



PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE
MATERIAL PIEZELÉTRICO EM SENSORES
AUTO-ALIMENTADOS**

Por,
Daniel Silvério Campetti Nieto

Brasília, 4 de dezembro de 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

ESTUDO DA VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAL PIEZELÉTRICO EM SENSORES AUTO-ALIMENTADOS

POR,

Daniel Silvério Campetti Nieto

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof.^a Aline Souza de Paula, UnB/ ENM (Orientadora)

Prof. Marcus Vinicius Girão De Moraes, UnB/ ENM (Coorientador)

Prof. Fernando Jorge Rodrigues Neves, UnB/ ENM

Brasília, 4 de dezembro de 2013

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, que sempre esteve do meu lado durante os anos de minha vida.

Agradeço aos meus pais, Jose Augusto e Leci, por serem o meu exemplo de vida, por terem me apoiado durante toda a minha caminhada da graduação e por entenderem as horas de minha ausência nos anos de curso. Agradeço à minha irmã, Jaqueline, e meu irmão, Fabiano, por me incentivar a seguir em uma vida de estudo e dedicação. Também agradeço aos meus Avós, Agustin e Maria Rosa, e minha Tia Cristina, por sempre cuidarem de mim nesses cinco anos em Brasília.

Agradeço a minha orientadora, Prof. Aline de Paula, por acreditar no meu trabalho, por me ajudar neste difícil caminho e pela disposição durante estes anos de trabalho. Agradeço também ao Prof. Marcus Girão pelas ideias e ajuda nos experimentos.

Agradeço aos funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, em especial ao técnico Felipe que contribuiu para a parte prática de minha formação.

Agradeço aos meus amigos do laboratório de vibrações: Wesley, Vander, Hugo, Rafael Melo pela força e ajuda no laboratório.

Daniel Silverio Campetti Nieto

RESUMO

A tecnologia de coletores de energia a partir do efeito piezométrico tem recebido grande atença3o de pesquisadores nas ultiimas d3cadas. Neste contexto, uma aplica3ao que apresenta potencial consiste em alimentar dispositivos de baixa pot3ncia, tais como sensores. O conceito de coleta de energia utilizando vigas piezométricas refere-se 3 convers3o de energia presente no ambiente, na forma de vibra3ao, em energia el3trica. Essa convers3o 3 possivel a partir do efeito piezométrico direto, que consiste na produ3ao de uma carga el3trica em decorr3ncia de uma deforma3ao mec3nica imposta ao material. Esse trabalho apresenta uma an3lise da gera3ao de energia el3trica de tr3s vigas piezométricas quando acopladas a diferentes circuitos el3tricos e sujeitas a um for3amento harm3nico de base. Analisa-se tamb3m o potencial das vigas em carregar uma bateria. Com essa an3lise avalia-se a possibilidade das vigas estudadas alimentar um sensor sem fio. Busca-se ainda definir uma modelagem simplificada para o circuito interno da viga piezométrica.

Palavras-chave: Viga piezométrica, coleta de energia, MFC, PZT, sensor sem fio.

ABSTRACT

Energy harvesting technology using piezoelectric materials has gained a lot of attraction in the last decades. In this context, a potential application consists in the supply of low power device, such as sensors. Energy harvesting using piezoelectric materials consists in the conversion of mechanical energy, present in the ambient in the form of vibrations, into electrical energy. This conversion is possible due to direct piezoelectric effect, where piezoelectric materials produce a distribution of electric charges on their surfaces when subjected to external mechanical loads. This work addresses an experimental investigation of the power harvesting performance of piezoelectric MFC and PZT beams when coupled to different electrical circuits and subjected to harmonic base excitation.

Keywords: Piezoelectric beam, Power Harvesting, MFC, PZT wireless sensor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	2
2. MATERIAIS PIEZELÉTRICOS	3
2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MATERIAIS PIEZELÉTRICOS	3
2.2. MATERIAIS PIEZELETRICOS UTILIZADOS	7
3. ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SENSORES SEM FIO AUTO ALIMENTADOS	9
4. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL E DE ANÁLISE DOS DADOS	16
4.1 APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	16
4.2 DIVISOR DE TENSÃO	18
4.3 ÂNGULO DE FASE	21
4.4. RETIFICAÇÃO DE FONTES AC.....	23
4.5. CARREGAMENTO DE BATERIAS	24
4.6 DETERMINAÇÃO DO AMORTECIMENTO	24
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	26
5.1. INFLUÊNCIA DO MATERIAL PIEZELETRICO NO SUBSTRATO	26
5.2. EXPERIMENTO 1 – VARREDURA DA FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO	31
5.3. EXPERIMENTO 2 – MODIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA EXTERNA.....	33
5.4. EXPERIMENTO 3 – RETIFICAÇÃO DA TENSÃO.....	35
5.5. EXPERIMENTO 4 – CARREGAMENTO DE BATERIAS	37
5.6. EXPERIMENTO 4 – DESCARGA DAS BATERIAS	39
6. PROPOSTAS DE MODELO PARA O CIRCUITO INTERNO DA VIGA	42
6.1. SIMULAÇÕES COM CIRCUITO PURAMENTE RESISTIVO.....	42
7. CONCLUSÃO	46
7.1 TRABALHOS FUTUROS	47
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
9. ANEXOS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação do efeito direto no material piezelétrico.....	3
Figura 2.2 - Representação esquemática da viga piezelétrica.	4
Figura 2.3 - Esquema da coleta de energia utilizando material piezelétrico.	5
Figura 2.4 - Detalhes da estrutura da viga piezelétrica de MFC..	5
Figura 2.5 - Tipos de modos de acoplamento.....	6
Figura 2.6 - Sensor wireless alimentado por uma viga piezelétrica.	7
Figura 2.7 - Viga de MFC.	7
Figura 2.8 - Viga de PZT.....	8
Figura 2.9 - Viga PZT 25w.	8
Figura 2.10 – Detalhes do interior da viga PZT 25w.	8
Figura 3.1 - Esquema de funcionamento de redes sem fio.....	9
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do dispositivo de transmissão sem fio.	10
Figura 3.3 - Foto do transmissor e do receptor <i>XBee ZB-Pro</i>	10
Figura 3.4 - Potência de alimentação para diferentes rádios transmissores.	11
Figura 3.5 - <i>Arduino Uno</i>	12
Figura 3.6 - <i>Arduino Nano</i>	12
Figura 3.7 – <i>Garagino</i>	12
Figura 3.8 - Tempo de vida em função da capacidade da bateria.	14
Figura 3.9 - Porcentagem acrescida no tempo de vida da bateria em função da capacidade da bateria.	14
Figura 3.10 - Tempo de vida da bateria em função da corrente produzida pela viga piezelétrica.	15
Figura 3.11 - Porcentagem acrescida no tempo de vida da bateria em função da corrente produzida pela viga piezelétrica.	15
Figura 3.12 - Tempo de vida da bateria em função do tempo em modo de baixo consumo.	15
Figura 3.13 - Porcentagem acrescida no tempo de vida da bateria em função do tempo em modo de baixo consumo.....	15
Figura 4.1 - Figura esquemática do experimento da viga piezelétrica acoplada a um circuito elétrico e sujeita a um forçamento de base.....	16
Figura 4.2 - Fluxograma do procedimento experimental	16
Figura 4.3 - Fixação entre o <i>shaker</i> e a viga piezelétrica.	17
Figura 4.4 - Bancada do Laboratório de Vibrações.....	17
Figura 4.5 - Diagrama do divisor de tensão	18
Figura 4.6 - Simulação exemplo do calculo de divisor de tensão para circuito RC	19
Figura 4.7 - Força e Velocidade em função do tempo	21
Figura 4.8 - Sinais de força e velocidade transformados em onda quadrada	22
Figura 4.9 - Força e Velocidade onda quadrada ampliada	22
Figura 4.10 - Esboço da Ponte retificadora.	23
Figura 4.11 - Circuito retificador montado na <i>Protoboard</i>	23
Figura 4.12 - Circuito para carregamento de baterias (Adaptado de Sodano, 2003).....	24
Figura 4.13 - Resultado do carregamento de uma bateria de 80mAh, 1.2V utilizando PZT	24
Figura 4.14 – Largura de banda a partir da FFT.....	25
Figura 5.1 - Procedimento experimental para determinação do módulo de elasticidade.	26
Figura 5.2 - Resultados das medidas de deflexão.....	27
Figura 5.3 - Substrato acoplado ao shaker.....	28
Figura 5.4 - Gráfico da FFT do deslocamento da viga com o MFC.....	29
Figura 5.5 - Gráfico da FFT do deslocamento da viga com o PZT	29
Figura 5.6 - Gráfico da FFT do deslocamento da viga com o substrato.....	29
Figura 5.7 - Comparação entre as três FFTs com amplitude de deslocamento de base de 1mm	29
Figura 5.8- FFT da tensão da viga de PZT	32
Figura 5.9 - FFT da tensão da viga de MFC.....	32
Figura 5.10 - Tensão em função da frequência de excitação para a viga PZT25w	32
Figura 5.11 - Tensão em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.	33
Figura 5.12 - Corrente elétrica em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.....	33

Figura 5.13 - Potência elétrica em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.	34
Figura 5.14 - Potência elétrica por cm ² em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.	34
Figura 5.15 - Força em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.	34
Figura 5.16 - Velocidade em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.	34
Figura 5.17 - Potência mecânica fornecida em função da resistência externa.	34
Figura 5.18 - Eficiência em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC	34
Figura 5.19 - Tensão DC em função da resistência externa.	35
Figura 5.20 - Corrente DC em função da resistência externa.	35
Figura 5.21 - Potência elétrica em função da resistência externa.	35
Figura 5.22 - Força em função da resistência externa.	35
Figura 5.23 - Velocidade em função da resistência externa.	36
Figura 5.24 - Ângulo de fase entre a força e a velocidade.	36
Figura 5.25 - Potência mecânica em função da resistência externa.	36
Figura 5.26 - Eficiência em função da resistência externa.	36
Figura 5.27 - Circuito de carregamento da bateria.	37
Figura 5.28 - Tensão da bateria em função do tempo de carregamento.	38
Figura 5.29 - Tensão no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela viga PZT25w.	39
Figura 5.30 - Tensão no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela Fonte 8V.	39
Figura 5.31 - Corrente no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela viga PZT25w.	40
Figura 5.32 - Corrente no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela Fonte 8V.	40
Figura 5.33 - Potência elétrica no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela viga PZT25w.	40
Figura 5.34 - Potência elétrica no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela Fonte 8V.	40
Figura 6.1 - Modelo piezoeletrico com ligação em série.	42
Figura 6.2 - Modelo piezoeletrico com ligação em paralelo completo.	42
Figura 6.3 - Modelo piezoeletrico com ligação parcialmente em paralelo.	43
Figura 6.4 - Simulação do modelo parcialmente em paralelo, 21Hz.	43
Figura 6.5 - Tensão elétrica em função da resistência externa para 21 Hz com material MFC.	45
Figura 6.6 - Potência elétrica em função da resistência externa para 21 Hz com material MFC.	45
Figura 6.7 - Tensão elétrica em função da resistência externa para 19.5 Hz com material PZT.	45
Figura 6.8 - Potência elétrica em função da resistência externa para 19.5 Hz com material PZT.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Informações de alimentação dos rádios transmissores.....	11
Tabela 3.2 - Dados técnicos de alimentação dos microprocessadores	12
Tabela 3.3 - Características básicas para cada tipo de sensor e seus modelos.	12
Tabela 3.4 - Dados de consumo do conjunto.	13
Tabela 3.5 - Parâmetros básicos do sensor wireless.....	14
Tabela 3.6 - Configurações iniciais de projeto.....	14
Tabela 5.1 - Frequência de ressonância e amortecimento para cada caso.....	30
Tabela 5.2 - Resultados obtidos de $[R\omega]\%$ e $[R\zeta]\%$	31
Tabela 6.1 - Tensão interna obtida para o modelo de circuito PP para os valores de tensão experimental.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

C	Capacitância	[F]
F	Força	[N]
fm	Fator de multiplicação	
n	Quantidade de transições disponíveis	
PC	Modelo piezelétrico parcialmente em paralelo	
PP	Modelo piezelétrico em paralelo	
R	Resistência Ôhmica	[Ω]
S	Modelo piezelétrico em série	
T	Tempo	[s]
V	Tensão	[V]
A	Corrente elétrica	[A]
X_c	Reatância Capacitiva	[Ω]
Z	Impedância complexa	[Ω]

Símbolos Gregos

ω	Frequência	[rad/s]
Δ	Varição entre duas grandezas similares	
π	Razão entre o perímetro e o diâmetro de uma circunferência	
η	Eficiência	
θ	Ângulo de fase entre ondas	[$^\circ$]
ζ	Amortecimento	

Subscritos

<i>amb</i>	ambiente
<i>ext</i>	externo
<i>int</i>	interno

Siglas

DAQ	<i>Data Acquisition</i>
MFC	<i>Macro Fiber Composite</i>
NI	<i>National Instruments</i>
PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride ou Polyvinylidene Difluoride</i>
PZT	<i>Lead Zirconate Titanate</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
UnB	Universidade de Brasília
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i>

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta considerações relacionadas à introdução ao tema, proposta do trabalho, motivação e objetivos.

O desenvolvimento de sensores com comunicação sem fio, ou sensores *wireless*, tem recebido grande atenção de pesquisadores nos últimos anos. Segundo Shu (2006) as aplicações para as redes de sensores sem fio incluem o monitoramento de máquinas e equipamentos, controle ambiental, utilização em casas inteligentes e em dispositivos de rastreamento em animais selvagens. Entretanto, mesmo com a diminuição do tamanho desses dispositivos e a proliferação destes micro sensores sem fio, a fonte de alimentação ainda é um problema. A solução convencional para a alimentação dos sensores é a utilização de bateria, no entanto, o tamanho, o peso, limitações devido a curta vida útil e a necessidade de substituição constante das baterias inviabilizam algumas aplicações.

Por outro lado, os avanços das pesquisas em microeletrônicos de baixa potência mostram que o consumo de energia pode ser reduzido para centenas e até dezenas de microwatts dependendo da aplicação. Isso abre a possibilidade para o desenvolvimento de sensores auto-alimentados sem fio. Roundy (2004) explica que há muitas pesquisas e esforços voltados para os coletores de energia elétrica a partir de diferentes fontes ambientais, que incluem: energia solar, gradientes térmicos e vibração. Leland (2005) diz que entre essas fontes de energia, a vibração mecânica possui grande potencial como fonte de energia, pois é suficientemente abundante e é acessível através de sistemas microeletromecânicos (MEMS - *Microelectromechanical Systems*). MEMS é o nome dado para a tecnologia que integra elementos mecânicos, sensores e eletrônicos em um chip, que possui uma informação gravada que determina seu funcionamento. São praticamente micromáquinas programadas para cumprir determinada atividade.

A linha de pesquisa dos coletores de energia (*Power Harvesters*) utilizando os materiais piezelétricos consiste no estudo da conversão da energia presente no ambiente, na forma de vibração, em energia elétrica. Segundo Sodano (2004), o efeito piezoelétrico existe de duas maneiras. A primeira é o efeito piezoelétrico direto, que descreve a capacidade do material de transformar tensão mecânica em carga elétrica. A segunda maneira é o efeito inverso, que é a capacidade de converter um potencial elétrico aplicado em tensão mecânica. Explorando-se o efeito direto, os materiais piezelétricos podem ser utilizados para captar a energia da vibração do ambiente, transformando-a em energia elétrica.

De uma forma geral, os coletores piezelétricos geram baixas potências tendo em vista uma eficiência baixa na conversão de energia mecânica em elétrica. Entretanto, esses coletores apresentam ordem grandeza de produção de energia compatível para a aplicação na alimentação de circuitos elétricos que necessitam de baixas potências.

1.1 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é investigar a capacidade de geração de energia elétrica de uma viga piezelétrica MFC (*Macro Fiber Composite*) e duas vigas de PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) excitadas mecanicamente. Inicialmente é apresentada uma análise de viabilidade de sensores sem fio com autonomia energética. Em seguida, realiza-se uma análise experimental das vigas piezelétricas onde a excitação mecânica é realizada por um *shaker*. Nessa análise, determina-se a frequência de ressonância e a potência elétrica gerada pela viga para diferentes circuitos elétricos acoplados e diferentes condições de forçamento. Posteriormente a corrente alternada é retificada e avalia-se o carregamento de baterias.

Para avaliar o potencial de aplicação da viga, torna-se interessante possuir um modelo matemático para a mesma. Nesse contexto, propõe-se um modelo para o circuito interno da viga, ainda não bem estabelecido na literatura. Os resultados numéricos obtidos são, então, comparados com resultados experimentais. Esse modelo é interessante para auxiliar os testes experimentais. Com essa análise avalia-se a possibilidade da viga estudada alimentar um sensor wireless.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em 7 capítulos. Neste primeiro capítulo uma introdução é apresentada. No segundo, os materiais piezelétricos são apresentados brevemente e alguns trabalhos que exploram a utilização desses materiais em coletores de energia são citados. O capítulo três apresenta um estudo de viabilidade de sensores sem fio auto alimentados. O capítulo quatro apresenta o aparato experimental do sistema estudado assim como alguns procedimentos adotados na análise dos dados. O capítulo cinco apresenta os testes experimentais da viga piezelétrica e análise dos dados com avaliação das potências mecânica fornecida e elétrica gerada, e da eficiência na conversão. No capítulo seis são apresentadas propostas para modelagem do circuito interno da viga. Por último, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2. MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Este capítulo apresenta considerações relacionadas aos materiais piezelétricos, suas aplicações e os materiais piezelétricos utilizados.

2.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS MATERIAIS PIEZELÉTRICOS

Os materiais piezelétricos pertencem à classe de materiais inteligentes denominados ferroelétricos. O efeito ferroelétrico foi descoberto em 1920 por Valasek (1920) em seu estudo com um tipo de sal, denominado sal de *La Rochelle*. No entanto, a primeira demonstração do efeito piezelétrico direto foi em 1880 por Pierre Curie e Jacques Curie (1880). Segundo Sodano (2004) uma das características do material é a sua estrutura molecular orientada de tal modo que apresenta uma separação de carga local, semelhante ao dipolo elétrico.

Segundo Sodano (2004) o material piezelétrico possui o efeito direto e o efeito inverso. No efeito direto as tensões mecânicas que surgem como resultado de uma força externa atuante no corpo piezelétrico induz deslocamentos nos elementos positivos e negativos que se manifestam em momentos de dipolo. Consequente há a formação de um campo elétrico que gera um potencial elétrico nos eletrodos isolados. Na literatura, esse feito é frequentemente referido como o efeito do gerador. A Figura 2.1 apresenta uma representação do efeito direto no material piezelétrico.

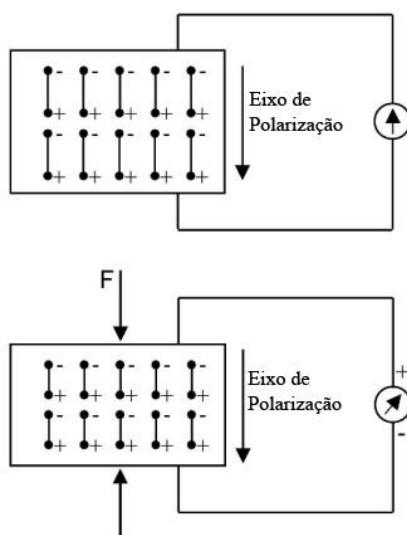


Figura 2.1 - Representação do efeito direto no material piezelétrico adaptada de PI Ceramic GmbH. (2011).

No efeito inverso, a aplicação de uma tensão elétrica ao corpo piezelétrico resulta na sua deformação mecânica. A deformação é uma função da polaridade da tensão imposta, ou seja, a aplicação de uma tensão alternada gera uma mudança cíclica na geometria. No caso de vigas piezelétricas, dependendo da polarização da tensão, o deslocamento é superior ou inferior ao ponto de

equilíbrio, como mostrado na Figura 2.2. Se o material está preso em algum ponto, ou seja, se o deslocamento livre é limitado, uma força é gerada. Este efeito é frequentemente denominado como efeito do motor.

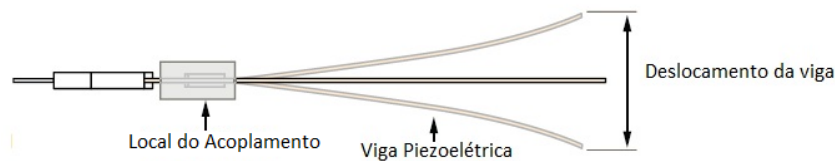


Figura 2.2 - Representação esquemática da viga piezoelétrica adaptada de Datasheet Smart-Materials (2011).

Segundo o relatório da *Acmite Market Intelligence* (2011) sobre o mercado dos materiais piezoelétricos, atualmente a indústria de manufatura é o maior mercado para dispositivos piezoelétricos, seguido pela indústria automotiva. Há também forte demanda de instrumentos médicos, bem como de indústria de informação e telecomunicações. Os materiais piezoelétricos são úteis para diversas aplicações como amplificadores de tensão, sensores, atuadores, componentes eletrônicos, geradores elétricos, entre outros.

