



Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Matemática / Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**SENSOR DE VIBRAÇÃO SEM FIO AUTO  
ALIMENTADO POR COLHEITA DE ENERGIA**

José Emílio Quesado de Souza

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador  
05 de abril de 2019



JOSÉ EMÍLIO QUESADO DE SOUZA

**SENSOR DE VIBRAÇÃO SEM FIO AUTO ALIMENTADO POR  
COLHEITA DE ENERGIA**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Antonio Cezar de Castro Lima  
Co-orientador: Márcio Fontana

Salvador  
05 de abril de 2019

Sistema de Bibliotecas - UFBA

Quesado, José Emílio.

SENSOR DE VIBRAÇÃO SEM FIO AUTO ALIMENTADO POR COLHEITA DE ENERGIA / José Emílio Quesado de Souza – Salvador, 2019.  
54p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Cezar de Castro Lima.

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio Fontana.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Instituto de Matemática / Escola Politécnica, 2019.

1. Geração de Energia. 2. Sensores Sem Fio. 3. Acelerômetro. 4. Análise de vibrações. I. Lima, Antonio Cezar de Castro . II. Fontana, Márcio. III. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Matemática / Escola Politécnica. IV. Título.

CDD – XXX.XX

CDU – XXX.XX.XXX

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

**JOSÉ EMÍLIO QUESADO DE SOUZA**

## **SENSOR DE VIBRAÇÃO SEM FIO AUTO ALIMENTADO POR COLHEITA DE ENERGIA**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 05 de abril de 2019

---

Prof. Dr. Antonio Cezar de Castro Lima  
Universidade Federal da Bahia

---

Prof. Dr. Márcio Fontana  
Universidade Federal da Bahia

---

Prof. Dr. Fabiano Fragoso Costa  
Universidade Federal da Bahia

---

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe  
Universidade Federal da Bahia



*Dedico este trabalho a minha esposa Andra Gomes, que com toda sua doura e amor soube me guiar e incentivar nos caminhos do conhecimento e do pensar.*





## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus e aos meus pais Duílio Mendes que e Maria Ceilde Quesado, e a minha esposa Andréa Quesado pelo constante apoio, sem nunca desacreditar no meu potencial.

Agradeço aos meus amigos e colegas de curso Vandrê Augusto, Laion Costa e Edmar Egidio, que desde a graduação são grande fonte de inspiração profissional e acadêmica. E ao meu grande amigo Luiz Cesar, pela grande ajuda com o desenvolvimento da escrita desse trabalho.

Agradeço também as novas amizades e colegas adquiridos ao longo do curso que contribuíram direta ou indiretamente no desenvolvimento do trabalho, em especial: Tiago Oliveira, Odilon Abreu, Ricardo Reis e Orlando Filho.

Gradidão aos amigos e funcionários da Universidade Federal da Bahia, Lúcia Lago e Flávio Jesus, pelo constante suporte nas atividades ao longo do curso.



*Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.*

—ANTOINE LAVOISIER



## RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e projeto de sensor de vibração sem fio autoalimentado por colheita de energia, um protótipo de sensor de vibração foi desenvolvido para monitoramento de equipamentos e máquinas rotativas utilizando acelerômetro de baixo custo. O instrumento é alimentado por uma bateria de Lítio que por sua vez é recarregada pelo gerador, provendo a configuração de autossuficiente ao sistema, os estudos demonstram a eficácia do gerador sugerindo ganhos de sobrevivência do sensor na ordem de 8% . A estrutura híbrida do gerador proposta neste trabalho foi analisada e caracterizada, apontando os ganhos obtidos a partir da miscigenação de dois modelos de geradores. Os resultados obtidos a partir de simulações e ensaios na plataforma experimental evidenciam uma solução vantajosa para geração de energia destinada a dispositivos e sensores de baixo consumo de energia.

