. **Cantilers with piezoelectric thin films for weakly vibrating environment**. Proceedings Power MEMS. Leuven, Belgium: [s.n.]. 2010. p. 83-86.
- ROCHA, J. G.; GONÇÁLVES, P.F.; ROCHA, P. F.; SILVA, M. P.; LANCEROS, S. Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 57, n. 3, p. 813-819, March 2010.

ROUNDY, S.; WRIGTH, P. K.; RABAEY, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Computer Communications*, v. 26, p. 1131-1144, 2003.

ROUNDY, S.; LELAND, E. S.; BAKER, J.; CARLETO, E.; REILLY, E.; LAI, E; OTIS, B.; RABAEY, J. M.; WRIGHT, P. K.; SUNDARARAJAN, V. Improving power output for vibration-based energy scavengers. **IEEE Pervasive Computing**, v. 4, n. 1, p. 28-36, march 2005.

SAGGINI, S; GIRO, S.; ONGARO, F.; MATTAVELLI, P. **Implementation of Reactive and Resistive Load Matching for Optimal Energy Harvesting from Piezoelectric Generators**. IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Colorado, USA: [s.n.]. 2010. p. 1-6.

SCHWARTZ, MEL. *Encyclopedia of Smart Materials*. v.1,2. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA, 2002.

SCHWARTZ, MEL .*Smart materials*. Boca Raton, Flórida, USA: Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

SHENCK, N. S.; PARADISO, J. A. Energy Scavenging eith shoe-mounted piezoelectrics. **Micro - IEEE**, v. 21, n. 3, p. 30-42, May/Jun 2001.

SHEN, DONGNA. *Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Low Frequency Vibration Applications*. 194p. Tese (Doutorado em Filosofia) - Auburn University, Alabama, 2009.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting. **Strain Journal**, v. 40, n. 2, p. 49-58, May 2004.

SODANO, H. A.; PARK, G.; INMAN, D. J. An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications. **Mechanical Systems and Signal Precessing**, v. 18, n. 3, p. 683-697, May 2004.

SZARKA, G. D.; STARK, B. H.; BURROW, S. G. Review of Power Conditioning for kinetic Energy Harvesting Systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 2, p. 803-815, February 2012.

TRÄNKLER, H.-R.; KANOUN, O. **Recent Advances in Sensor Technology**. Instrumentation and Measurement Technology Conference. Budapest, Hungary: IEEE. 2001.

TRIPLETT, A.; QUINN, D. D. The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, p. 1959-1967, November 2009. ISSN 16.

TURNER, J; AHMED, MARUF N.; HA, DONG SAM; MATTAVELLI, PAOLO. A new approach to the wide bandwidth of piezoelectric transducers for vibration energy harvesting. **IEEE 55th international Midwest Symposium**. Boise, Idaho - USA: [s.n.]. 2012. p. 1064-1067.

VULLERS, R. J. M; SCHAIJK, R. VAN; DOMS, I.; HOOH, C. VAN; MERTENS, R. Micropower energy harvesting. **Solid-State Electronics**, v. 53, n. 7, p. 684-693, July 2009.

YANG, J. **Advances in Mechanics and Mathematics: An Introduction to the Theory of Piezoelectricity**. New York: Springer, v. 9, 2005.

YE, G; YAN, JIZE; WONG, ZI JING; SOGA, KENICHI; SESHIA, ASHWIN. **Optimisation of a Piezoelectric System for Energy**. International Ultrasonics Symposium (IUS). Roma, Italy: IEEEExplore. 2009. p. 759-762.

ZHU, M.; WORTHINGTON, E.; NJUGUNA, J. Analyses of Power Output of piezoelectric Energy Harvesting Devices Directly Connected to a Load Resistor Using a Coupled Piezoelectric Circuit Finite Element Method. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control.**, v. 56, n. 7, July 2009.

APÊNDICES

CÁLCULO DAS REATÂNCIAS

-REATÂNCIA CAPACITIVA

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

-REATÂNCIA INDUTIVA

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

IMPEDÂNCIA ELÉTRICA (Z)

-FORMA RETANGULAR:

$$Z = R + (X_C + X_L)i$$

-MÓDULO DA IMPEDÂNCIA:

$$\rho = \sqrt{R^2 + (X_C + X_L)^2}$$

-ÂNGULO DE FASE:

$$\phi = \text{sen}^{-1} \left[\frac{(X_C - X_L)}{\rho} \right]$$

DIAGRAMA DE BLOCOS (ROTINA) LABVIEW 2009