O princípio de funcionamento de um sensor piezoelétrico é a transformação da deformação, que atua sobre duas faces opostas do elemento, em campo elétrico. Dependendo da concepção de um sensor, há diferentes modos de utilização do elemento piezoelétrico como: longitudinal e transversal, e de cisalhamento.

O material piezoelétrico também é utilizado como atuador explorando-se o efeito inverso. Nesse caso, a imposição de campos elétricos geram atuações a partir das deformações do material, sendo uma ferramenta muito importante para posicionar objetos.

O material piezoelétrico como gerador de energia começou a ser estudado após 1920. Iniciou-se então uma busca por materiais piezoelétricos mais sensíveis e com maior capacidade de produção de energia. O Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) foi um dos primeiros materiais piezoelétrico que levaram nas décadas de 40 e 50 à construção da primeira cerâmica piezoelétrica. Apesar de o PZT ser amplamente utilizado como um material para obtenção de energia, ele é de natureza extremamente frágil, o que gera uma limitação de utilização sem que seja danificado. O Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) foi descoberto na década de 70 e foram empregados por (Kendall (1998); Kymissis (1998); Shenck (1999); Shenck e Paradiso (2001); Starner e Paradiso, 2004) para obter energia elétrica da vibração gerada pelo caminhar.

Em geral, a captação de energia piezoelétrica é realizada segundo o esquema apresentado na Figura 2.3. A energia mecânica proveniente de uma força externa é imposta ao material piezoelétrico, gerando uma deformação mecânica. Em seguida, a energia mecânica fornecida é convertida em energia elétrica pelo material piezoelétrico. Por fim, a eletricidade gerada é transferida para algum dispositivo ou armazenada.

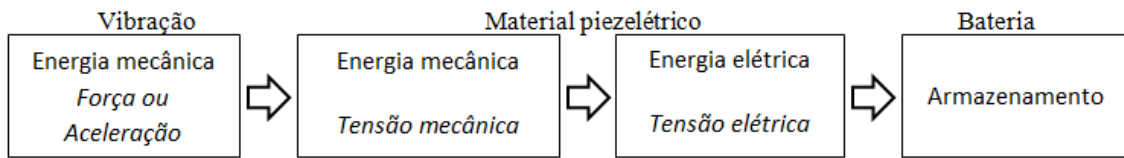


Figura 2.3 - Esquema da coleta de energia utilizando material piezoeletrico.

No estudo do material, Lee (2005) percebeu que os piezocerâmicos são suscetíveis a trincas por fadiga quando submetidos a cargas cíclicas em alta frequência. A fim de eliminar esta inconveniência e melhorar a eficiência, uma alternativa é desenvolver os materiais piezoeletricos de forma que ele fique mais flexível.

Nesse contexto, Mohammadi (2003) desenvolveu um material piezoeletrico constituído por fibras de PZT de vários diâmetros (15, 45, 120 e 250 μm), que foram alinhados, laminados e moldados em um epóxi. Isto resultou em compósitos flexíveis com 40% do volume consistindo de fibras piezoeletricas alinhadas e os restantes 60% composto de epóxi. Determinou-se que as placas mais grossas têm a capacidade de maiores deslocamentos de fibra, e que nas amostras com diâmetro menor, as fibras têm maior coeficiente piezoeletrico.

Na busca de materiais piezoeletricos mais flexíveis, em 2002, a NASA desenvolveu o Composto Macro-Fibra (MFC - *Macro Fiber Composite*) que consiste em barras cerâmicas piezoeletricas retangulares ensanduchadas entre camadas de adesivo, eletrodos e filme de poliamida, segundo o *Datasheet* da *Smart-Materials* (2011). A construção desse composto permite que ele seja extremamente flexível, bem como resistente a danos e a difíceis condições ambientais. Essas são duas propriedades desejáveis para aplicações de células piezoeletricas para captação de energia elétrica. Segundo o *Datasheet* da *Smart-Materials* (2011) o MFC possui em comparação com seus concorrentes, como o PZT, maior flexibilidade, durabilidade, tolerância a impactos, conformidade com superfícies e envoltório ambientalmente selado. Entretanto a geração de energia elétrica é menor. A Figura 2.4 apresenta os detalhes da estrutura da viga de MFC.

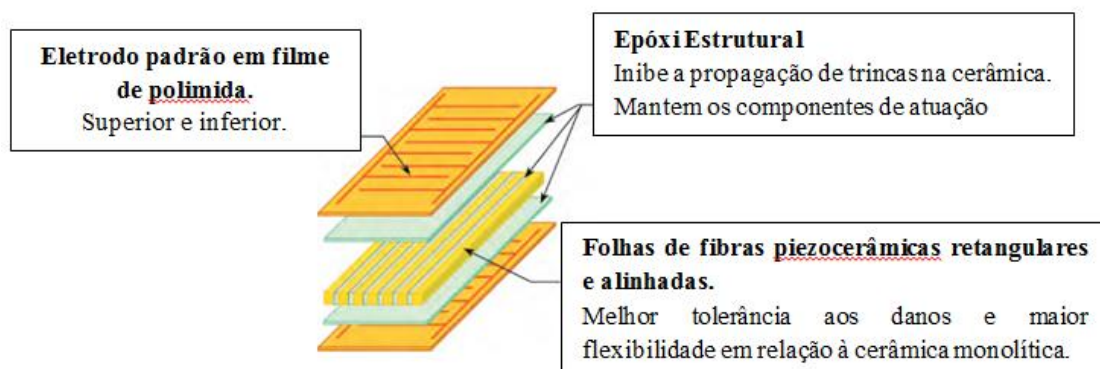


Figura 2.4 - Detalhes da estrutura da viga piezoeletrica de MFC adaptada de *Datasheet Smart-Materials* (2011).

Segundo Roundy (2003), uma maneira de aumentar a energia convertida por um material piezoeletrico é utilizar o modo de acoplamento mais eficiente. Na prática, existem dois modos de acoplamento, o modo -31 e o -33 . No modo -31 , uma força é aplicada na direção perpendicular à

direção de polarização. No modo -33, uma força é aplicada na mesma direção que a direção da polarização. A Figura 2.5 exemplifica os modos de acoplamento.

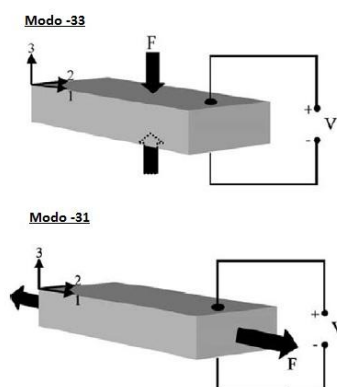


Figura 2.5 - Tipos de modos de acoplamento adaptada de Roundy (2003).

Baker (2005) analisou a eficiência dos modos -31 e -33 e concluiu que para pequenas deformações do material, ambiente com pouca vibração, a configuração -31 mostrou ser mais eficiente. No entanto, em um ambiente com amplitude de vibrações grandes, como em uma instalação de fábrica pesada, a configuração -33 apresentou maior durabilidade, gerando uma maior quantidade de energia útil.

Uma questão fundamental para a utilização da viga de MFC ou PZT para a alimentação de dispositivos é a forma de armazenamento da carga elétrica produzida. Nesse contexto, Sodano (2003) investigou a capacidade de recarregar baterias utilizando dois tipos de materiais piezoelétricos, o MFC e o PZT. Um circuito simples constituído por uma ponte retificadora e capacitor foi usado para aplicar carga à bateria. Determinou-se a eficiência dos materiais piezoelétricos entre 0,7 e 4,2 %. No mesmo trabalho, o MFC foi considerado ineficaz para o carregamento de baterias devido à baixa corrente que ele produz. No entanto, o PZT foi capaz de recarregar baterias com diferentes tamanhos, por exemplo 40 mAh e 1000 mAh em 1.6 horas e 22 horas, respectivamente.

Continuando o trabalho publicado em 2003, Sodano (2005b) compara a capacidade de armazenamento de um capacitor e de uma bateria níquel-hidreto metálico utilizando PZT. Neste estudo, utilizou-se o circuito de Kymissis(1998) para o armazenamento com o capacitor e um circuito com ponte retificadora e capacitor para o armazenamento na bateria. Demonstrou-se o funcionamento adequado do circuito de Kymissis com o dispositivo piezoelétrico. Demonstrou-se no mesmo trabalho que uma bateria de 40mAh pode ser carregada em menos de meia hora em ressonância e em apenas algumas horas com um sinal aleatório semelhante ao de uma vibração típica de uma máquina.

Arms (2005) demonstrou que é possível alimentar um sensor *wireless* (incluindo um microprocessador, memória *on-board*, medidor de tensão e sensor de condicionamento de sinal) utilizando uma viga piezoelétrica de PZT em um ambiente sujeito à vibração utilizando componentes

com reduzido consumo e recorrendo ao modo de baixo consumo, ou *sleep-mode*, do rádio e do microprocessador. Na Figura 2.6 é apresentado o dispositivo construído por Arms (2005).

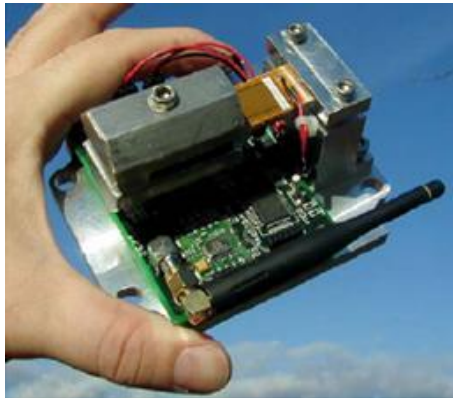


Figura 2.6 - Sensor wireless alimentado por uma viga piezelétrica (Adaptada de Arms, 2005).

2.2. MATERIAIS PIEZELETRICOS UTILIZADOS

Os materiais piezelétricos utilizados são a placa M-8528-P2, a placa QP10N, e a viga V25W. A primeira viga é formada por uma placa de MFC, M-8528-P2 da *Smart-Materials Corp.* cuja as dimensões são 85x28x0.3mm, acoplada a uma viga de plástico, conforme apresentada na Figura 2.7. A segunda viga é formada pela placa de PZT, QP10N da *Midé Inc.* cuja as dimensões são 46x20x0.3mm, também acoplada a uma viga de plástico, apresentada na Figura 2.8. A terceira viga é a viga pronta da *Midé Inc.* V25W, apresentada nas Figura 2.9 e Figura 2.10. Observa-se que a viga V25W é protegida por uma estrutura de alumínio. Na Figura 2.10 são apresentados os três principais componentes que formam a viga V25w. O primeiro é a massa de alumínio na ponta que foi adicionada para reduzir a frequência de ressonância da viga, de forma que a frequência fosse compatível com a faixa de trabalho do *shaker*. O segundo é a viga propriamente dita e o terceiro é o circuito retificador que vem incorporado à viga V25w.

Para simplificar a viga composta pelo material piezelétrico M-8528-P2 será chamada de viga MFC. A viga composta pelo material piezelétrico QP10N será viga PZT e a viga PZT25w se refere a viga pronta V25W.

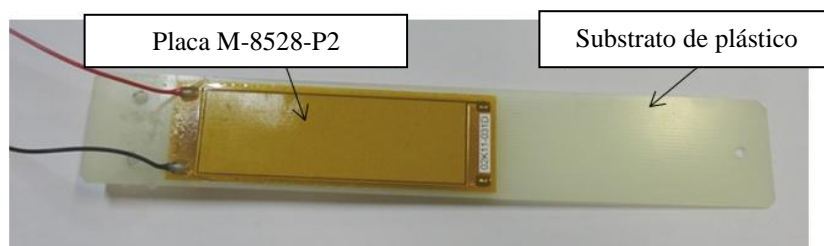


Figura 2.7 - Viga de MFC.



Figura 2.8 - Viga de PZT.

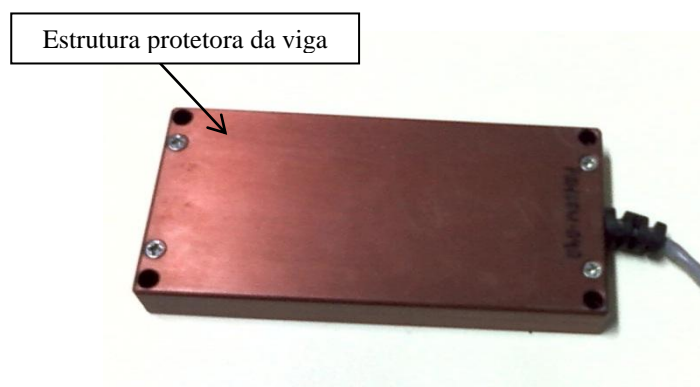


Figura 2.9 - Viga PZT 25w.

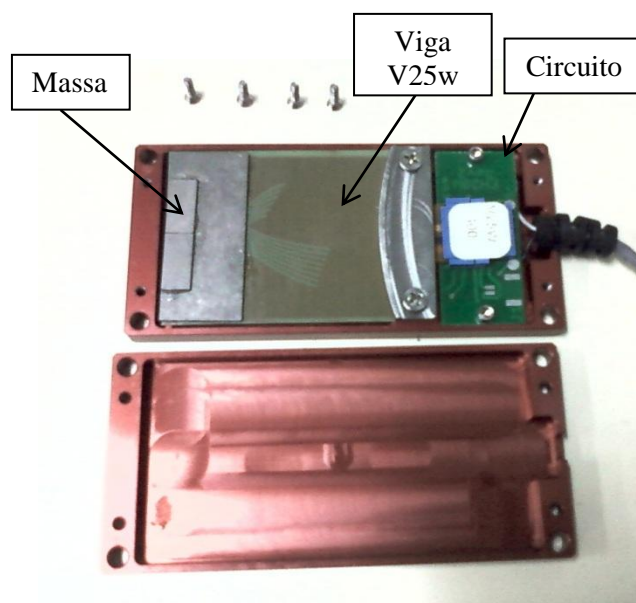


Figura 2.10 – Detalhes do interior da viga PZT 25w.

3. ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SENSORES SEM FIO AUTO ALIMENTADOS

Este capítulo apresenta uma análise de viabilidade da obtenção de sensores sem fio auto alimentados utilizando vigas piezelétricas.

Desenvolvimentos recentes em sensores, microprocessadores e miniaturização de rádios transmissores permitem que uma nova geração de dispositivos seja desenvolvida. As redes de sensores sem fio consiste em um exemplo dessa tecnologia. A partir de sensores sem fio é possível monitorar as condições de funcionamento de sistemas, equipamentos e estruturas de difícil acesso ou cuja instrumentação não permite a utilização de fios, tais como sistemas rotativos. Essa monitoração proporcionada pelo sensor pode ser aliada a uma manutenção preditiva, alertando os problemas antes da ocorrência de situações críticas e eliminando assim a manutenção não agendada. No entanto, a fim de fornecer às redes uma autonomia de funcionamento, é necessário desenvolver métodos para eliminar a necessidade da mudança de bateria ou para estender o tempo de vida da bateria ao máximo. A Figura 3.1 apresenta o esquema de funcionamento de redes sem fio.



Figura 3.1 - Esquema de funcionamento de redes sem fio.
Fonte: *NI WSN Link Quality Logger* adaptada.

Inicialmente necessário é interessante determinar a potência necessária para alimentar um sensor sem fio. Há varias configurações possíveis para os sensores sem fio, entretanto, a configuração realizada por Arms (2005) é seguida por vários devido ao baixo consumo de energia e flexibilidade para diferentes aplicações. Na Figura 3.2 é apresentado o diagrama de blocos do dispositivo. O sistema é formado por um conversor analógico-digital, micro controlador, sensores e o dispositivo RF (*Radio frequency*).

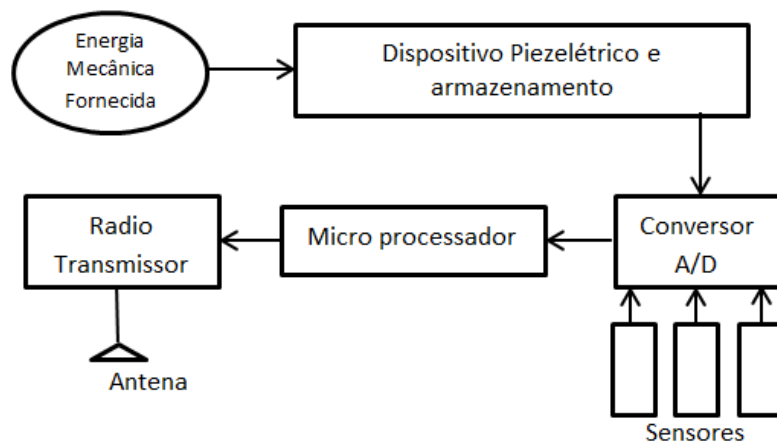


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do dispositivo de transmissão sem fio.

Há diferentes variedades de micro processadoras e de rádio transmissores no mercado, logo, para determinar a melhor configuração possível cada componente deve ser avaliado separadamente. Os micros processadores abordados já possuem o conversor analógico-digital incluso.

O rádio transmissor utilizado por Zixue (2011) e Arms (2005), é o transmissor da serie XBee. A escolha dessa marca é devido ao seu baixo consumo, confiabilidade e sistema de comunicação próprio. Outros como Lee (2010), Torah (2008), Reilly (2011) e Wischke (2011) realizam a construção de seu próprio rádio transmissor buscando a redução do consumo e a diversificação dos componentes. São vários os módulos de rádio transmissão da *Digi International Inc.*. As duas classes principais são o *Xbee* e *Xbee-Pro*. O *XBee* possui baixo consumo de energia e pequeno alcance. O *XBee-Pro*, possui alto consumo e alto alcance. Uma variedade de modelos de rádios *XBee* e *XBee-Pro* são comercializados e vendidos pela *Digi*. Como a principal característica para este trabalho é que o rádio transmissor possua baixo consumo, a Figura 3.4 apresenta a potência de alimentação para diferentes rádios *XBee* e *XBee-Pro*, enquanto a Figura 3.3 mostra o conjunto *XBee ZB-Pro*.



Figura 3.3 - Foto do transmissor e do receptor *XBee ZB-Pro*.

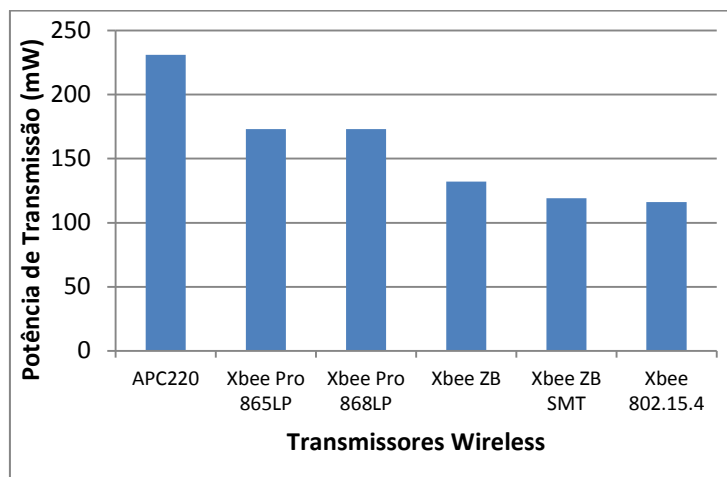


Figura 3.4 - Potência de alimentação para diferentes rádios transmissores.

Observa-se que os tipos de rádio transmissores *XBee-Pro* em geral necessitam de uma potência de alimentação superior aos rádios da serie *XBee*. Enquanto os *XBee* necessitam em torno de 130 mW os rádios da linha *Pro* necessitam de algo em torno de 170 mW. Como o principal critério é baixa potência de alimentação os rádios *XBee ZB*, 132 mW, *XBee ZB SMT*, 119mW, e *XBee 802.15.4*, 116mW são os selecionados e suas informações de alimentação estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Informações de alimentação dos rádios transmissores

Rádio Transmissor	Potência (mW)	Corrente (mA)			Tensão (V)	
		Transferindo	Recebendo	Modo de baixo consumo	Min	Max
<i>XBee ZB</i>	144	40	38	0.02	2.1	3.6
<i>XBee ZB SMT</i>	119	33	28	0.02	2.1	3.6
<i>XBee 802.15.4</i>	120	35	50	0.10	2.8	3.4

No caso do micro processador, foram avaliadas três opções, selecionadas devido a sua linguagem simplificada e baixo consumo de energia: *Arduino Uno*, *Arduino Nano* e o *Garagino*, conforme apresentados nas Figura 3.5, Figura 3.6 e Figura 3.7, respectivamente. O *Arduino Uno* possui uma ótima interface com o usuário, simples e eficiente, no entanto, a potência necessária para alimentação é de 250mW. O *Arduino Nano* é um dispositivo muito semelhante ao *Arduino Uno* na prática, no entanto, ele é miniaturizado e necessita de 200mW para funcionamento. O *Garagino*, da *LabGaragem.com*, é especialmente desenvolvido para aplicações com baixa potência de alimentação, que pode ser feita entre 1,8 e 5VDC. Além disso, o sistema de *Boot* é o mesmo do *Arduino* o que facilita muito ao usuário que está familiarizado com a linguagem do *Arduino*. Na Tabela 3.2 são apresentados os dados técnicos de alimentação para cada microprocessador.



Figura 3.5 - *Arduino Uno*.



Figura 3.6 - *Arduino Nano*.