**Palavras-chave:** geração de energia; sensores sem fio; acelerômetro; análise de vibrações.



## ABSTRACT

This work presents the study and design of wireless vibration sensor self-powered by energy harvesting, a prototype of vibration sensor was developed for monitoring equipment and rotating machines using low cost accelerometer. The instrument is powered by a lithium battery which is recharged by the generator, providing the self-sufficient configuration to the system, the studies demonstrate the efficiency of the generator suggesting sensor power gains in the order of 8% . The hybrid structure of the generator proposed in this work was analyzed and characterized, according to which the gains obtained from the miscigenation of two generator models. The results obtained from simulations and tests in the experimental platform show an advantageous solution for the generation of energy destined to devices and sensors of low energy consumption.

**Keywords:** harvesting energy; wireless sensors; accelerometer; vibration analysis.





# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1—Introdução</b>	1
1.1 Apresentação do Problema e Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.3 Revisão Bibliográfica . . . . .	3
1.4 Organização do Trabalho . . . . .	8
<b>Capítulo 2—Colheita de Energia</b>	9
2.1 Piezoelétrico . . . . .	9
2.1.1 Efeito Piezoelétrico . . . . .	9
2.2 Efeito Eletromagnético . . . . .	11
2.3 Gerador Híbrido . . . . .	13
<b>Capítulo 3—Plataforma Experimental</b>	17
3.1 Visão geral da plataforma experimental . . . . .	17
3.2 Shaker . . . . .	18
3.3 Micro-Gerador . . . . .	19
3.4 Circuito de Condicionamento de Energia . . . . .	22
3.5 Sensor de Vibração . . . . .	23
3.6 Plataforma de Aquisição de dados . . . . .	24
<b>Capítulo 4—Testes e Resultados</b>	27
4.1 Sensor . . . . .	27
4.2 Micro-Gerador . . . . .	28
4.2.1 Caracterização do sistema Piezoelétrico . . . . .	29
4.2.2 Caracterização do Gerador Eletromagnético . . . . .	33
4.2.3 Caracterização do Gerador Híbrido . . . . .	35
4.3 Sistema Gestor de carga . . . . .	38

4.4	Operação do sistema completo . . . . .	40
<b>Capítulo 5</b>	<b>—Conclusões</b>	<b>43</b>
5.1	Contribuições . . . . .	43
5.2	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	44
<b>Apêndice A</b>	<b>—Esquemático do circuito de gerenciamento de carga</b>	<b>45</b>
<b>Apêndice B</b>	<b>—Software de aquisição de dados</b>	<b>47</b>
<b>Apêndice C</b>	<b>—Código fonte do Software de aquisição de dados</b>	<b>49</b>

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Modelos de geradores piezoelétricos. . . . .	7
2.1	Comportamento típico do da estrutura cristalográfica de um sensor piezoelétrico. . . . .	11
2.2	Descritivo da Lei de Lenz. . . . .	12
2.3	Gerador de Corrente Alternada. . . . .	13
3.1	Esquemático da plataforma experimental. . . . .	18
3.2	Modelos de shakers (MCCONNEL, 1995). . . . .	19
3.3	Shaker. . . . .	20
3.4	Esquemático de condicionador de carga. . . . .	22
3.5	Fluxograma do programa do sensor de virabração. . . . .	24
3.6	Esquema de coleta de dados. . . . .	25
3.7	Fluxograma do programa em LabView do sistema de coleta do dados. . .	26
4.1	Esquema de comunicação entre os dispositivos. . . . .	28
4.2	Esquema do modelo de viga de Cantilever aplicado no gerador. . . . .	29
4.3	Distribuição linear: (A) 30mm; (B) 25mm; (C) 20mm e (D) 15mm. . . .	30
4.4	Resposta elétrica do piezoelétrico para distribuição Linear: (A) 30mm; (B) 25mm; (C) 20mm e (D) 15mm. . . . .	31
4.5	Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição Linear: (A) 30mm; (B) 25mm; (C) 20mm e (D) 15mm. . . . .	32
4.6	Distribuição angular: (A) 10° ; (B) 25°; (C) 35° e (D) 45°. . . . .	32
4.7	Resposta elétrica do piezoelétrico para distribuição Angular: (A) 10° ; (B) 25°; (C) 35° e (D) 45°. . . . .	33
4.8	Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição Angular: (a) 10° ; (b) 25°; (c) 35° e (d) 45°. . . . .	34
4.9	Esquemático do gerador eletromagnético. . . . .	34
4.10	Distribuição Linear para caracterização do eletromagnético: (A) 32mm; (B) 29mm; (C) 26mm. . . . .	35