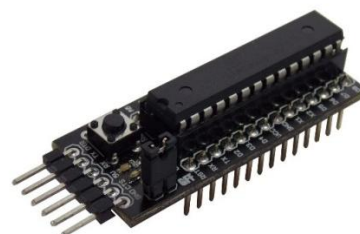


Figura 3.7 – *Garagino*.

Tabela 3.2 - Dados técnicos de alimentação dos microprocessadores

Microprocessador	Potência (mW)	Tensão operação (V)	Corrente operação (mA)	Corrente <i>Sleep-mode</i> (mA)
<i>Arduino Uno</i>	250	5	50	10
<i>Arduino Nano</i>	200	5	40	10
<i>Garagino</i>	90	5	18	1.2

Para os sensores, a potência de alimentação necessária para seu funcionamento depende do tipo de aplicação. Sensores de gás (*hwsensor*) para gases de Metano, GLP e CO normalmente dissipam aproximadamente 700mW durante seu funcionamento, um consumo considerado alto para a aplicação em questão. Sensores de temperatura e umidade (*DHT11*) necessitam de aproximadamente 12 mW. Sensores piezoelétricos para medição de flexão, torque, vibração e choque praticamente não necessitam de alimentação. No caso dos acelerômetros, a sua potência de alimentação depende muito dos parâmetros básicos do acelerômetro, como a quantidade de eixos medidos, sensibilidade, resolução, tempo de resposta e ruído. Na Tabela 3.3 são apresentadas as características básicas para cada tipo de sensor e seus modelos.

Tabela 3.3 - Características básicas para cada tipo de sensor e seus modelos.

Tipo do Sensor	Modelos	Potência alimentação (mW)	Tensão operação (mA)	Corrente operação (mA)
Temperatura e umidade	DHT11	14	3.0 - 5.5	2.5
Vibração/Flexão/Choque	MEAS-spec	0	0	0
Acelerômetros	ADXL 345	0.35	2.0 - 3.6	0.14
	ADXL 377	0.9	1.8 - 3.6	0.300
	MMA 7361L	1.44	2.2 - 3.6	0.40

Com as três opções de rádio transmissores e com as três opções de microprocessadores disponíveis, tem-se que a combinação que consome menor potência é a do *XBee ZB SMT*, *Garagino* e o acelerômetro ADXL 345. A Tabela 3.4 apresenta os dados de consumo do conjunto.

Tabela 3.4 - Dados de consumo do conjunto.

Conjunto	Potência operação (mW)	Corrente operação (mA)	Corrente em <i>Sleep-mode</i> (mA)
<i>XBee ZB SMT, Garagino e ADXL 345</i>	209.9	52	1.3

Inicia-se então a análise do carregamento e descarregamento da bateria. Três hipóteses são consideradas. A primeira é que toda corrente que entra na bateria é armazenada pela mesma e toda corrente armazenada é posteriormente utilizada no dispositivo sem fio. Sabe-se que essa hipótese não é verdadeira, pois há uma eficiência relativa a esse armazenamento que depende bastante do tipo, capacidade e ciclos já realizados pela bateria. A segunda hipótese é que a tensão produzida pela viga é capaz de armazenar 100% de carga na bateria. É uma hipótese simplificadora, pois a capacidade de armazenar carga em baterias depende muito do tipo do material piezelétrico utilizado, tipo da bateria, tensão da bateria, capacidade da bateria, entre outras. A terceira hipótese é que a o carregamento pela viga piezelétrica e o descarregamento para a alimentação do sensor sem fio está sendo realizado simultaneamente. Isso não ocorrerá na realidade, assim, é interessante avaliar futuramente situações em que o carregamento e o descarregamento ocorrem separadamente.

Com essas hipóteses, define-se inicialmente a Capacidade da Bateria, C_{bat} , em mAh e o consumo total de corrente elétrica do sistema, C_A , em mA. Em um sistema ideal, onde a bateria é descarregada pela corrente, C_A , tem-se que o tempo de vida da bateria, t_{bat} é dado por:

$$t_{bat}[h] = \frac{C_{bat} [mAh]}{C_A [mA]} \quad (1)$$

Supondo que bateria é recarregada pela viga piezelétrica durante o tempo de vida da bateria obtida anteriormente, tem-se que o tempo de vida da bateria, $t_{bat,p}$ é dado por:

$$t_{bat,p}[h] = \frac{C_{bat} [mAh] + Ci[mA] * t_{bat}[h]}{C_A [mA]} \quad (2)$$

onde, Ci é a corrente que a viga piezelétrica introduz na bateria.

No entanto, o consumo total de corrente elétrica do sistema, C_A , pode ser reduzido consideravelmente se ao invés do dispositivo transmitir os dados continuamente ele transmitir os dados em um intervalo durante um intervalo de tempo determinado, T_{on} , e entrar em modo de baixo consumo (*Sleep-mode*) durante o restante do tempo, T_{off} . Para um sensor que transmita dados durante 1s a cada minuto, por exemplo, tem-se que a corrente total do sistema corresponde a corrente elétrica de operação de transmissão durante 1s somado à corrente necessária para alimentar o sistema em modo de baixo consumo durante 59s. Dessa forma, define-se C_{Am} como sendo a corrente média consumida pelo dispositivo durante um minuto e é dada por:

$$C_{Am} = \frac{C_i T_{on} + C_{sleep} T_{sleep}}{T_{on} + T_{off}} [mA] \quad (3)$$

onde C_{sleep} é o consumo de corrente elétrica no modo de baixo consumo.

Com os parâmetros básicos do sensor sem fio apresentados na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6, analisa-se a influência no tempo de vida da bateria quando alteradas as principais configurações de projeto. Nesta análise utiliza-se uma corrente gerada pela viga piezométrica, C_i , na ordem de grandeza da corrente produzida experimentalmente.

Tabela 3.5 - Parâmetros básicos do sensor wireless

Componente	Potência operação (mW)	Potência <i>sleep-mode</i> (mW)	Corrente operação (mA)	Corrente <i>sleep-mode</i> (mA)
Transmissor <i>Wireless</i>	119	0	33	0.02
Micro Controlador	90	6	18	1.2
Sensor	0.35	0	0.14	0.05

Tabela 3.6 - Configurações iniciais de projeto.

Configuração	Valor
Capacidade da bateria, C_{bat}	1000 mAh
Tempo de transmissão, T_{on}	1 s
Tempo em <i>sleep-mode</i> , T_{off}	59 s
Corrente produzida pela viga piezométrica, C_i	0.9 mA
Corrente média consumida, C_{Am}	2.1mA

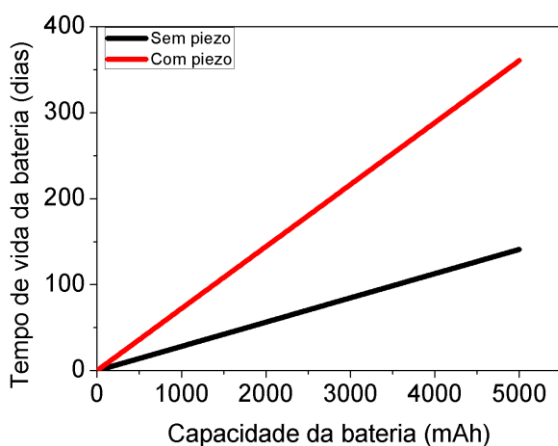


Figura 3.8 - Tempo de vida em função da capacidade da bateria.

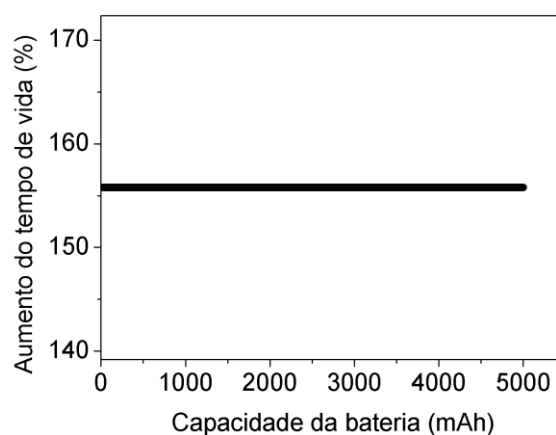


Figura 3.9 - Porcentagem acrescida no tempo de vida da bateria em função da capacidade da bateria.

A Figura 3.8 e a Figura 3.9 apresentam a influência do acoplamento de um coletor piezométrico no aumento da capacidade da bateria. Observa-se que independente da capacidade da bateria, a porcentagem de aumento do tempo de vida é constante.

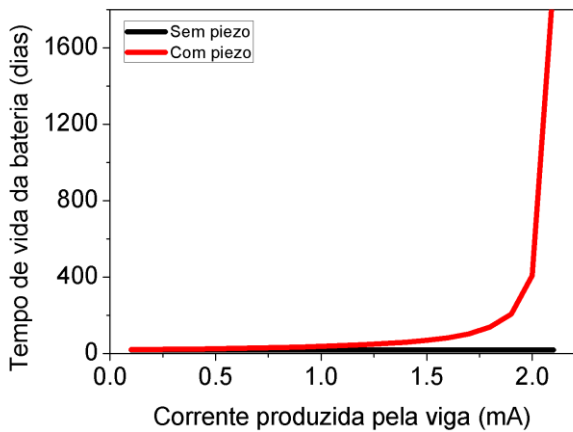


Figura 3.10 - Tempo de vida da bateria em função da corrente produzida pela viga piezométrica.

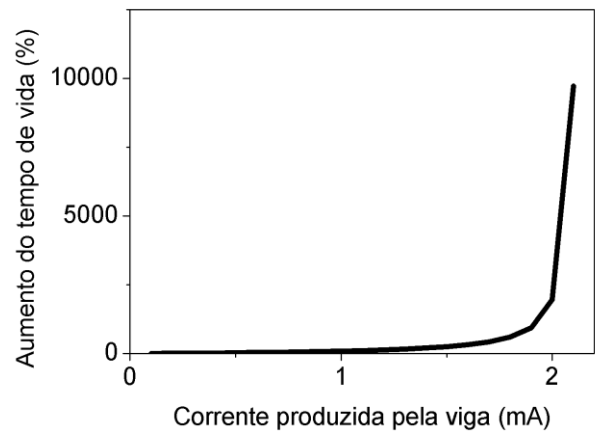


Figura 3.11 - Porcentagem acrescida no tempo de vida da bateria em função da corrente produzida pela viga piezométrica.

A Figura 3.10 e a Figura 3.11 mostram como o tempo de vida da bateria aumenta com o aumento da corrente produzida pela viga piezométrica. Observa-se que quando a tensão produzida pela viga está acima da corrente média consumida, o tempo de vida da bateria tende ao infinito, ou seja, a viga piezométrica é capaz de produzir um sensor sem fio auto alimentado.

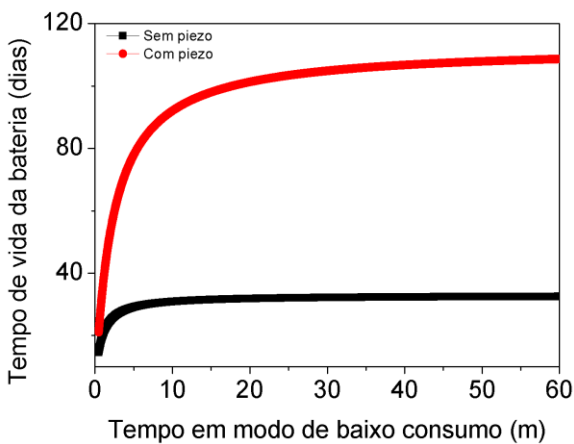


Figura 3.12 - Tempo de vida da bateria em função do tempo em modo de baixo consumo.

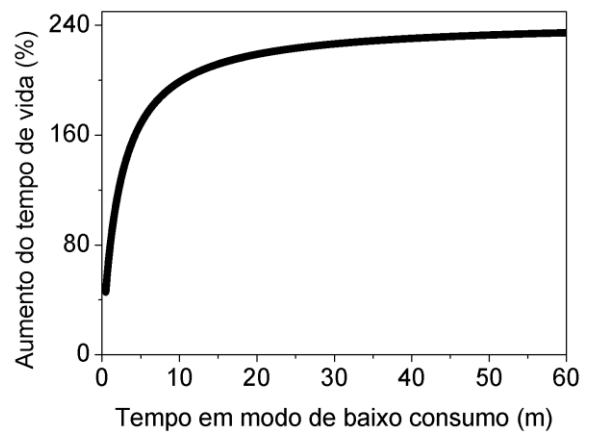


Figura 3.13 - Porcentagem acrescida no tempo de vida da bateria em função do tempo em modo de baixo consumo.

As Figura 3.12 e Figura 3.13 apresentam a influência no tempo de vida da bateria quando se aumenta o tempo em que o transmissor sem fio fica em modo de baixo consumo para cada 1s de transmissão. Para as configurações básicas há o limite de 240% de aumento no tempo de vida da bateria, independentemente do tempo em baixo consumo. Logo, a partir de 20 minutos o aumento do tempo em modo de baixo consumo não gera benefícios significativos ao tempo de vida da bateria.

A análise de viabilidade mostra que para o sensor sem fio selecionado, o tempo de vida da bateria é aumentado consideravelmente a partir do acoplamento da viga piezométrica. Além disso, se a viga produzir corrente acima da corrente média consumida, 2.1mA, a viga piezométrica é capaz de realizar a alimentação completa do sensor sem fio.

4. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL E DE ANÁLISE DOS DADOS

Este capítulo apresenta o aparato experimental e procedimentos adotados na análise dos dados.

4.1 APRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento consiste em excitar mecanicamente as vigas de MFC, PZT, PZT25w e apenas o substrato em diferentes condições de forçamento. Com um *shaker* é imposto à viga um forçamento harmônico de base do tipo

$$x(t) = A \sin(\omega t) \quad (4)$$

onde A é amplitude e ω é a frequência. A Figura 4.1 apresenta uma representação esquemática do experimento, com a viga piezelétrica sujeita a uma excitação de base harmônica e acoplada a um circuito elétrico.

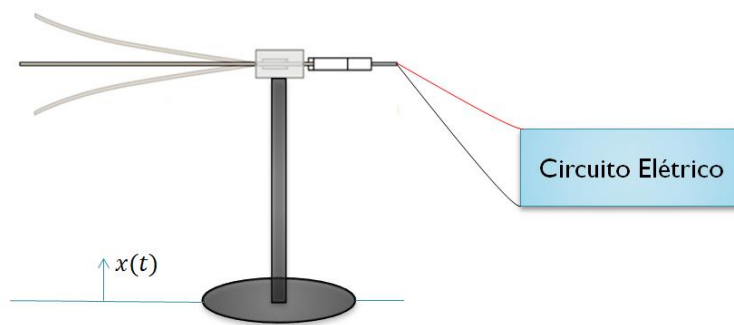


Figura 4.1 - Figura esquemática do experimento da viga piezelétrica acoplada a um circuito elétrico e sujeita a um forçamento de base.

Para a realização dos experimentos é utilizada uma bancada do Laboratório de Vibrações Mecânicas da Universidade de Brasília – UnB, apresentada na Figura 4.4. A Figura 4.2 apresenta o fluxograma do procedimento experimental, enquanto a Figura 4.4 mostra a viga piezelétrica fixada no *shaker* com os acelerômetros, a célula de carga e o suporte da viga.

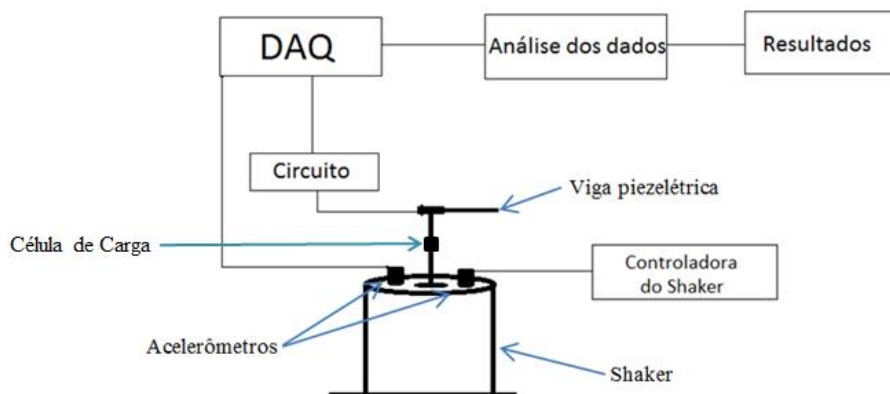


Figura 4.2 - Fluxograma do procedimento experimental

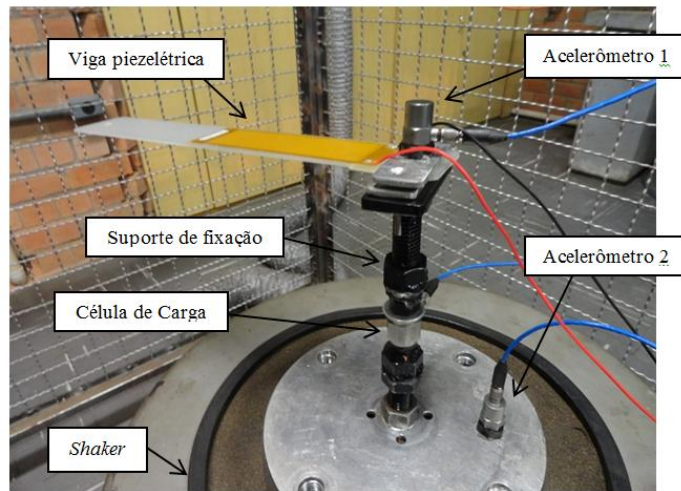


Figura 4.3 - Fixação entre o *shaker* e a viga piezelétrica.

O *shaker* é um transdutor eletrodinâmico produzido pela *Labworks Inc* utilizado para testes de vibração. O controle do *shaker* é realizado pela controladora *SignalStar* da *Data Physics* utilizando o acelerômetro de controle modelo 352C34 e série 106189, da *PCB Piezotronics*, que é fixado sobre a base do *shaker* e conectado a um dos canais de entrada da controladora. Na Figura 4.3 o acelerômetro de controle está indicado como o acelerômetro 2. Para a aquisição de dados, utiliza o *chassi NI cDAQ-9178* e dois módulos de aquisição de dados, NI 9201 e NI 9234, para obtenção da tensão e aceleração do *shaker*, respectivamente. Tanto o *chassi* e as duas placas são da fabricante *National Instruments*. O acelerômetro de aquisição de dados do *shaker* é o modelo 352C33 e série 128108, da *PCB Piezotronics* e está apresentado na Figura 4.3 como o Acelerômetro 1. A célula de carga é o dispositivo responsável por realizar a aquisição da magnitude da força.

Para a aquisição dos dados foi utilizado o Programa *LabView 2009*, da *National Instruments*. O *LabView* possui a facilidade de ser do mesmo fabricante dos dispositivos de aquisição de dados e portanto possui compatibilidade completa com todo o equipamento. Com o Módulos de Vibrações 2009 da *National Instruments* é possível determinar a partir da aceleração obtida pelo acelerômetro 1, a velocidade e a posição no tempo do *shaker* e, conseqüentemente, do suporte da viga piezelétrica.

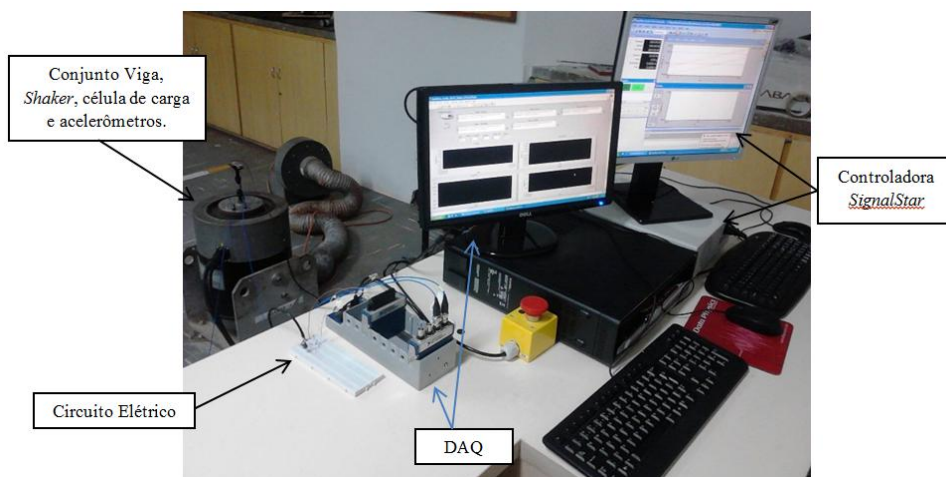


Figura 4.4 - Bancada do Laboratório de Vibrações.

O circuito elétrico, montado em uma *protoboard*, acoplado à viga piezelétrica também é mostrado na Figura 4.4. O desempenho do material piezelétrico na geração de energia varia em função da excitação mecânica imposta assim como em função do circuito elétrico acoplado, ou seja, esses são os parâmetros que influenciam no comportamento dinâmico do sistema. Neste trabalho, pretende-se avaliar o desempenho da viga piezelétrica quando alguns componentes do circuito são alterados. Para a realização dos experimentos é utilizado um conjunto de resistores de filme metálico de resistências entre $10\ \Omega$ e $10M\Omega$ e um conjunto de capacitores com capacitância entre $1\mu F$ e $1000\mu F$. É definida como resistência externa, R_{ext} , a resistência ôhmica do circuito e como capacitância externa, C_{ext} , a capacitância no circuito.

Com a excitação mecânica da viga é gerada uma tensão elétrica no circuito elétrico. Para os experimentos com corrente alternada, todos os experimentos utilizam um divisor de tensão para a aquisição dos dados da tensão. Além disso, após a obtenção da tensão e corrente, é fundamental determinar o ângulo de fase entre esses sinais de forma a determinar a potência elétrica efetiva. Por outro lado, para determinar a potência mecânica, é necessário obter o ângulo de fase entre os sinais de força, adquirido pela célula de carga, e de velocidade da base do *shaker*. A seguir, esses procedimentos, utilizados no processamento de todos os ensaios experimentais, são apresentados.

4.2 DIVISOR DE TENSÃO

A placa NI 9201, responsável pela aquisição dos sinais de tensão, possui uma limitação de tensão de entrada de ± 10 Volts. Como a viga é capaz de gerar tensões superiores a este limite, o divisor de tensões é utilizado para possibilitar a aquisição da tensão. O circuito elétrico puramente resistivo com divisor de tensão é formado por dois resistores em série, R_1 e R_2 , como mostrado no diagrama a seguir:

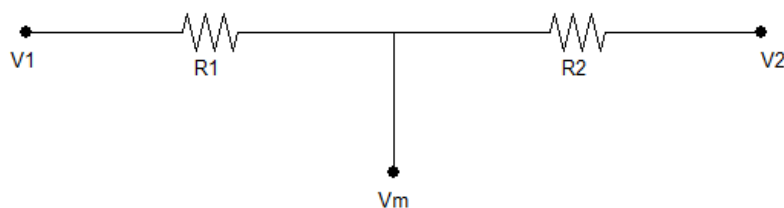


Figura 4.5 - Diagrama do divisor de tensão

A tensão real é a diferença entre V_1 e V_2 , denominado V_{Real} . A tensão obtida pelo divisor de tensão é a diferença entre V_2 e V_m , denominado V_{medido} . A tensão medida pelo divisor de tensão se relaciona com a tensão real da seguinte forma:

$$V_{medido} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{Real} = \frac{1}{f_m} V_{Real} \quad (5)$$

onde $f_m = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$.

Se o circuito elétrico não for puramente resistivo, os demais componentes do circuito são acrescentados no lugar da resistência R_2 apresentada na Figura 4.5. A tensão obtida pelo divisor de tensão continua sendo a diferença entre V_2 e V_m .

Segundo Almeida (1995) define-se impedância complexa de um circuito como:

$$\bar{Z} = R + jX \quad (6)$$

onde R é a parte real de \bar{Z} , conhecida por resistência e X é a parte imaginária de \bar{Z} , classicamente chamada de reatância. Dessa forma, as impedâncias dos três elementos de circuitos são:

Resistor:

$$\bar{Z}_R = R \quad (7)$$

Indutor:

$$\bar{Z}_L = j\omega L \quad (8)$$

Capacitor:

$$\bar{Z}_C = \frac{-j}{\omega C} \quad (9)$$

Calcula-se a impedância total de um circuito em série somando das impedâncias dos componentes individualmente, assim:

$$\bar{Z}_T = \bar{Z}_R + \bar{Z}_L + \bar{Z}_C \quad (10)$$

Para exemplificar o procedimento, a Figura 4.6 apresenta uma simulação com o programa *Multisim12*, da *National Instruments*, com o circuito acoplado à viga piezoeletrica. Na simulação, a placa DAQ – NI 9201 é utilizada pela aquisição da tensão no divisor de tensão.

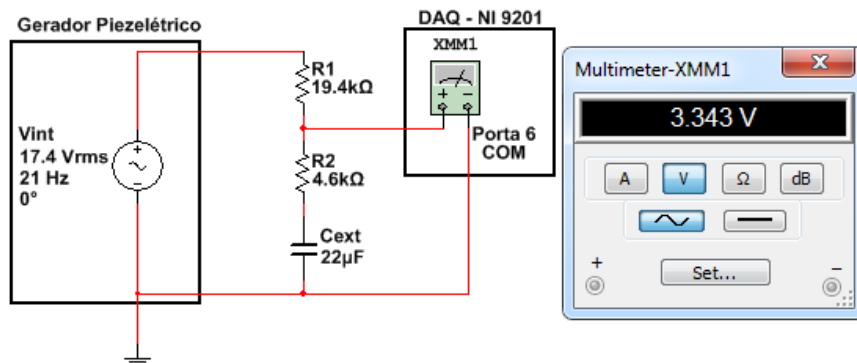


Figura 4.6 - Simulação exemplo do calculo de divisor de tensão para circuito RC

Almeida (1995) define a reatância capacitiva, X_c , como a resistência à passagem de corrente alternada por um indutor ou um capacitor em um circuito e é dada por:

$$X_c = \frac{1}{j2\pi f C_{ext}} [\Omega] \quad (11)$$

onde f é a frequência da tensão elétrica dada em Hz, C é a capacitância dada em Faraday e j é a unidade imaginária.

Para o sistema apresentado na Figura 4.6 o circuito elétrico é constituído por uma reatância capacitiva, X_c , referente ao capacitor C_{ext} e os resistores R_1 , R_2 e R_{shunt} . Com isso, tem-se que:

$$f_m = \frac{jX_c + R_1 + R_2}{R_2 + jX_c} = \frac{\sqrt{X_c^2 + (R_1 + R_2)^2}}{\sqrt{X_c^2 + R_2^2}} \quad (12)$$

onde, R_1 e R_2 são dados em Ω .

Assim,

$$V_{real} = f_m V_{medido} \quad (13)$$

Nesse exemplo, tem-se como dados de entrada:

$$C_{ext} = 22\mu F = 22 \cdot 10^{-6} F \quad (14)$$

$$R_1 = 19.4 K\Omega = 19400\Omega \quad (15)$$

$$R_2 = 4.6 K\Omega = 4600\Omega \quad (16)$$

$$f = 21 Hz \quad (17)$$

$$V_m = 3.343 V \quad (18)$$

Com o objetivo de determinar a tensão real calcula-se a reatância capacitiva, X_c , conforme apresentado na Eq. (11).

$$X_c = \frac{1}{j2\pi f C} = \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot 21 \cdot 22 \cdot 10^{-6}} = 344.49\Omega \quad (19)$$

O fator de multiplicação da tensão medida, f_m , é dada por:

$$f_m = \frac{jX_c + R_1 + R_2}{R_2 + jX_c} = \frac{\sqrt{344.49^2 + (19400 + 4600)^2}}{\sqrt{344.49^2 + 4600^2}} \quad (20)$$

$$f_m = \frac{24000}{4613} = 5.203 \quad (21)$$

Logo, a tensão real, V_{real} é:

$$V_{real} = f_m V_{medido} = 5.203 * 3.343 = 17.395 V \quad (22)$$

Observa-se que a tensão real obtida pelos cálculos realizados produz o um valor muito próximo o da tensão real na simulação, que é de 17.4 V.

4.3 ÂNGULO DE FASE

Os dados de aceleração, velocidade, posição, força e as tensões são salvos e posteriormente analisados a partir de rotina desenvolvida no *Matlab2009b*. Para os dados de tensão, velocidade e força utiliza-se o cálculo por RMS (*Root mean square*) para a determinação da tensão efetiva, velocidade efetiva e força efetiva. Além disso, é necessário determinar o ângulo de fase entre dois sinais. Neste trabalho, o ângulo de fase entre dois sinais é utilizado para os sinais de tensão e corrente elétrica, necessário para se determinar a potência elétrica efetiva, e para os sinais de força e velocidade, necessário para determinar a potência mecânica fornecida. A Figura 4.7 apresenta um exemplo onde se pode verificar a defasagem entre sinais de força e velocidade.

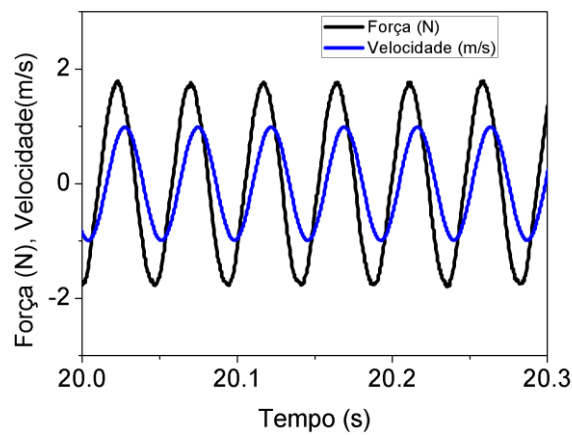


Figura 4.7 - Força e Velocidade em função do tempo

Com o objetivo de se obter o ângulo de fase entre as duas ondas, necessita-se determinar a diferença de tempo em que as ondas passam pelo eixo de simetria. Ambas as ondas são transladadas sobre o eixo $y=0$, sendo assim, para ambas, o eixo de simetria é $y=0$. Para determinar a diferença de tempo, utiliza-se um procedimento adotado por Palomino (2012), onde todos os valores positivos da onda são convertidos em +1 e os valores negativos em -1, transformando assim a onda ondulatória em uma onda quadrada. Após essa transformação do sinal, determinam-se os pontos “críticos”, que ocorrem na transição de +1 para -1, conforme indicado em pontos azuis e pretos na Figura 4.8. Chama-se, então, de tempo crítico da força, T_f , o tempo imediatamente antes da transição da força e o tempo crítico da velocidade, T_v , como o tempo imediatamente antes da transição da velocidade. A Figura 4.8 apresenta as ondas quadradas e os pontos T_f e T_v , enquanto Figura 4.9 apresenta o mesmo resultado com *zoom* dos pontos críticos.

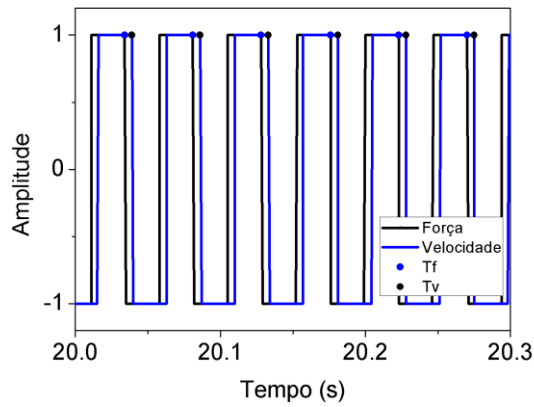


Figura 4.8 - Sinais de força e velocidade transformados em onda quadrada

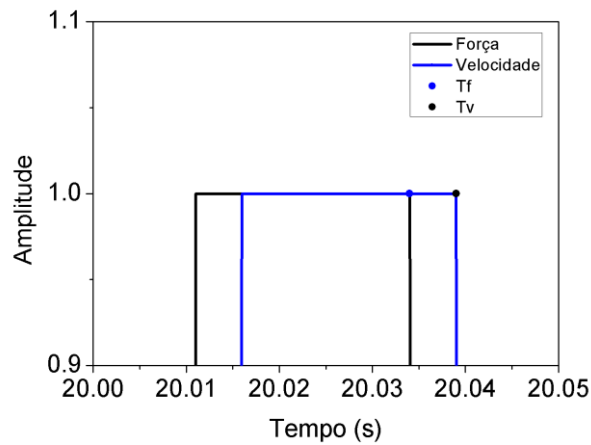


Figura 4.9 - Força e Velocidade onda quadrada ampliada

A diferença dos tempos é:

$$\Delta T = T_f - T_v \quad (23)$$

Sabendo-se que a frequência dos sinais é igual à frequência de excitação do sistema, ω , tem-se que o ângulo de fase, θ , é dado por

$$\theta = 2\pi f \Delta T \quad (24)$$

O ângulo de fase medido, θ_{medido} , é obtido a partir de uma média dos valores de ângulo de fase encontrados:

$$\theta_{medido} = 2\pi f \frac{\sum_{i=1}^n \Delta T_i}{n} \quad (25)$$

onde ΔT_i consiste nas diferenças de tempos obtidos a partir das transições presentes nos sinais obtidos e n é a quantidade de transições disponíveis.

4.4. RETIFICAÇÃO DE FONTES AC

Retificação é o processo de conversão de corrente alternada para corrente contínua, podendo ser realizada a partir da utilização de diodos ou de válvulas eletrônicas. Quando são utilizados quatro diodos para realizar a retificação, chama-se de ponte retificadora. A corrente contínua é essencial para a alimentação dos dispositivos e também para o carregamento de baterias. A retificação da tensão alternada que é produzida pela viga piezolétrica apresenta um inconveniente, pois os diodos consomem uma parte da energia produzida. A primeira opção considerada para um diodo de baixo consumo é o diodo presente na ponte retificadora da viga PZT25w, o diodo BAV-199, entretanto esse diodo não foi encontrado a disposição no mercado brasileiro, sendo um diodo muito específico para aplicações com baixo consumo de energia.

Além disso, como o diodo é um novo componente no circuito elétrico, ele influencia a dinâmica do sistema. Assim, nos experimentos é avaliada a diferença de energia gerada nas situações sem e com os diodos.

O diodo, D_1 , utilizado para a construção da ponte foi o diodo de Zener 1N746 e o capacitor, C_1 , de $1000\mu\text{F}$. A Figura 4.10 apresenta uma figura esquemática da ponte retificadora. A Figura 4.11 mostra a ponte retificadora montada na *protoboard*.

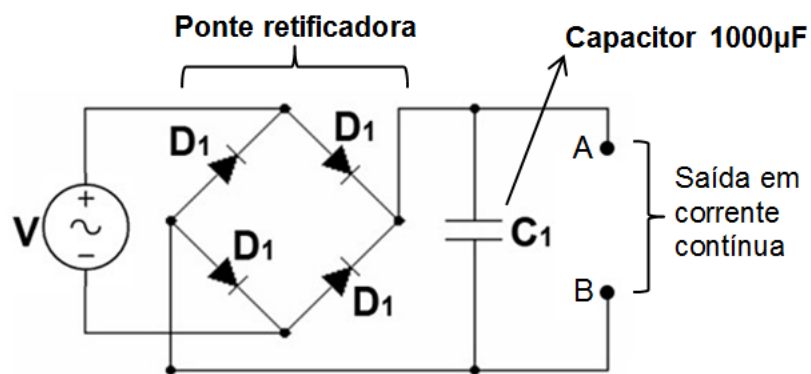


Figura 4.10 - Esboço da Ponte retificadora.

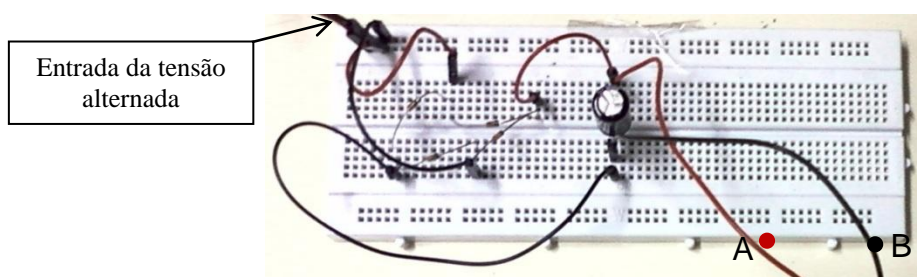


Figura 4.11 - Circuito retificador montado na *Protoboard*.

4.5. CARREGAMENTO DE BATERIAS

O carregamento de baterias não é procedimento trivial. Vários fatores influenciam no carregamento de baterias, como tensão da fonte, corrente elétrica gerada pela fonte, tipo da bateria e capacidade da bateria. O circuito para o carregamento das baterias está apresentado na Figura 4.12 e foi proposto por Sodano (2003) em seus estudos com baterias do tipo Ni-MH (Níquel-hidreto Metálico) cujo o objetivo era determinar se os materiais piezelétricos MFC e PZT possuem capacidade de carregar baterias desse tipo. Nesse estudo, a tensão na bateria é coletada em função do tempo de carregamento, como apresentado na Figura 4.13. A partir desses dados é possível analisar o potencial de carregamento do material piezelétrico.

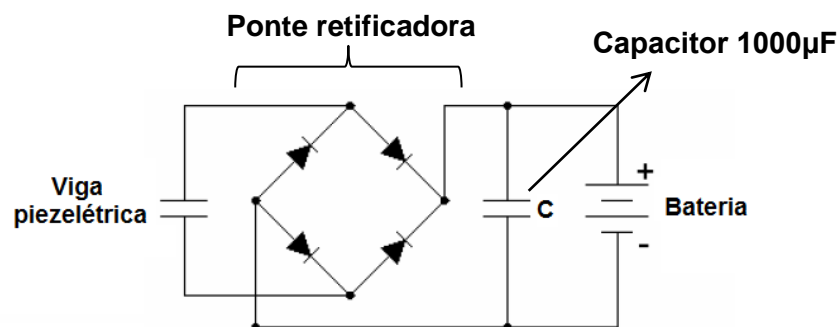


Figura 4.12 - Circuito para carregamento de baterias adaptado de Sodano, 2003).

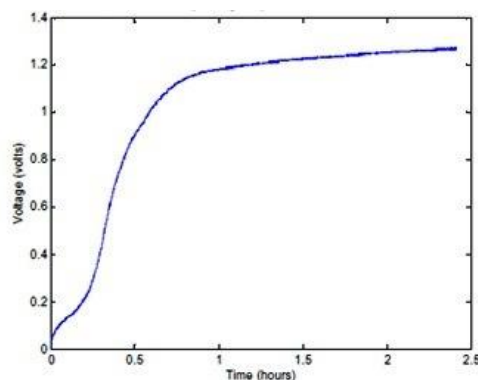


Figura 4.13 - Resultado do carregamento de uma bateria de 80mAh, 1.2V utilizando PZT (Sodano, 2003)

4.6 DETERMINAÇÃO DO AMORTECIMENTO

Rao (2009) define como Largura de Banda a diferença entre as duas frequências relacionadas à amplitude de resposta do sistema de:

$$R(r_1) = R(r_2) = \frac{R_{max}}{\sqrt{2}} \quad (26)$$

onde R_{max} é a amplitude máxima. Tem-se também a seguinte expressão para a largura de banda:

$$\frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_n} \approx 2\zeta \quad (27)$$

Assim, o amortecimento presente pode ser determinado pela largura de banda e é dado por:

$$\zeta \approx \frac{\omega_1 + \omega_2}{2\omega_n} \quad (28)$$

A Figura 4.14 mostra como obter a largura de banda a partir da FFT da resposta do sistema.

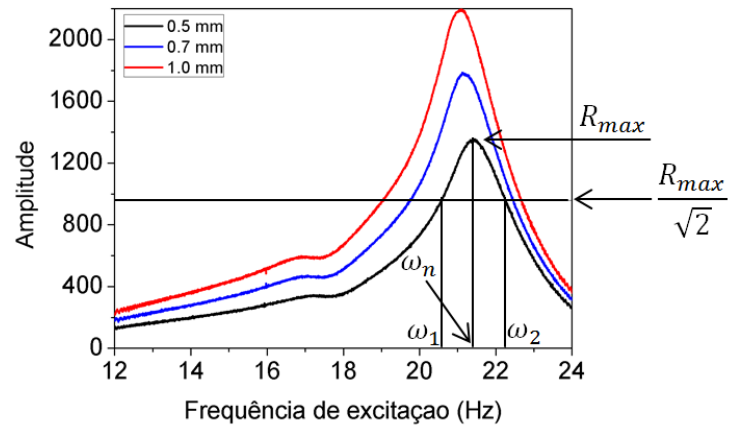


Figura 4.14 – Largura de banda a partir da FFT.

Tem-se ainda que o pico de ressonância ocorre em:

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (29)$$

Assim, sabe-se que o amortecimento gera uma frequência de ressonância menor que a frequência natural do sistema.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

É apresentado nesse capítulo os experimentos realizados e seus resultados.

5.1. INFLUÊNCIA DO MATERIAL PIEZELETRICO NO SUBSTRATO

A viga piezelétrica, como descrito anteriormente, é composta pelo material piezelétrico e o substrato base. O material do substrato não é descrito no *Datasheet* da fabricante *Smart-Materials*. A sua caracterização é de fundamental importância para avaliar a influência na dinâmica do sistema devido ao material piezelétrico.

A partir da literatura, sabe-se que quando o material piezelétrico é acoplado a uma viga, altera-se a resposta dinâmica da viga, ou seja, altera-se a rigidez e o amortecimento do conjunto. Assim, a caracterização do substrato e a identificação do comportamento dinâmico do substrato sem a presença do material piezelétrico é fundamental para o estudo do comportamento dos materiais piezelétricos.

Dois procedimentos são realizados. O primeiro é uma análise analítica para determinar a frequência de ressonância do substrato, calculada a partir do módulo de elasticidade obtido experimentalmente. O segundo procedimento consiste em avaliar o comportamento dinâmico do substrato experimentalmente a partir da excitação com o *shaker*.

A determinação experimental do módulo de elasticidade do substrato é realizada a partir de um ensaio de deformação da viga, através da relação entre deflexão e forçamento imposto. A partir do módulo de elasticidade é possível determinar a frequência de ressonância da viga a partir de equações apresentadas por Rao (2009).