4.11 Resposta elétrica do gerador eletromagnético. (A) 32mm; (B) 29mm; (C) 26mm. . . . .	35
4.12 Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição linear no gerador eletromagnético: (a) 32mm ; (b) 29mm; (c) 26mm. . . . .	36
4.13 Resposta elétrica do gerador híbrido. (A) 32mm; (B) 29mm; (C) 26mm. .	36
4.14 Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição linear no gerador eletromagnético: (a) 32mm ; (b) 29mm; (c) 26mm. . . . .	37
4.15 Análise do comportamento da potência gerada. . . . .	38
4.16 Análise do comportamento do circuito gerenciador de carga. . . . .	39
4.17 Teste de desempenho do sensor de vibração. . . . .	41

## LISTA DE TABELAS

1.1	Sumário de máxima densidade de energia para os três tipos de transdutores. (Roundy; Wright, 2004) . . . . .	5
2.1	Propriedades e Características de PZTs. (UCHINO, 2017) . . . . .	10
3.1	Módulo de elasticidade. (CALLISTER, 2002) . . . . .	21
4.1	Análise de sinais do teste de distribuição linear. . . . .	31
4.2	Análise de sinais do teste de distribuição linear. . . . .	33
4.3	Análise de sinais do teste de distribuição linear do gerador eletromagnético. . . . .	36
4.4	Análise de sinais do teste de distribuição linear do gerador híbrido. . . . .	37
4.5	Valores da análise do comportamento da potência gerada . . . . .	39



## Capítulo

# 1

*Neste capítulo é apresentada a motivação que conduziu ao desenvolvimento do estudo de colheita de energia, voltado para dispositivos de baixo consumo, seguido dos objetivos gerais e específicos. É exposto ainda a revisão bibliográfica onde foi abordado o processo evolutivo dos métodos de alimentação de circuitos eletrônicos, em seguida o desenvolvimento da energia de colheita e os processos de geração de energia a partir da vibração utilizando os elementos piezelétricos e magnéticos.*

## INTRODUÇÃO

### 1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

Os serviços de manutenção é quesito de relevância que ao longo do processo evolutivo da industria segue ganhando destaque. Apresenta-se como parte direta da melhoria de qualidade e crescimento da produção. A evolução da manutenção de equipamentos representa um relevante impacto financeiro para a industria, seja esse provenientes da melhoria da produção ou pelo custo dos equipamentos, que sob os cuidados tem o prolongamento do seu tempo de vida. Uma das práticas utilizadas em manutenção de equipamentos é a análise vibracional. Essa técnica é aplicada em motores elétricos, motores a combustão, aeronaves e automóveis (GALLEGO, 1989). De maneira geral, utiliza-se de sensores que captam as vibrações do elemento, as quais posteriormente são analisadas por softwares com o objetivo de determinar possíveis falhas internas ou externas, problemas de alinhamento de eixos, em mancais e acoplamentos (SANTOS et al., 2012; YOUNG, 2006).

Adicionalmente a vida útil e o decaimento da carga ao longo do tempo nas baterias, são problemas factíveis e que contribuem para uma desaceleração da evolução de dispositivos eletrônicos autônomos móveis. Além do comportamento não linear, as baterias possuem a característica de serem sensíveis a temperatura, vibração e impactos tornando sua utilização inviável ou restrita em alguns casos (STARNER; PARADISO, 2004).

<sup>1 2</sup> Devido às limitações encontradas na constituição físico química das baterias, métodos alternativos de prolongamento do funcionamento de dispositivos móveis vêm sendo amplamente estudados, dentre esses destaca-se a diminuição e otimização dos circuitos integrados que garantem uma redução considerável de consumo de energia. Contudo, não suficiente para um grande aumento do ciclo de vida dos dispositivos (BRODD et al., 2004). Outra técnica desenvolvida, e que ganha força no prolongamento de funcionamento de dispositivos móveis, é a colheita de energia ou *Energy Harvesting*<sup>1</sup>, que se destaca por utilizar recursos tipicamente naturais para reaproveitar a energia e realimentar sistemas como fonte de alimentação secundária. Apesar da colheita de energia parecer simples, essa técnica apresenta muitos desafios, por que os geradores são difíceis de miniaturizar, tornando-se incompatíveis com circuitos de dimensões muito pequenas, característica comum na maioria dos casos com dispositivos móveis. Outro fator relevante é o rendimento proporcionado pelos geradores de colheita de energia que, além de baixos rendimentos, sofrem distúrbios na geração com as alterações do meio (PARADISO; STARNER, 2005).