Para coletar a deflexão, coloca-se o substrato em engaste do tipo fixo-livre. A deflexão, medida por um paquímetro, é imposta a partir da utilização de pequenos pesos na ponta da viga. A Figura 5.1 apresenta uma foto do experimento.



Figura 5.1 - Procedimento experimental para determinação do módulo de elasticidade.

Os dados da força em função da deflexão da viga obtidos são apresentados na Figura 5.2. Com esses dados utiliza-se a equação apresentada em Rao (2009) para a deflexão na posição onde a força é aplicada:

$$P(y) = \frac{3yEI}{L_{exp}^3} \quad (30)$$

onde P é a força na ponta da viga, y é a deflexão realizada, E é o módulo de elasticidade do material, I é o momento de inércia e L_{exp} é a distância do engaste até o ponto de aplicação da força. O ponto de engaste é realmente um problema para esse tipo de análise. Foi considerado como ponto de engaste o centro da placa que faz a fixação da viga. Pelo método dos mínimos quadrados tem-se que a inclinação da reta, a , é

$$a = 209.065 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (31)$$

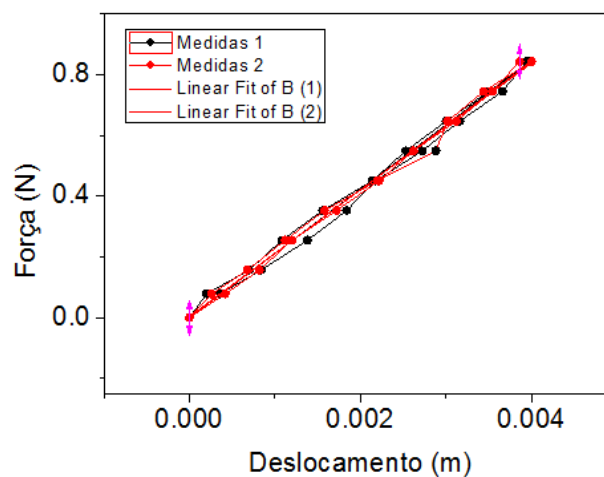


Figura 5.2 - Resultados das medidas de deflexão.

A Eq. 30 pode ainda ser escrita na forma:

$$P(y) = \frac{3yEI}{L_{exp}^3} = ay \quad (32)$$

onde a é a inclinação da reta da Figura 5.2. E, portanto, EI pode ser calculado como

$$EI = \frac{aL_{exp}^3}{3} = \frac{209.065 * 0.097^3}{3} = 0.065 \left[m^4 * \frac{N}{m^2} \right] \quad (33)$$

Sabendo-se o valor de EI , calcula-se a frequência de ressonância da viga fixa-livre (Rao, 2009):

$$\omega_1 = (\beta l_1^2) \sqrt{\frac{EI}{\rho A (L_{viga})^4}} \quad (34)$$

em que $\beta l_1 = 1.875104$, $\rho = 2.477 * 10^3 \text{ kg/m}^3$, $A = 3.67 * 10^{-5} \text{ m}^2$ e $L_{viga} = 0.173 \text{ m}$.

Dessa forma tem-se que a primeira frequência de ressonância da viga é

$$\omega_1 = 98.956 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 15.749 \text{ Hz} \quad (35)$$

O experimento no *shaker* consiste em realizar uma varredura da frequência de excitação para diferentes amplitudes. A Figura 5.3 apresenta o substrato acoplado ao *shaker*. Pode-se observar no substrato um acelerômetro miniaturizado que é responsável por capturar a aceleração da viga.

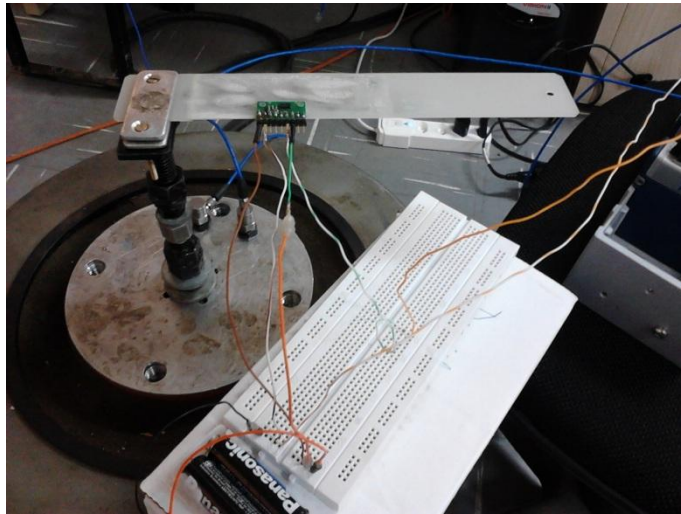


Figura 5.3 - Substrato acoplado ao shaker

A mesma varredura da frequência de excitação é realizada para os três situações: MFC acoplado ao substrato, PZT acoplado ao substrato e apenas o substrato. As Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6 apresentam a FFT da resposta da viga para diferentes amplitudes de excitação de base. A Figura 5.7 apresenta a FFT para os três casos com a amplitude de 1.0mm.

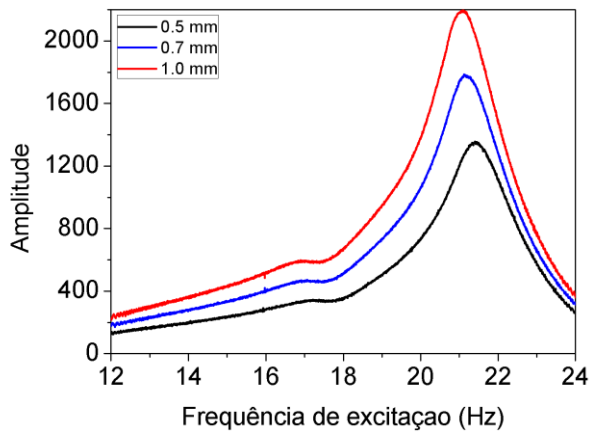


Figura 5.4 - Gráfico da FFT do deslocamento da viga com o MFC

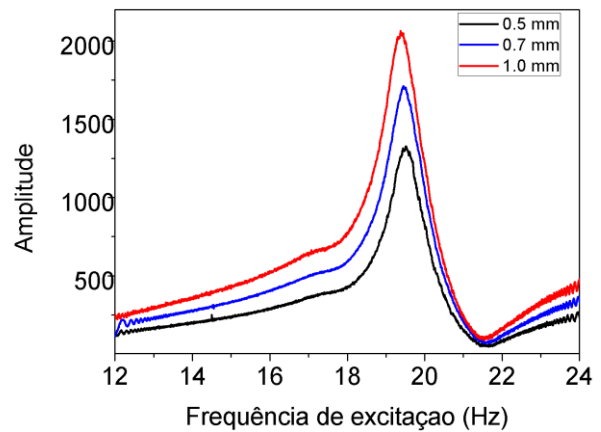


Figura 5.5 - Gráfico da FFT do deslocamento da viga com o PZT

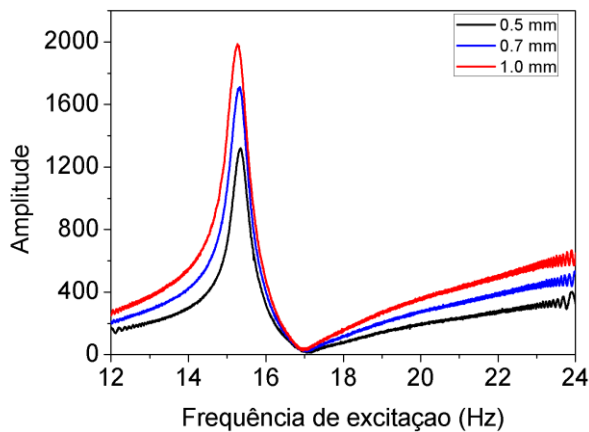


Figura 5.6 - Gráfico da FFT do deslocamento da viga com o substrato

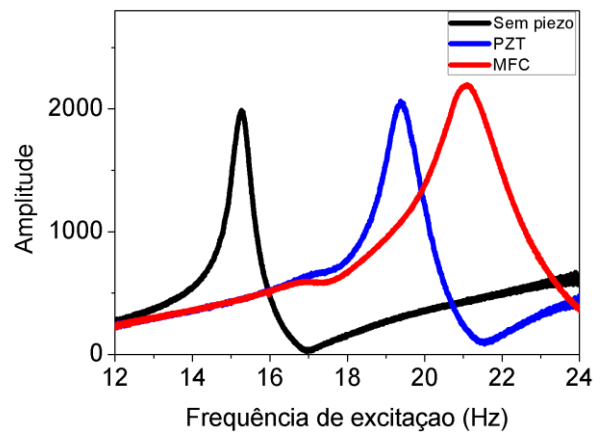


Figura 5.7 - Comparação entre as três FFTs com amplitude de deslocamento de base de 1mm

Observa-se, a partir das Figura 5.4 e Figura 5.5, que a frequência de ressonância desloca-se ligeiramente à esquerda com o aumento da amplitude. A partir da Figura 5.6 também é verificado um deslocamento da frequência de ressonância quando avalia-se apenas o substrato. O deslocamento da frequência de ressonância pode ser melhor observado nos gráficos apresentados no ANEXO III.

Existem basicamente dois motivos para o deslocamento da frequência de ressonância verificado nas vigas de MFC e PZT: o amortecimento que o material piezolétrico adiciona ao sistema e o a não linearidade da rigidez do material piezolétrico. Em seguida, avalia-se qual dos dois motivos é realmente responsável por essa mudança na frequência de ressonância.

O amortecimento presente em cada uma das situações é avaliado a partir da largura de banda, conforme apresentado na seção 4.6, sendo mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Frequência de ressonância e amortecimento para cada caso.

Material	Amplitude	ω_r	ζ
Apenas substrato	0.5	15.35	0.01367
	0.7	15.33	0.01467
	1.0	15.27	0.01702
MFC	0.5	21.39	0.03902
	0.7	21.12	0.03929
	1.0	21.10	0.04004
PZT	0.5	19.51	0.02022
	0.7	19.44	0.02261
	1.0	19.37	0.0237

Para avaliar o deslocamento das frequências de ressonância, ω_r , para as diferentes amplitudes de excitação de base, avalia-se a razão entre elas, $[R_\omega]$, como

$$[R_\omega]_{\frac{0.5}{0.7}} = \frac{[\omega_r]_{0.5}}{[\omega_r]_{0.7}} \quad (36)$$

e como a frequência de ressonância também pode ser expressa analiticamente a partir do amortecimento como

$$[\omega_r]_{\zeta_{0.5}} = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta_{0.5}^2} \quad (37)$$

logo, a razão entre as frequências de ressonância dadas a partir do amortecimento encontrado é

$$[R_\zeta]_{\frac{0.5}{0.7}} = \frac{\omega_n \sqrt{1 - 2\zeta_{0.5}^2}}{\omega_n \sqrt{1 - 2\zeta_{0.7}^2}} \quad (38)$$

onde os sub-índices 0.5 e 0.7 representam as amplitudes de 0.5mm e 0.7mm, respectivamente. Para verificar o percentual de deslocamento da frequência de ressonância uma com relação à outra, define-se a razão $[R_\omega]\%$:

$$[R_\omega]\% = 100 \left(\frac{[\omega_r]_{0.5} - [\omega_r]_{0.7}}{[\omega_r]_{0.7}} \right) - 100 \quad (39)$$

e da mesma forma, para as frequências de ressonância dadas a partir do amortecimento, a razão $[R_\zeta]\%$, como

$$[R_\zeta]\% = 100 \left(\frac{\omega_n \sqrt{1 - 2\zeta_{0.5}^2} - \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta_{0.7}^2}}{\omega_n \sqrt{1 - 2\zeta_{0.7}^2}} \right) - 100 \quad (40)$$

Assim, estão apresentados na Tabela 5.2 os resultados obtidos de $[R_\omega]\%$ e $[R_\zeta]\%$.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos de $[R_\omega]\%$ e $[R_\zeta]\%$.

Material	Amplitude	$[R_\omega]\%$	$[R_\zeta]\%$
Apenas substrato	0.5/0.7	0.1449	0.00141
	0.7/1.0	0.3964	0.00372
	0.5/1.0	0.5420	0.00514
MFC	0.5/0.7	1.3061	0.00107
	0.7/1.0	0.0890	0.00296
	0.5/1.0	1.3963	0.00403
PZT	0.5/0.7	0.3558	0.00511
	0.7/1.0	0.3740	0.00259
	0.5/1.0	0.7312	0.00770

A análise da porcentagem da razão entre as frequências de ressonâncias, $[R_\omega]\%$, pela Tabela 5.2 mostra que com apenas o substrato ocorreu uma redução de 0.1449% na frequência de ressonância quando alterado a amplitude de 0.5mm para 0.7mm. Redução de 0.3964% de 0.7mm para 1.0mm e de 0.5420% de 0.5mm para 1.0mm. Para o MFC a redução na frequência de ressonância chegou a 1.396% de 0.5mm para 1.0mm e no PZT a 0.7312% de 0.5mm para 1.0mm.

Ainda analisando os resultados de $[R_\omega]\%$, conclui-se que não foi possível visualizar a não-linearidade da rigidez do material piezelétrico, pois a diminuição da frequência de ressonância também ocorre no substrato.

Comparando os resultados de $[R_\omega]\%$, com os resultados de $[R_\zeta]\%$ tem-se que o amortecimento não é o principal responsável pelo deslocamento da frequência de ressonância visto que a porcentagem relativa a esse deslocamento é muito inferior ao deslocamento medido, na ordem de 100 vezes menor.

5.2. EXPERIMENTO 1 – VARREDURA DA FREQUÊNCIA DE EXCITAÇÃO

A geração de energia do dispositivo piezelétrico está diretamente relacionada com deformação do material, que é maior próximo às frequências de ressonância. Neste experimento, o ensaio de varredura da frequência de excitação tem como objetivo determinar a primeira frequência de ressonância dado um circuito acoplado puramente resistivo com uma resistência externa fixa de 4.3k Ω para as vigas de MFC e PZT e 10k Ω para a viga PZT25w. A análise é realizada a partir da FFT da tensão gerada pela viga piezelétrica.

No caso das vigas de MFC e PZT são realizadas varreduras de 12 a 24 Hz para diferentes amplitudes de excitação de base: 0.5mm, 0.7mm e 1.0mm. A partir da Figura 5.9 pode-se observar que

para uma amplitude de 1.0mm a frequência de ressonância ocorre em torno de 21 Hz. Com a diminuição da amplitude, a frequência de ressonância aumenta, ocorrendo em torno de 21.5 Hz para 0.5mm. Para o PZT, apresentado na Figura 5.8 observa-se a frequência de ressonância em 19.5Hz para a amplitude 1mm e 19.6Hz para 0.5mm.

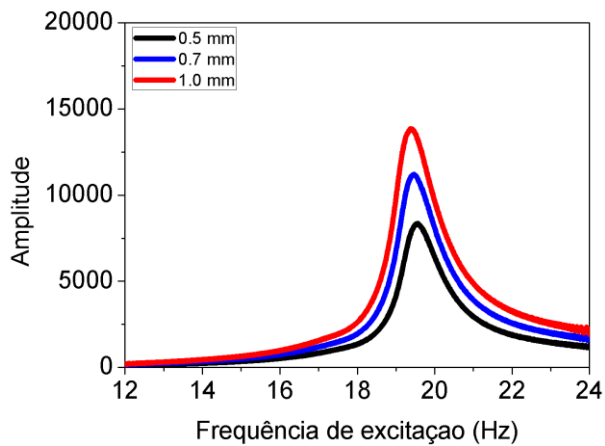


Figura 5.8- FFT da tensão da viga de PZT

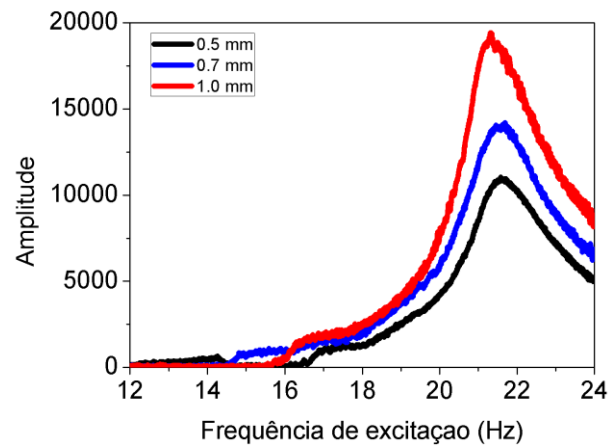


Figura 5.9 - FFT da tensão da viga de MFC

Para a viga PZT25w, a varredura foi realizada de 38 a 42 Hz para diferentes amplitudes de excitação de base: 0.15mm, 0.13mm e 0.11mm. O mesmo fenômeno do deslocamento da frequência de ressonância pode ser observado nos resultados apresentados na Figura 5.10.

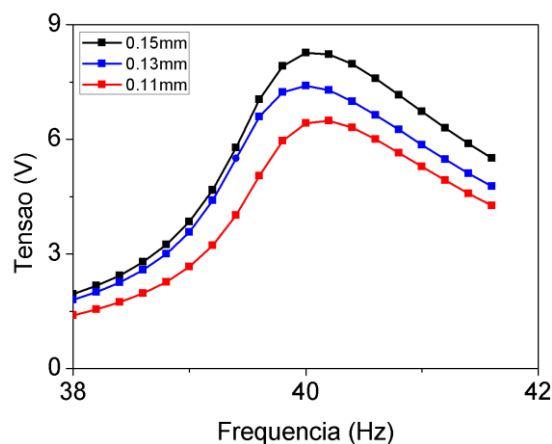


Figura 5.10 - Tensão em função da frequência de excitação para a viga PZT25w

A partir desse experimento verifica-se que é possível variar a frequência de ressonância para diferentes amplitudes de oscilação de base. As amplitudes de 1mm para MFC e PZT e 0.15mm para PZT25w foram escolhidas para os demais ensaios. Essas amplitudes foram selecionadas para diminuir os riscos de quebra e os danos causados pela fadiga. Além disso, as frequências de 21Hz, 19.5Hz e 40Hz são consideradas nos demais ensaios realizados das vigas de MFC, PZT e PZT25w, respectivamente.

5.3. EXPERIMENTO 2 – MODIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA EXTERNA

Nesta etapa, avalia-se a tensão elétrica, a corrente elétrica, a potência elétrica, ângulo de fases, potência mecânica e eficiência para diferentes valores de resistência externa considerando um circuito puramente resistivo. Para o experimento utiliza-se uma amplitude de excitação fixa de 1.0 mm e duas frequências distintas, 21 Hz para a viga de MFC e 19.5 Hz para a viga de PZT conforme descrito anteriormente. A resistência externa do circuito é dada pela soma das duas resistências, R_1 e R_2 . São utilizadas duas resistências em série devido ao divisor de tensão, conforme explicado na seção 4.2. Seguindo a metodologia de análise dos dados, a Figura 5.11 apresenta as tensões obtidas. Observa-se que a tensão da viga de MFC é maior até uma resistência de aproximadamente 100 k Ω , para resistências maiores, a viga PZT gera tensões maiores. Em ambos os casos, nota-se que a tensão tende a um valor constante com o aumento da resistência. A Figura 5.12 apresenta a corrente elétrica obtida e pode-se observar, de forma análoga ao comportamento da tensão, que a corrente elétrica gerada pelo MFC é superior à corrente gerada pelo PZT até 100 k Ω aproximadamente. No caso da corrente, no entanto, os valores obtidos pelas duas vigas ficam bem próximos para valores de resistências mais altos que 100k Ω .

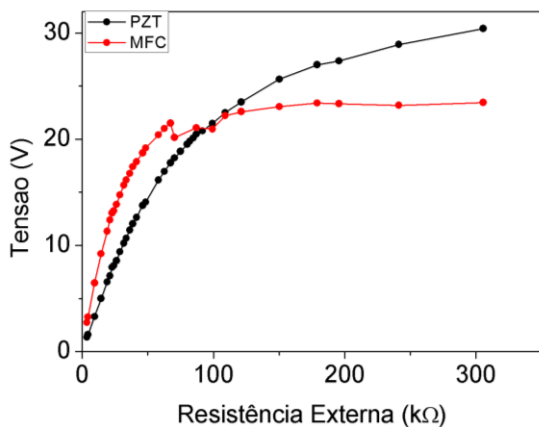


Figura 5.11 - Tensão em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.

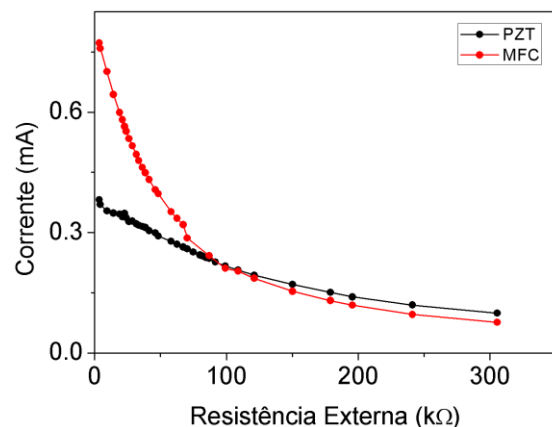


Figura 5.12 - Corrente elétrica em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.

A Figura 5.13 apresenta a potência elétrica gerada pelas duas vigas. Observa-se que a viga de MFC apresenta um desempenho superior em relação a potência máxima gerada em comparação com a viga de PZT. A viga de MFC alcança um valor máximo de aproximadamente 7.8mW com a resistência externa de 38.44k Ω , enquanto a viga de PZT alcança aproximadamente 4.8mW com a resistência externa de 86.9k Ω .

A literatura afirma que o PZT possui maior capacidade de geração de energia elétrica que o MFC. Os resultados obtidos não estão contrários à literatura, pois a potência elétrica gerada está também relacionada com as dimensões do material piezoeletrico utilizado. Neste contexto, a Figura 5.14 apresenta a potência elétrica gerada por unidade de área, mostrando um desempenho superior da viga de PZT em relação à viga de MFC.

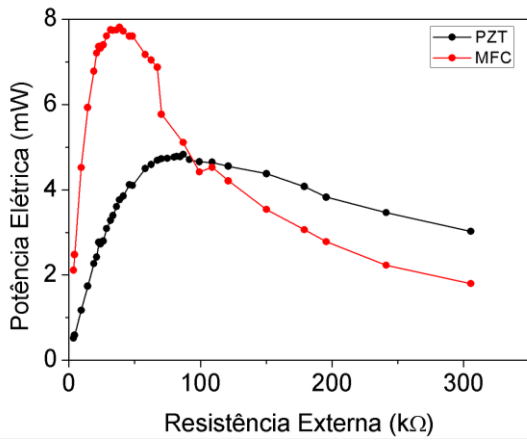


Figura 5.13 - Potência elétrica em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.

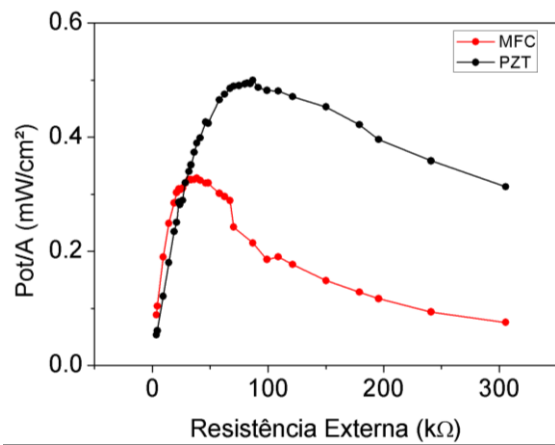


Figura 5.14 - Potência elétrica por cm² em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.

As Figura 5.15 e Figura 5.16 apresentam a força realizada pelo shaker e a velocidade da base, respectivamente. Esses dados são importantes para determinar a potência mecânica fornecida ao sistema, conforme apresentada na Figura 5.17. A partir das informações de potência mecânica fornecida é calculada a eficiência na conversão de energia mecânica em elétrica, apresentada na Figura 5.18. Observa-se na Figura 5.18 que a eficiência máxima foi de 9.35% para a viga de PZT e de 19.1% para a viga de MFC.

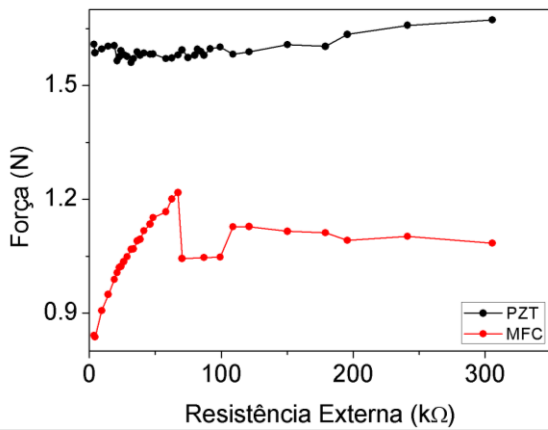


Figura 5.15 - Força em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.

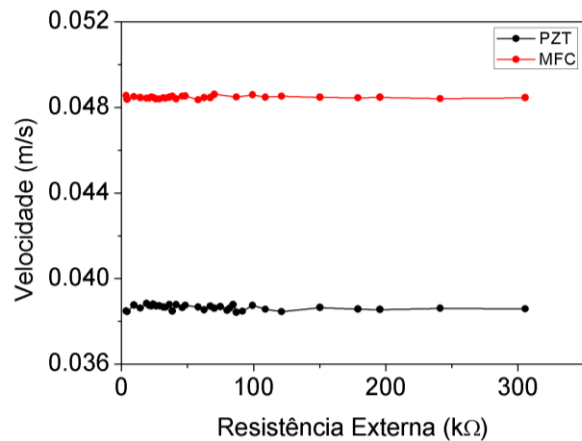


Figura 5.16 - Velocidade em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC.

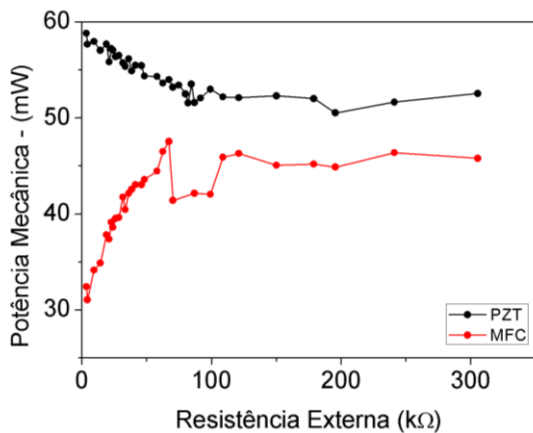


Figura 5.17 - Potência mecânica fornecida em função da resistência externa.

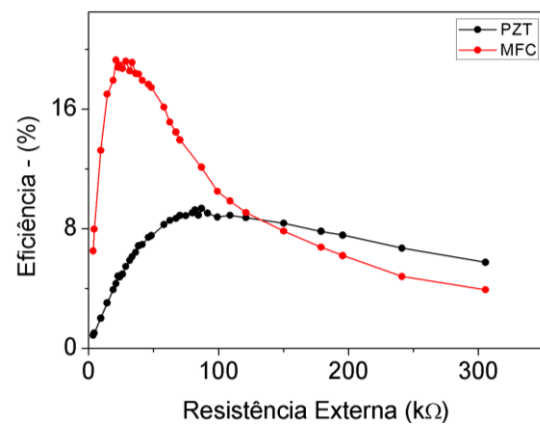


Figura 5.18 - Eficiência em função da resistência externa para as vigas de PZT e MFC

5.4. EXPERIMENTO 3 – RETIFICAÇÃO DA TENSÃO

O objetivo desse experimento é analisar o comportamento da retificação apresentada na Figura 4.12 na tensão, corrente e potência elétrica geradas. A ponte retificadora considerada é sempre a mesma e apenas a resistência externa do circuito é alterada. Os valores de amplitude e frequência de excitação de base são os estabelecidos anteriormente.

A tensão e corrente geradas são apresentadas nas Figura 5.19 e Figura 5.20, respectivamente, para os três materiais considerados. A partir dos resultados tem-se que a viga de PZT25w é a que gera maior quantidade de corrente e tensão, logo, é a mais apropriada para realizar o carregamento de baterias. Cabe mencionar que a corrente gerada pela fonte é muito importante para o carregamento apropriado da bateria.

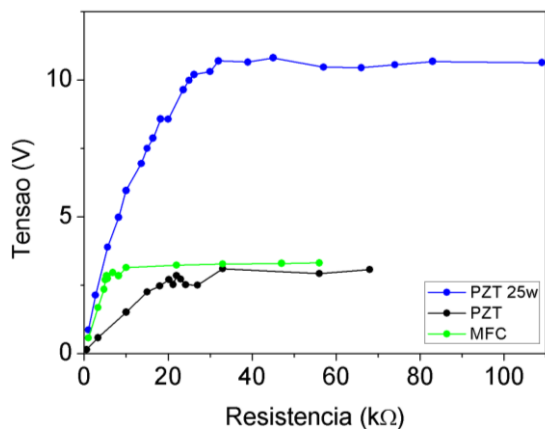


Figura 5.19 - Tensão DC em função da resistência externa.

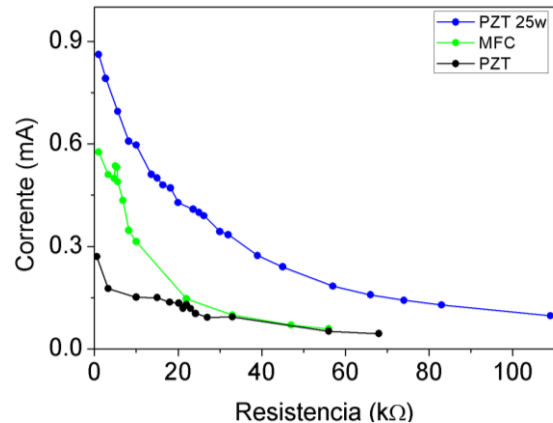


Figura 5.20 - Corrente DC em função da resistência externa.

A partir dos resultados para potência elétrica, mostrada na Figura 5.21, pode-se observar que ocorre uma redução da potência máxima produzida pela viga de MFC de 7,8mW, conforme apresentado na Figura 5.13, para 2,53mW, ou seja, uma redução de 67,5% na potência máxima. Ocorreu também o deslocamento do pico de potência máxima que antes ocorria para uma resistência externa de 38,44 kΩ, passou para 5,6kΩ depois da retificação.

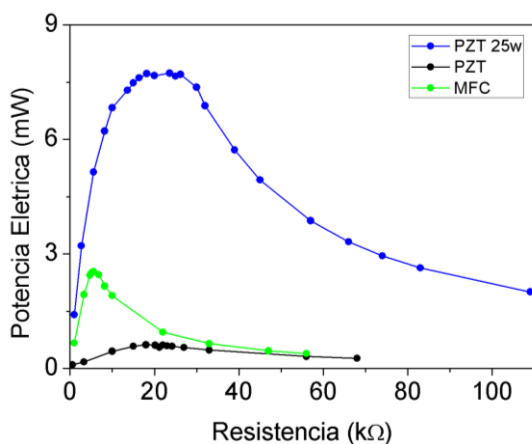


Figura 5.21 - Potência elétrica em função da resistência externa.

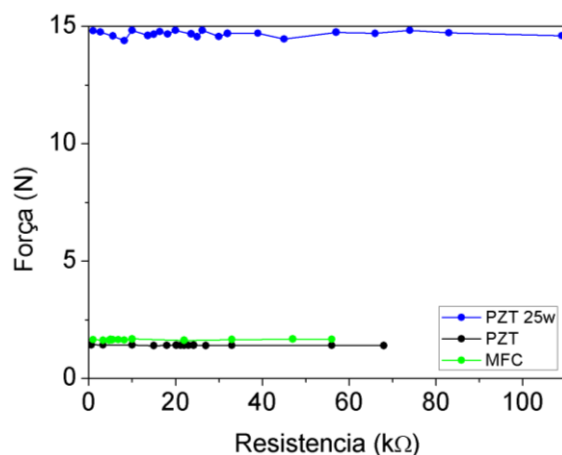


Figura 5.22 - Força em função da resistência externa.

As Figuras Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.25 apresentam a Força, velocidade e potência mecânica. Os resultados do MFC e do PZT obtidos para a potência mecânica estão coerentes, mas o resultado para o PZT25w está incorreto. O erro ocorre em função do ângulo de fase maior que 90° obtido entre as força e a velocidade, conforme apresentado na Figura 5.24. Como o $\cos(\theta) < 1$ para $90 < \theta < 270$, a potência mecânica obtida é negativa, o que não é coerente. Logo, os resultados para a potência mecânica e a eficiência do PZT25w devem ser descartados. A partir da eficiência obtida, apresentada na Figura 5.26, tem-se uma eficiência máxima de 4.3% para o MFC com 5.6k Ω e de 2.26% com 18 k Ω para o PZT. Uma redução de aproximadamente 4 vezes na eficiência das vigas de MFC e PZT é observada em comparação ao circuito não retificado.

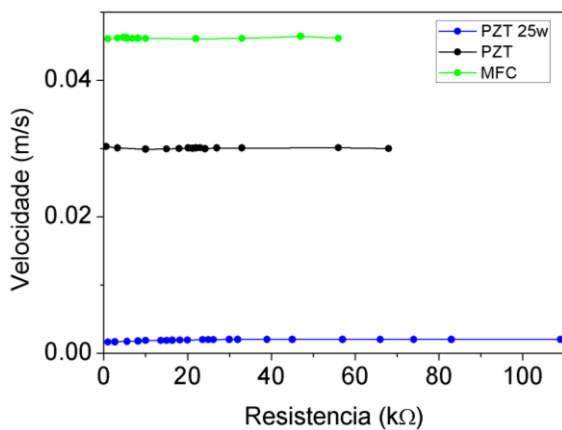


Figura 5.23 - Velocidade em função da resistência externa.

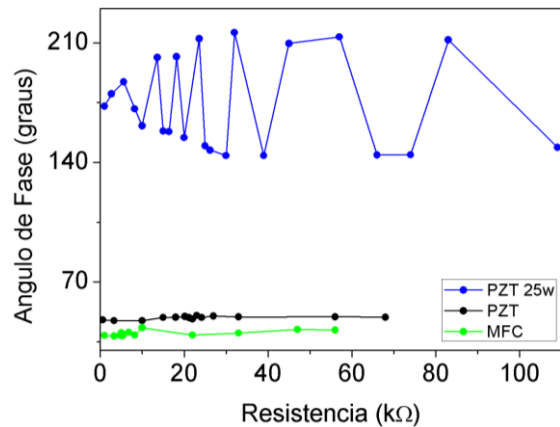


Figura 5.24 - Ângulo de fase entre a força e a velocidade.

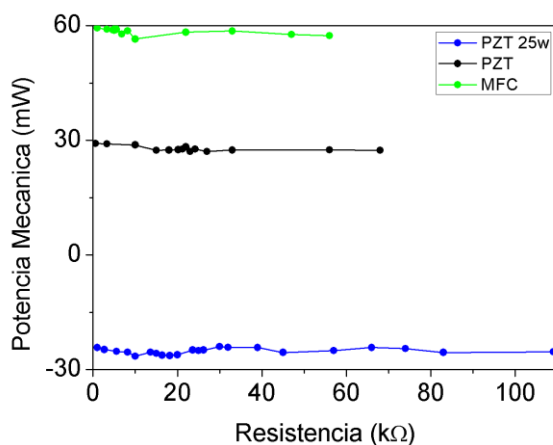


Figura 5.25 - Potência mecânica em função da resistência externa.

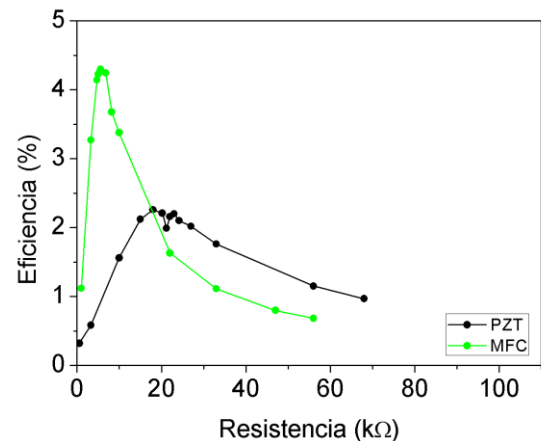


Figura 5.26 - Eficiência em função da resistência externa.

5.5. EXPERIMENTO 4 – CARREGAMENTO DE BATERIAS

Neste experimento o objetivo é realizar o carregamento de uma bateria Ni-MH de 2.4V e capacidade de 600mAh utilizando as vigas de PZT, MFC e PZT25w. As mesmas amplitudes e frequências de excitação de base definidas anteriormente são utilizadas. Com o objetivo de realizar uma comparação entre o carregamento realizado pelas vigas e um processo de carregamento conhecido, utilizou-se um carregador de celular de 8V e 1.2A para realizar o carregamento da bateria. Antes de cada carregamento é realizado a descarga da bateria por um resistor de 10Ω durante várias horas.

Para o carregamento é utilizado o procedimento de carregamento mostrado na seção 4.5. A Figura 5.27 apresenta o circuito que realiza o carregamento da bateria. Pode-se observar a fonte de tensão alternada, os diodos da ponte retificadora, o capacitor para filtro, a bateria, a chave de três posições e o DAQ.

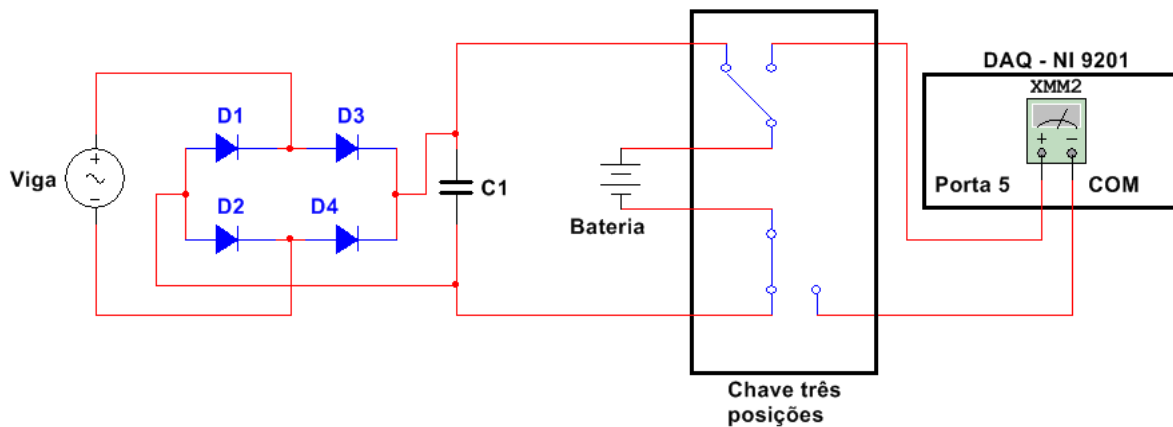


Figura 5.27 - Circuito de carregamento da bateria.

Os dados de tensão da bateria foram obtidos alterando o chaveamento a cada 30 segundos nos primeiros 5 minutos e posteriormente a cada minuto. Os dados de tensão da bateria são adquiridos por 30 segundos e posteriormente analisados no *Matlab*. A Figura 5.28 apresenta os resultados obtidos do carregamento com as vigas e com a fonte de 8V.

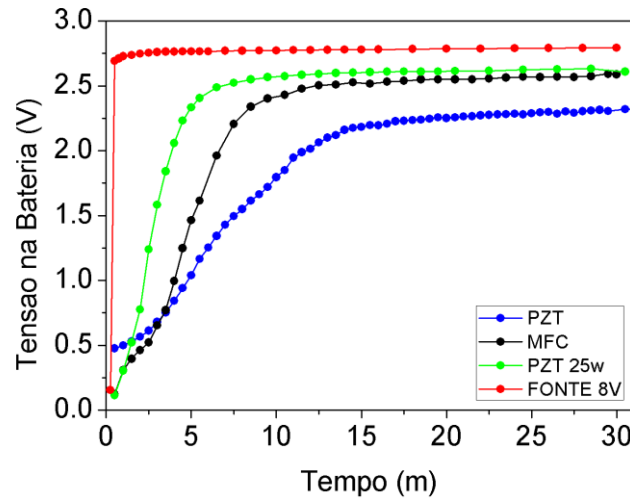


Figura 5.28 - Tensão da bateria em função do tempo de carregamento.

Observa-se na Figura 5.28 que as tensões da bateria estabilizam em 2.79V, 2.62V, 2.57V, 2.36V para a Fonte 8V, PZT25w, MFC e PZT, respectivamente. A fonte de 8V apresenta o carregamento completo da bateria. Em uma avaliação preliminar percebe-se, comparando com resultados de Sodano (2003), que todas as vigas conseguem impor à bateria uma carga. A viga de PZT25w é a viga que possui maior capacidade de impor carga à bateria, seguida da viga de MFC e de PZT. No entanto, com esses resultados não se pode afirmar a porcentagem de carga que as vigas conseguiram colocar na bateria durante 30 minutos.

Para se ter uma ideia da carga colocada na bateria, assumi-se que a corrente máxima produzida pela viga PZT25w, em torno de 0.9mA, é a corrente de carregamento da bateria. No caso da Fonte 8V, a corrente é 1.2A. Adotando ainda a hipótese ideal para o carregamento em que toda a carga gerada pela fonte é armazenada na bateria tem-se que a carga armazenada na bateria, C_{arm} , é dada por

$$C_{arm} = Ci \cdot T_{carga} \quad (41)$$

onde, Ci é a corrente imposta na bateria, e T_{carga} é o tempo de carregamento. Assim, a carga armazenada pela Fonte de 8V é:

$$C_{arm_{8V}} = 1200[mA] \cdot \frac{1}{2}[h] = 600 [mAh] \quad (42)$$

e a carga armazenada pela viga PZT25w é aproximadamente:

$$C_{arm_{8V}} = 0.9[mA] \cdot \frac{1}{2}[h] = 0.45 [mAh] \quad (43)$$

Os resultados da carga armazenada mostram a diferença entre os dois carregamentos. Por mais que as tensões alcançadas na bateria a partir do carregamento da fonte de 8V e da PZT25w tenham sido próximas, o carregamento da bateria com a viga PZT25w foi mais de 1000 vezes inferior à com a Fonte de 8V.