Milani et al.(2014) apresentaram um micro gerador de energia por vibração que funciona alimentando um sistema de análise de vibração sem fio, foi demonstrado ainda a modelagem do sistema de geração visando a tensão e potência estimadas durante o processo de geração. Os resultados apresentados demonstram que é possível prover um potencial de energia suficiente para realimentar o dispositivo, contudo, o estudo evidenciou que a demanda de corrente provoca um decaimento significativo na tensão gerada. Vale ressaltar ainda que o geradores piezelétricos se caracterizam por operar em faixas estreitas de frequência, onde a máxima produção de energia está presente na frequência ressonância do transdutor.

Torah et al.(2008) sugeriram a utilização de geradores eletromagnéticos com um transdutor constituído de uma bobina de cobre e ímãs de neodímio<sup>2</sup>. Apesar de possuir características de geração similar aos piezelétricos, esses geradores fornecem maior produção de corrente sendo menos susceptíveis ao decaimento da potência por modificação da carga. Essa característica é uma opção interessante para sistemas sem fio, no qual a demanda de energia se modifica a cada processo de envio, recebimento e processamento de informação. Em contrapartida, Torah et al. (2008) demonstram que as tensões geradas possuem

---

<sup>1</sup>*Energy Harvesting* é o processo pelo qual pequenas quantidades de energia proveniente de fontes externas é coletada e armazenada para alimentar dispositivos autônomos, sem fios e de baixo consumo (LAUMANN et al., 2017).

<sup>2</sup>Ímãs de neodímio é feito a partir de uma combinação de neodímio, ferro e boro — Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, são ímãs cujo a densidade magnetismo é muito grande, chegando a possuir até três vezes a intensidade de magnetismo de ímã samário-cobalto. Sua intensidade pode variar de 190 430kJ/m<sup>3</sup> (FARIA; LIMA, 2005)



amplitudes menores e a capacidade de miniaturização para esse tipo de sistema é inferior ao sistema piezoelétrico.

Para contornar os problemas de tempo de operação de dispositivos móveis, faixa de operação e dos geradores por vibração e de potencial de energia é sugerido neste estudo o desenvolvimento de um gerador híbrido utilizando a tecnologia piezoelétrico e eletromagnético, com melhoria da estabilidade de geração, aumento da faixa de operação e potência produzida.

## 1.2 OBJETIVOS

Desenvolver o estudo, projeto e protótipo de um gerador híbrido de energia elétrica por vibração, capaz de alimentar um sensor vibrações sem fio de baixo consumo, fazendo uso das técnicas de geração a partir dos componentes eletromagnéticos e piezoelétricos. Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- 1) Caracterizar a geração de energia utilizando células piezoelétricas;
- 2) Caracterizar a geração de energia no sistema híbrido;
- 3) Desenvolver circuito de gerenciamento de carga, responsável por controlar o carregamento da célula de energia e a alimentação do circuito;
- 4) Desenvolver o sistema de análise de vibração utilizando acelerômetros de baixo consumo.

## 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aprimoramento das composições de metais híbridos de níquel (Ni-MH) e dos ions de lítio (Li-ion) proporcionaram novas possibilidades as baterias, tornando-as mais potentes e menores (BRODD et al., 2004),(NITTA, et al., 2015),(DUBAL et al., 2015). Como parte da evolução tecnológica, os componentes eletrônicos vem reduzindo o tamanho e sofrendo otimizações em busca de maiores taxas de transferência de dados e menor consumo de energia. A diminuição do consumo de energia, ocasionada pela melhoria do desempenho eletrônico associado ao desenvolvimento de novos tipos de baterias, trouxe modificações na produção de dispositivos portáteis tornando esse mais versátil, atendendo a múltiplos propósitos, variando desde celulares inteligentes, até sensores inteligentes. Starner e Paradise (2005) mostraram que a evolução da densidade de energia proporcionada pelas baterias não acompanha a curva de crescimento de dispositivos móveis com comunicação sem

fio, sinalizando que as fontes de armazenamento de energia provem um atraso evolutivo nos dispositivos móveis, principalmente naqueles autônomos que processam quantidades maiores de dados.