Assim, sabe-se que a partir da teoria que a viga de PZT25w colocou uma pequena carga na bateria, entretanto, necessita-se avaliar se esta pequena carga está de fato na bateria. Com o objetivo de obter essa informação é realizado um ensaio de descarga da bateria, apresentado na próxima seção.

5.6. EXPERIMENTO 4 – DESCARGA DAS BATERIAS

Para determinar a quantidade de carga da bateria, é realizado o descarregamento das mesmas baterias carregadas no experimento anterior utilizando resistores de 10Ω e 1000Ω para as baterias carregadas pela Fonte 8V e viga PZT25w, respectivamente. A diferença entre os resistores utilizados para descarregar as baterias é devido à previsão de carga nas baterias. Como a bateria carregada pela viga PZT25w possui baixa carga, avaliou-se que utilizando um resistor de maior resistência mostraria melhor o comportamento da descarga da bateria. Diferentemente da bateria carregada pela viga PZT25w, a bateria carregada pela Fonte 8V é capaz de alimentar um resistor de menor resistência por um bom período de tempo.

A Figura 5.29 e Figura 5.30 apresentam as tensões nos resistor durante o descarregamento da bateria carregada pela viga PZT25w e pela Fonte 8V, respectivamente. Na Figura 5.30 pode-se observar que a tensão mantida pela bateria é aproximadamente constante em 2.5V durante 51 minutos até que acontece a queda de tensão da bateria. Em contrapartida, a Figura 5.29 mostra que a bateria carregada pelo PZT25w não foi capaz de manter uma tensão constante em um resistor de $1k\Omega$. No entanto, observa-se que a viga de PZT25w foi capaz de introduzir uma carga à bateria, mesmo que pequena.

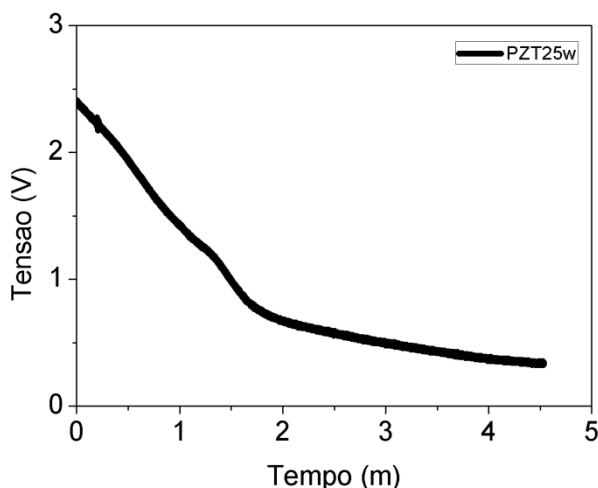


Figura 5.29 - Tensão no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela viga PZT25w.

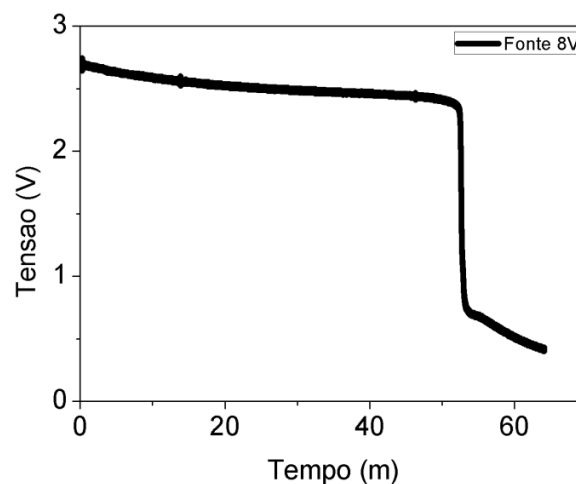


Figura 5.30 - Tensão no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela Fonte 8V.

As Figura 5.31 e Figura 5.32 apresentam a corrente que passa pelos resistores nas baterias carregadas pela viga PZT25w e Fonte 8V, respectivamente, durante o descarregamento. A Figura 5.32 mostra que a bateria conseguiu fornecer ao resistor de 10Ω uma corrente de aproximadamente 250mA durante 51 minutos, o que equivale a uma carga na bateria de 212mAh, ou seja, uma carga muito

menor que os 600mAh que era esperado. Esse resultado mostra que a hipótese de idealização do carregamento não pode ser utilizada para avaliar o carregamento. Adicionar um fator de eficiência no carregamento deve ser analisado futuramente. A Figura 5.31 mostra que a bateria carregada pela viga PZT25w não conseguiu manter uma corrente constante, mas a média da corrente nos 4.5 minutos avaliados foi de 0.9mA, o que equivale a 0.067mAh de carga na bateria.

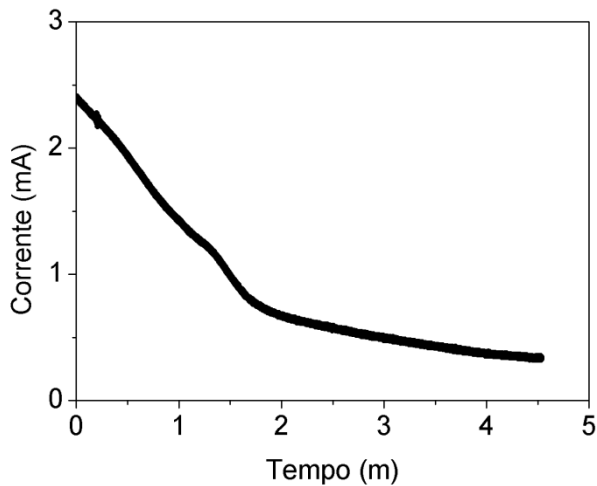


Figura 5.31 - Corrente no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela viga PZT25w.

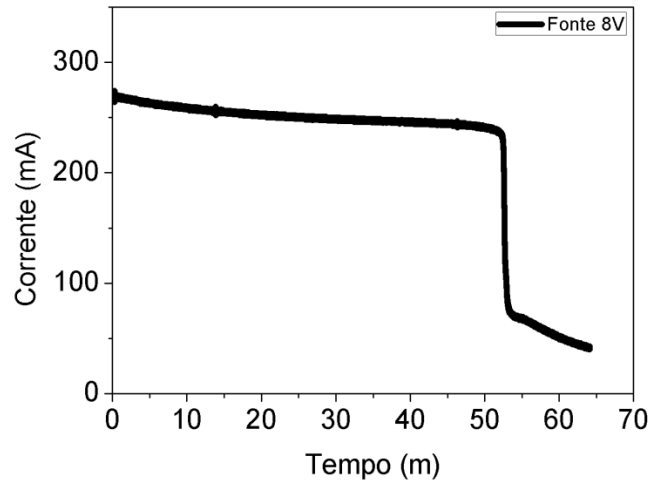


Figura 5.32 - Corrente no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela Fonte 8V.

As Figura 5.33 e Figura 5.34 apresentam as potências elétricas obtidas para a bateria carregada pela viga PZT25w e pela Fonte 8V, respectivamente. Na Figura 5.34 pode-se observar que a potência elétrica inicialmente vale aproximadamente 700mW e gradualmente é reduzida até aproximadamente 600mW, em seguida, e ocorre a queda de tensão da bateria.

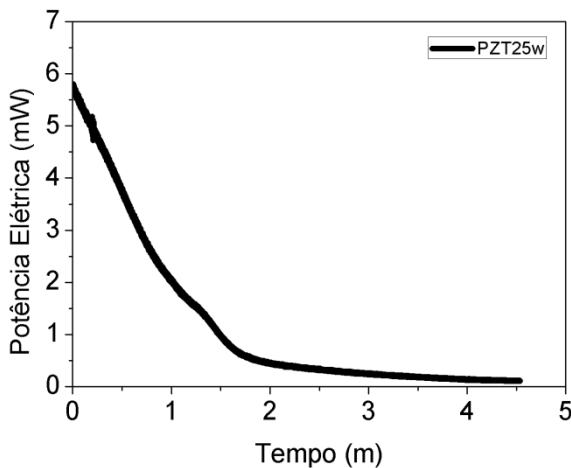


Figura 5.33 - Potência elétrica no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela viga PZT25w.

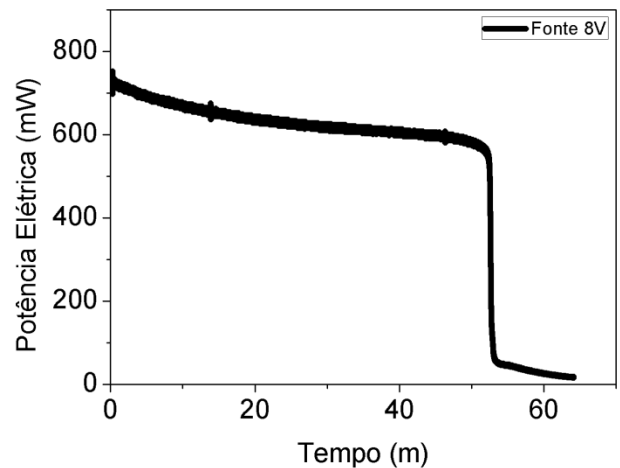


Figura 5.34 - Potência elétrica no resistor durante o tempo de descarga para a bateria carregada pela Fonte 8V.

Apesar de não ter sido alcançado um carregamento satisfatório da bateria utilizando a viga piezelétrica, a metodologia desenvolvida de carga e descarga de bateria parece coerente e pode ser

utilizada em futuros testes. Além disso, verificou-se que um pequeno carregamento foi alcançado utilizando a viga PZT25w. Ocorreu a falta de baterias mais apropriadas para essa finalidade, de menor capacidade, como a utilizada por Sodano (2003). Outro ponto é que testes mais longos devem ser realizados de forma a avaliar a carga imposta a bateria e como ocorre essa evolução de carregamento com o tempo. Devido a problemas de funcionamento do shaker, no entanto, não foi possível realizar esses testes.

6. PROPOSTAS DE MODELO PARA O CIRCUITO INTERNO DA VIGA

Neste capítulo apresenta-se um modelo para o circuito elétrico da viga com resultados numéricos e experimentais.

6.1. SIMULAÇÕES COM CIRCUITO PURAMENTE RESISTIVO

Segundo Park (2001), o material piezoelétrico pode ser modelado com dois componentes eletrônicos, a resistência interna e a capacitância interna. A capacitância interna de 172nF para a viga M-8528-P2 é fornecida pela fabricante Smart-Materials. A resistência interna pode ser determinada analisando a potência efetiva máxima, conforme realizado no experimento 2 (seção 5.3).

As simulações têm como objetivo observar se é possível assumir que a tensão interna que a viga piezoelétrica impõe sobre o circuito é fixa para uma determinada frequência de excitação e amplitude. Logo, assume-se um modelo de fonte de energia elétrica fixa, ou seja, que a tensão interna da viga é constante e ela possui resistência interna e capacitância interna conhecida.

No programa Multisim12 é desenvolvido o modelo do dispositivo piezoelétrico com a capacitância interna, C_{int} , e a resistência interna da viga, R_{int} . No entanto não é bem definido qual é o tipo de ligação desses componentes com o circuito, AB. Segundo Park (2001) o modelo de fonte piezoelétrica pode ser ligadas de duas maneiras diferentes, em série, S, em paralelo completo, PC. Esse trabalho assume um modelo alternativo, denominado parcialmente em paralelo, PP. Está apresentado nas Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3 o esquema de ligação dos modelos, respectivamente ao S, PC e PP.

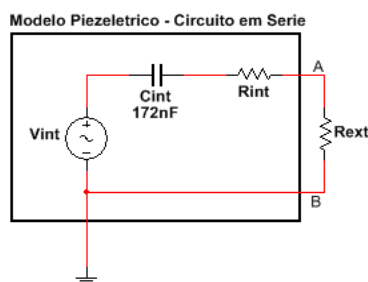


Figura 6.1 - Modelo piezoelétrico com ligação em série.

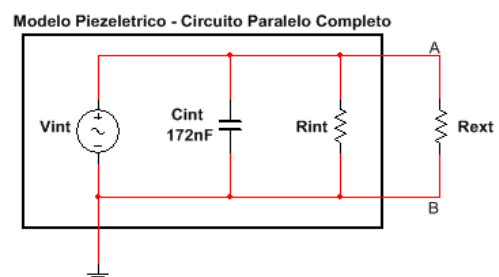


Figura 6.2 - Modelo piezoelétrico com ligação em paralelo completo.

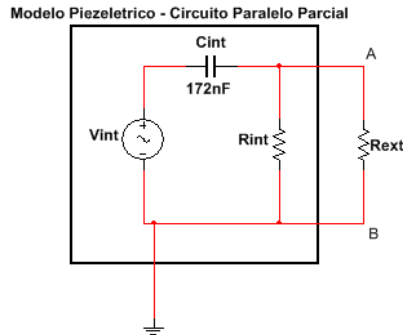


Figura 6.3 - Modelo piezelétrico com ligação parcialmente em paralelo.

Para o circuito parcialmente em paralelo, avalia-se a tensão externa obtida a partir da simulação e compara-se com os dados obtidos experimentalmente. Além disso, para cada valor de tensão externa obtida, é possível determinar um valor correspondente de tensão interna a partir da simulação, observa-se na Tabela 6.1. A Figura 6.4 apresenta um exemplo de simulação com resistência externa de 3.54 k Ω . Para o caso de 21 Hz utiliza-se resistência interna, obtida no segundo experimento, de 18.9k Ω e capacitância interna de 172nF e para o experimento de 22 Hz utiliza-se resistência interna, obtida no segundo experimento, de 38.44k Ω .

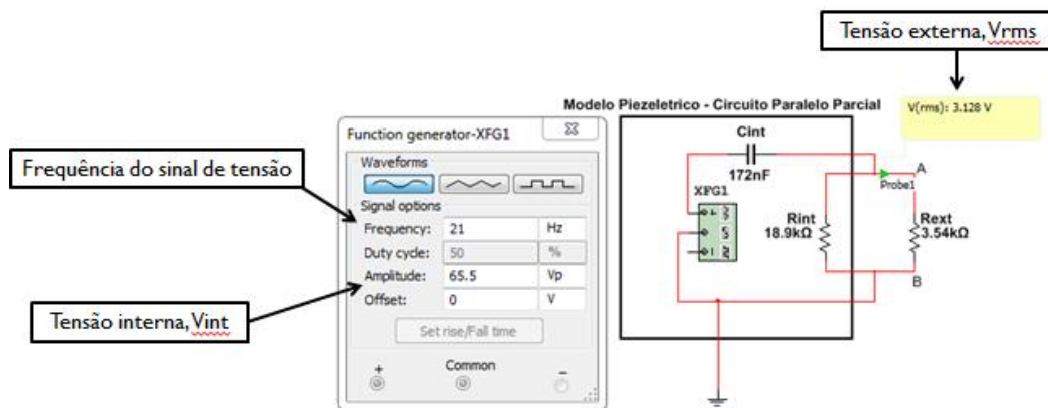


Figura 6.4 - Simulação do modelo parcialmente em paralelo, 21Hz.

Tabela 6.1 - Tensão interna obtida para o modelo de circuito PP para os valores de tensão experimental

Resistência Externa [k Ω]	Tensão [Vrms] – Experimental 21 Hz	Tensão Interna 21 Hz [V]	Tensão [Vrms] – Experimental 22 Hz	Tensão Interna 22 Hz [V]
3.54	3.1277	65.5	2.7336	50.0
4.30	3.7483	66.8	3.2636	50.5
9.35	6.6767	67.1	6.4496	51.8
14.30	8.8487	68.8	9.2079	53.9
18.90	10.370	69.3	11.321	55.5
21.04	10.867	69.7	12.400	56.8
22.82	11.386	70.2	13.047	57.0
24.00	11.538	69.9	13.253	56.3
26.15	11.887	69.5	13.856	56.4
28.60	12.279	69.4	14.751	57.2
31.70	12.932	70.3	15.679	57.8
33.50	12.955	69.4	16.151	58.1
36.30	13.269	69.1	16.774	58.1
38.44	13.222	67.8	17.402	58.9
41.40	13.663	68.2	17.879	58.9
46.00	13.332	64.9	18.704	59.2
48.30	13.601	65.3	19.169	59.4
58.00	13.736	63.3	20.393	59.8
62.60	13.972	63.0	21.001	59.9
67.20	14.103	62.9	21.506	60.4
70.30	14.482	63.9	20.158	56.4
86.90	15.159	64.3	21.074	55.4
99.20	14.036	58.5	20.946	53.4
108.90	15.764	64.9	22.210	56.4
121.20	16.576	67.2	22.586	56.0
150.10	16.735	66.5	23.055	55.2
179.00	17.222	67.2	23.406	55.0
195.60	17.448	68.0	23.334	54.3
241.10	17.367	66.6	23.190	53.0
305.50	17.261	65.0	23.453	52.5

A média dos valores de tensão interna para 21 Hz obtida é 67.15 V e para 22 Hz é 56.4V. Assim, são determinados todos os parâmetros relativos ao modelo de fonte piezolétrica, tanto a resistência interna, capacitância interna e a tensão interna. A Figura 6.5 apresenta a tensão elétrica e a Figura 6.6 a potência elétrica obtida para 21 Hz, a partir de simulações numéricas e ensaios experimentais. A Figura 6.7 e a Figura 6.8 apresentam os mesmos resultados para 22 Hz. O mesmo procedimento é realizado para o PZT e os resultados de tensão e potência são apresentados nas Figura 6.7 e Figura 6.8, respectivamente.

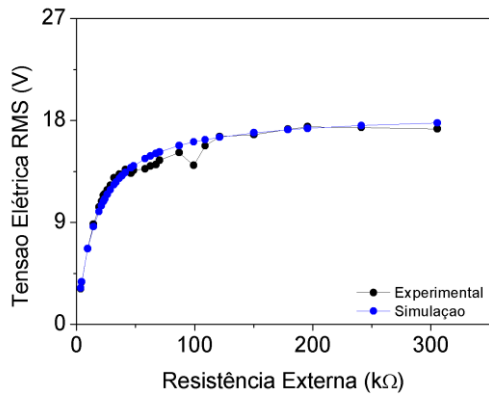


Figura 6.5 - Tensão elétrica em função da resistência externa para 21 Hz com material MFC.

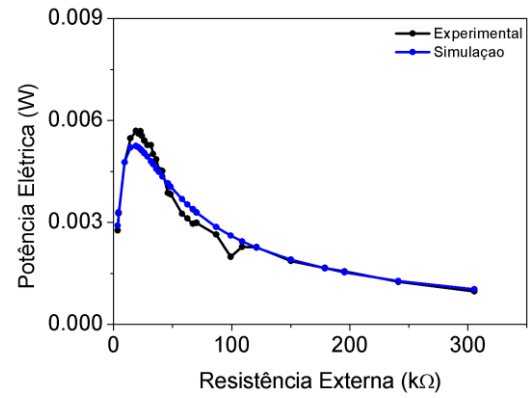


Figura 6.6 - Potência elétrica em função da resistência externa para 21 Hz com material MFC.

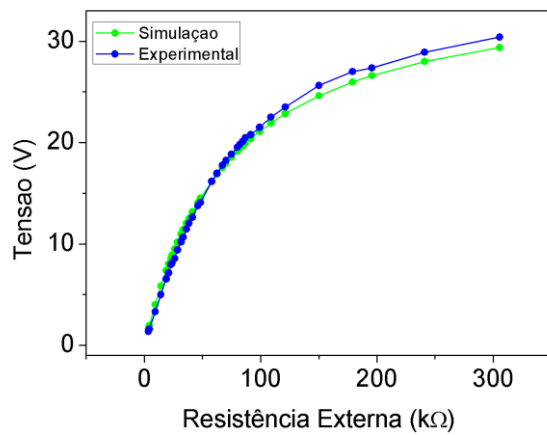


Figura 6.7 - Tensão elétrica em função da resistência externa para 19.5 Hz com material PZT.

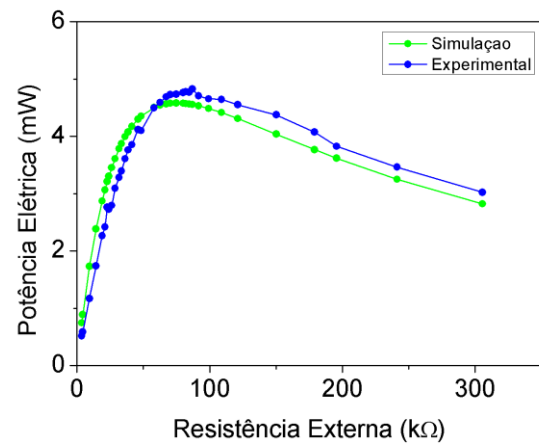


Figura 6.8 - Potência elétrica em função da resistência externa para 19.5 Hz com material PZT.

A partir dos resultados apresentados da Figura 6.5 até a Figura 6.8 observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, mostrando que o modelo proposto apresenta um ótimo desempenho tanto para a viga MFC como para a de PZT.

7. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada uma análise da coleta de energia utilizando três vigas piezelétricas, sendo uma de MFC e duas de PZT, submetidas à excitação harmônica de base. A análise busca avaliar a capacidade das vigas em carregar baterias.

Inicialmente foi apresentada uma análise de viabilidade que teve como objetivo avaliar se as vigas piezelétricas são capazes de alimentar um sensor wireless ou aumentar sua autonomia energética. Utilizando a ordem de grandeza de corrente gerada pelas vigas, notou-se que é possível aumentar o tempo de vida das baterias significativamente.

O material MFC e um PZT são fixados em um mesmo substrato. Inicialmente, busca-se a caracterização deste substrato de forma a identificar a influência do acoplamento do material. A frequência de ressonância obtida analiticamente, utilizando o módulo de elasticidade calculado experimentalmente, foi bem próxima à frequência de ressonância obtida através de ensaio experimental, valendo 15.74Hz e 15.33Hz respectivamente. Observou-se que ocorre um deslocamento da frequência de ressonância com a variação da amplitude de forçamento de base sob a qual a viga está sujeita. Esse deslocamento foi verificado tanto no caso do substrato sozinho como nas situações com material piezelétrico acoplado. A variação de amortecimento presente não justifica a variação de frequência identificada. A suspeita de que o deslocamento era ocasionado pelo não-linearidade no acoplamento eletromecânico do material piezelétrico não foi confirmada tendo em vista a variação obtida no caso do substrato sozinho.

No primeiro teste com as três vigas piezelétricas, MFC, PZT e PZT25w, as frequências de ressonância foram identificadas partir da realização de uma varredura na frequência. Em seguida, os ensaios experimentais com modificação da resistência externa observou-se a influência da resistência na geração de energia. A potência elétrica máxima gerada foi de 7.8mW para MFC e 4.8mW para PZT em 38.44 k Ω e 86.9 k Ω .

Em seguida, avaliou-se a influência da retificação na potência gerada pelas vigas de MFC e PZT, pois há o consumo dos diodos e influência do capacitor no sistema. A partir da modificação da resistência externa notou-se a potência máxima ocorre para resistências diferentes em cada uma das três vigas analisadas. Comparando-se a tensão máxima gerada pelas vigas antes e depois do processo de retificação obteve-se a redução da tensão alternada de 23V para 3.3V em tensão contínua. Na viga de PZT obteve-se a redução de 30V para 3.0V em tensão contínua. Para a viga PZT25w obteve-se a tensão máxima de 10.5V. Antes da retificação as potências máximas alcançadas foram de 7.8mW e 4.8mW para as vigas de MFC e PZT, respectivamente. Após a retificação obteve-se as potências elétricas máximas de 2.53mW, 0.62mW e 7.73mW para a viga de MFC, PZT e PZT25w, respectivamente. Observa-se uma redução significativa de potência após a retificação devido ao consumo dos diodos utilizados.

Após realizar a retificação da tensão, realizou-se o carregamento da bateria por 30 minutos com as três vigas piezelétricas estudadas. Observou-se que a viga PZT25w é a que possui maior capacidade de introdução de carga na bateria, apresentando o melhor desempenho. Entretanto, a corrente elétrica gerada pela viga é muito baixa, ou seja, é necessário um carregamento mais longo para visualizar uma quantidade significativa de carga na bateria. Apesar de não ter sido alcançado um carregamento satisfatório da bateria utilizando a viga piezelétrica, a metodologia desenvolvida de carga e descarga de bateria parece coerente e pode ser utilizada em futuros testes. Além disso, verificou-se que um pequeno carregamento foi alcançado utilizando a viga PZT25w. Dois pontos devem ser destacados no que se refere ao carregamento de baterias com material piezelétrico. O primeiro, e mais importante, é que existem baterias mais apropriadas para essa finalidade, de menor capacidade, como a utilizada por Sodano (2003). No entanto, não foi possível adquirir baterias equivalentes para este trabalho. O segundo ponto se refere ao tempo de carregamento. Testes mais longos devem ser realizados de forma a avaliar a carga imposta a bateria e como ocorre essa evolução de carregamento com o tempo. Devido a problemas de funcionamento do shaker, no entanto, não foi possível realizar esses testes.

Por último, foi proposto um modelo para o circuito interno da viga, modelo este ainda não bem estabelecido na literatura. Os resultados obtidos a partir da simulação do modelo proposto considerando a viga acoplada a um circuito externo puramente resistivo apresentou resultados muito próximos aos obtidos experimentalmente. Foram avaliadas as vigas MFC e PZT.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade do estudo realizado, com o objetivo de alimentar um sensor sem fio utilizando viga piezelétrica alguns pontos podem ser explorados:

- Realizar o carregamento com diferentes baterias durante longo período de tempo.
- Diminuição da potência requerida pelo sensor *wireless* a partir da construção de um dispositivo de próprio;
- Utilização de um circuito elétrico que aumente a eficiência da conversão;
- Utilizar um conjunto de vigas para aumentar a alimentação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

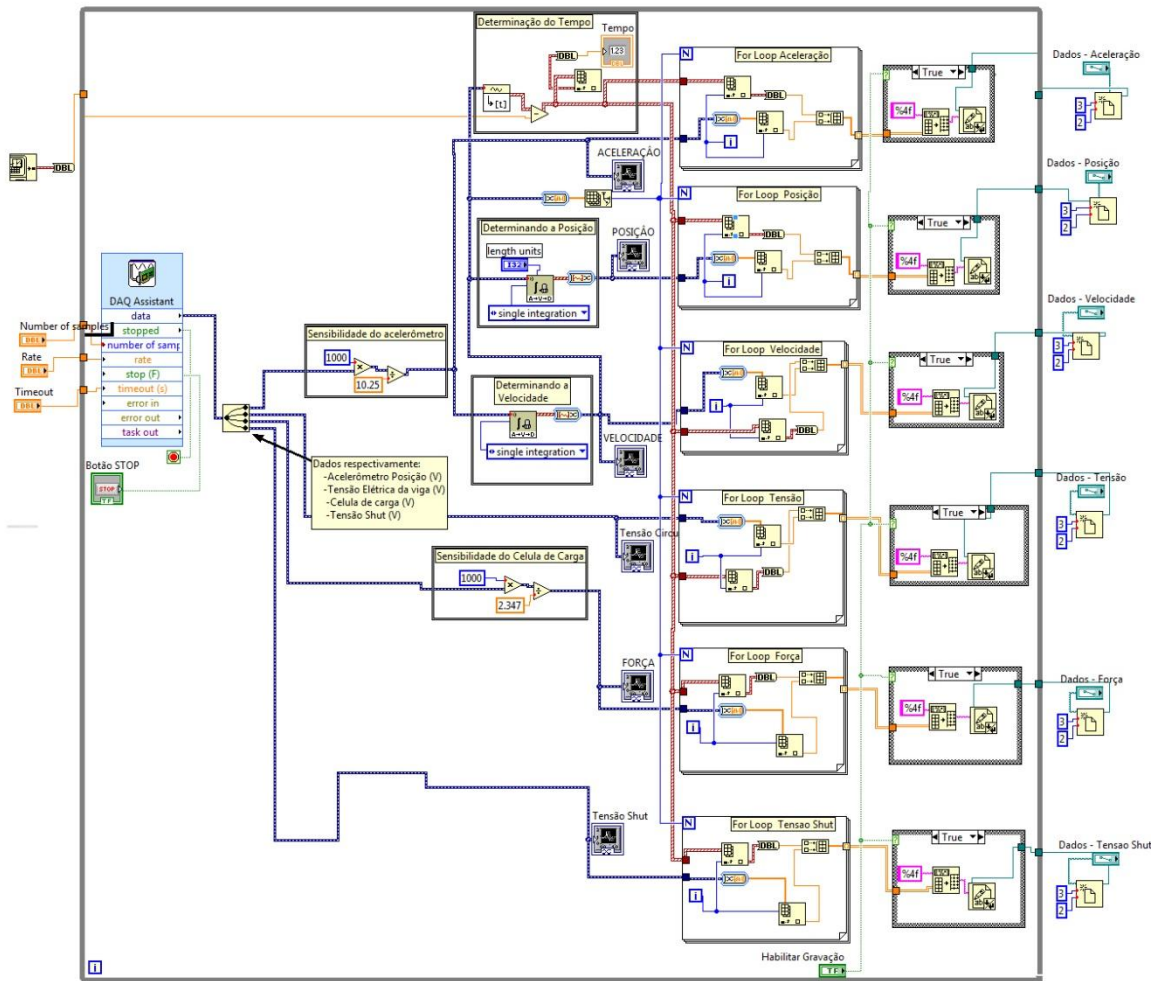
- Acmite Market Intelligence – “*Market Report: World Piezoelectric Device Market*” - 2011
- Almeida, G.W. & Freitas, F. D., “*Circuitos Polifásicos: teoria e ensaios*”. Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos, 1995.
- Arms, S. W., Townsend C. P., Churchill D. L., Galbreath J. H. and Mundell S. W., “Power management for energy harvesting wireless sensors”, SPIE - International Symposium on Smart Structures & Materials/NDE for Health Monitoring and Diagnostics. 2005.
- Baker J, Roundy S and Wright P. “Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks” Proc. 3rd Int. Energy Conversion Engineering Conf. (San Francisco, CA, Aug.) pg 959–970, 2005
- Curie J. and Curie P. (1880) “Développement par compression de l’électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées”, Bulletin de la Société minérologique de France, vol. 3, pg. 90 - 93.
- Kendall, C. “*Parasitic Power Collection in Shoe Mounted Devices*” Tese em Bacharel em Ciências da Física, Massachusetts Institute Technology, Massachusetts, 1998.
- Kymissis J., Kendall C., Paradiso J., Gershenfeld N. “Parasitic Power Harvesting in Shoes,” Second IEEE International Conference on Wearable Computing, pg 132-139, 1998.
- Manual do Smart Energy Harvesting Evaluation Kit - 2011
- Mohammadi F, Khan A. and Cass R. B. “Power generation from piezoelectric lead zirconate titanate fiber composites Proc. Materials Research Symp” pg 736, 2003
- Lee C S, Joo J, Han S, Lee J H and Koh S K “ Poly(vinylidene fluoride) transducers with highly conducting poly(3,4-ethylenedioxythiophene) electrodes” Proc. Int. Conf. on Science and Technology of Synthetic Metals vol 152 pp 49–52, 2005
- Lee H.M., J M Kim², K Sho and H S Park, “A wireless vibrating wire sensor node for continuous structural health monitoring” Smart Mater. Struct. Vol. 19 pg 550 , 2010.
- Leland E S, Roundy S, Baker J, Carleton E, Reilly E, Lai E, Otis B, Rabaey J M, Wright P K and Sundararajan V. “Improving power output for vibration-based energy scavengers” IEEE Pervasive Comput. Vol.4 pg. 28–36, 2005
- Palomino, L., “ *Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas*”, Tese de doutorado em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- Park, C. H., “On the Circuit Model of Piezoceramics”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 12 no. 7, pg 515-52, 2001.
- PI Ceramic GmbH. “Energy Harvesting Uses the Piezo Effect ” 2011
- Reilly E. K , Fred Burghardt, Romy Fain and Paul Wright. “Powering a wireless sensor node with a vibration-driven piezoelectric energy harvester” Smart Mater. Struct. Vol.20 pg.622
- REN21 (2010). Renewables 2010 Global Status Report pg. 15-16.
- Rao S. “ *Vibrações Mecânicas*” ed. 4, Pearson Education do Brasil, 2009
- Roundy S, Wright P K and Rabaey J. “A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes” Comput. Commun. v26 pg.1131–44, 2003
- Roundy S, Steingart D, Frechette L, Wright P and Rabaey J “Power sources for wireless sensor networks” Lect. Notes Comput. Sci. vol.2920 pg.1–17 , 04
- Shenck N. S., Paradiso J. A. “Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics” IEEE Micro, v.21, pg 30–42, 2002
- Shenck, N. “*A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoceramics in a Shoe*” Tese de Mestrado Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1999.
- Shenck, N., Paradiso J. “Energy Scavenging with Shoe- Mounted Piezoelectrics”, IEEE Micro, v. 21, n.3, pg 30–42.1, 2002.
- Shu Y C and I C Lien, “Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems”, Smart Mater. Struct. Vol.15 pg1499–1512, 2006
- Smart-Material – “Datasheet Smart-Materials - MACRO FIBER COMPOSITE - MFC “ Versão-web 2.0 – 2011.
- Sodano H. A., Park G., Leo D. J., Inman D. J., “Use of piezoelectric energy harvesting devices for charging batteries”, *Smart Structures and Materials: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, v. 5050, n. 101, 2003.
- Sodano H. A., Inman D. J., “A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials”, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 36, No. 3, pg 197–205, 2004.
- Sodano H. A., Inman D. J., Park G., “Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, n. 1, pg 67-75, 2005a.
- Sodano H. A., Inman D. J. and Park G. “Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, n. 10, pg 799-807, 2005b.

- Starner T. and Paradiso J. "Human generated power for mobile electronics Low Power Electronics Design", Piguet Low-Power Electronics CRC Press, v. 45, pp. 35-45, 2004.
- Toit N. E. and Wardle B. L. "Performance of Microfabricated Piezoelectric Vibration Energy Harvesters," *Integrated Ferroelectrics: An International Journal.*, v. 83, pg 13-32, 2006.
- Torah R., P Glynne-Jones¹, M Tudor¹, T O'Donnell², S Roy² and S Beeby¹ "Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting" Meas. Sci. Technol. Vol.19, pg 8, 2008
- Valasek, J. - "Piezoelectric and allied phenomena in Rochelle salt", *The American Physical Society*, v. 17, pg 475-481. 1921.
- Wischke M., Masur M., Kröner M. and P. Woias "Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes" Smart Mater. Struct. Vol. 20 pg 850
- Zixue Qiu, JianWu and Shenfang Yuan, "A wireless sensor network design and evaluation for large structural strainfield monitoring" Meas. Sci. Technol. Vol.22, pg 755, 2011.

9. ANEXOS

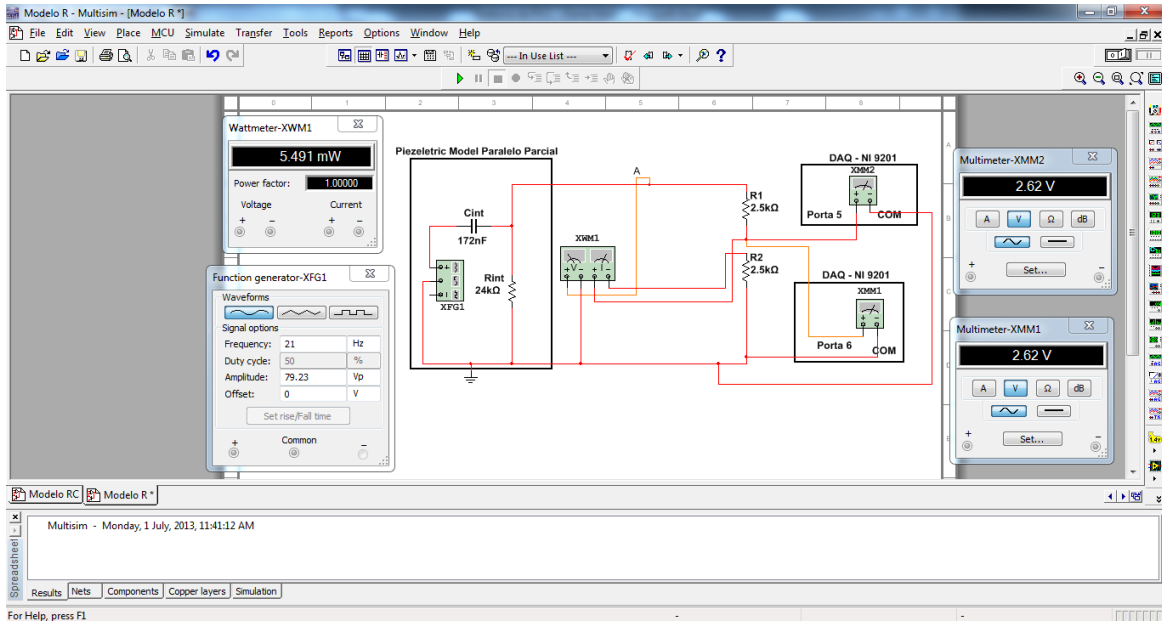
		Pág.
Anexo I	LABVIEW	51
Anexo II	MULTISIM	52
Anexo III	GRÁFICOS DO CAPITULO 5.1	53

ANEXO I: LABVIEW

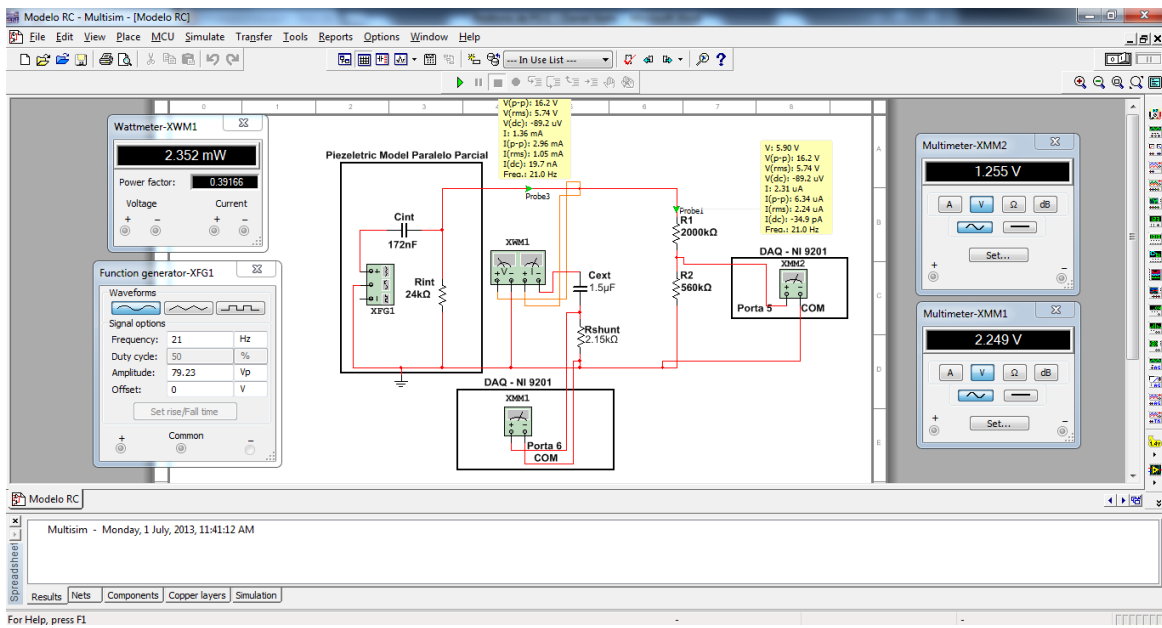


ANEXO II: MULTISIM

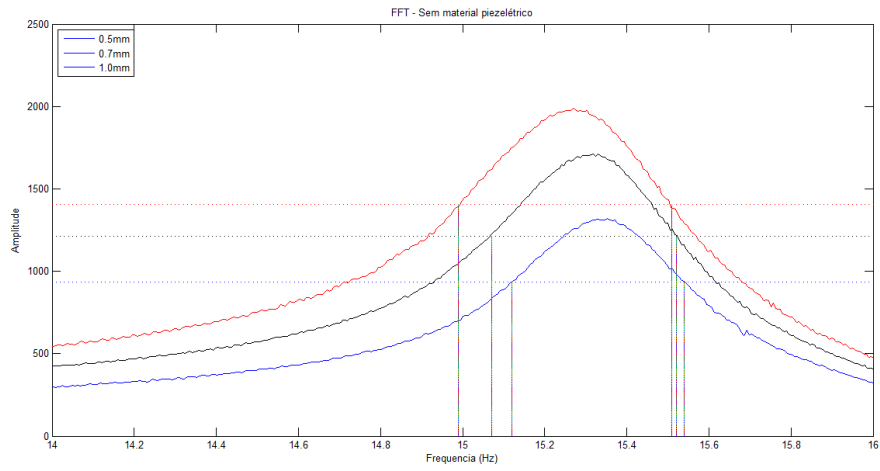
Model R



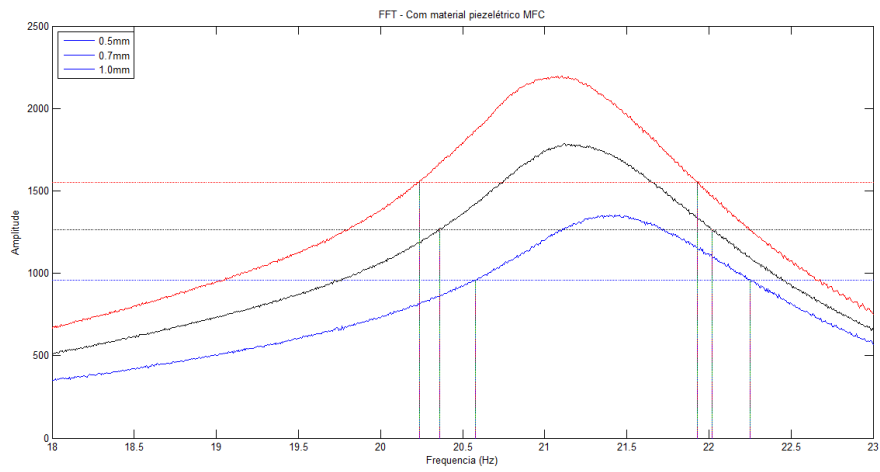
Model RC



APENAS SUBSTRATO



MFC



PZT