Considerando o conceito de reaproveitamento de energia ao longo dos anos e associando ao desenvolvimento de micro-sistemas autônomos, surgiu como proposta de solução para mediar os problemas causados pela baixa densidade de energia proporcionada pelas baterias, o conceito de *Energy Harvesting*, também conhecido no Brasil como colheita de energia: consiste em reaproveitar a energia proveniente de fontes externas para alimentar sistemas de baixo consumo (HARB, 2011). Com o surgimento dos Sistemas Micro Eletro-Mecânicos (MEMS) nos anos 90, ocasionou em um crescimento das pesquisas voltadas para a área de colheita de energia explorando os efeitos mecânicos. Dentre os principais transdutores de vibração, destacam-se os piezoelétricos, eletromagnéticos e os eletrostáticos. (WILLIAMS; YATES, 1996)

Williams e Yates (1996) correlacionaram a deformação do atuador com o energia produzida considerando um gerador de dimensões específicas. Os resultados foram promissores para a época e atingiram valores na ordem de  $100\mu A$ , validando a teria de reaproveitamento da energia vibracional produzida por máquinas ou ações mecânicas em estruturas. Posteriormente, Kymissis et al. (1998) adequaram pastilhas piezoelétricas em tênis com o objetivo de extrair energia a partir da pressão aplicada nas pastilhas durante a caminhada, a produção de energia foi maior (70mW) que a potência descrita por Williams e Yates, contudo, a aplicação se restringiu à cenários de baixa frequência, uma vez que os passos determinaram a frequência de operação do sistema.

A grande versatilidade dos atuadores piezoelétricos (PZT), deram ao dispositivo um grande destaque no cenário de geração de energia por vibração. Os PZTs podem apresentar geometrias e estruturas diversas podendo gerar tensões na faixa de 1 a 50V dependendo da composição e dimensão do cristal (GLYNNE-JONES; BEEBY; WHITE, 2001). Entretanto, a corrente produzida oscila na ordem de miliampères, gerando restrições ao uso desses atuadores, as características do cristal influenciam diretamente as propriedades elétricas e por isso necessitam da utilização de configurações de componente elétricos específicos para garantir o correto casamento das impedâncias entre a fonte geradora (PZT) e a carga (ROUNDY; WRIGHT; RABAEY, 2003).

Roundy, Wright e Rabaey (2003) apresentaram um comparativos entre dois protótipos de geradores eletrostático e piezoelétrico, constataram que para geradores de dimensões similares com atuadores PZT, o potencial de conversão por unidade de volume é superior aos geradores eletrostáticos. Seguindo no desenvolvimento dos geradores eletromagné-

ticos, Glynne-Jones et al. (2003) produziram resultados satisfatórios, obtendo 3,9mW em picos de produção e 157 $\mu$ W de potência média, para um gerador com dimensões de 3,15cm<sup>3</sup>. A potência produzida foi suficiente para alimentar um dispositivo microeletrônico sem auxílio de baterias. A Tabela 1.1 ilustra as principais tecnologias de geração de energia de colheita, equações, materiais e densidade de energia.

**Tabela 1.1** Sumário de máxima densidade de energia para os três tipos de transdutores. (Roundy; Wright, 2004)

Tipos	Densidade de Energia (mJ/cm <sup>3</sup> )	Equações
Piezoelétrico	35,4	$\frac{1}{2}\sigma^2k^22C$
Eletromagnético	24,8	$\frac{1}{2}B^2\mu_0$
Eletrostático	4	$\frac{1}{2}\epsilon_0E^2$

Discenzo, Chung e Loparo (2006) desenvolveram um sensor de vibrações sem fios que utilizava uma lâmina piezoelétrica de formato trapezoidal para recarregar baterias. O dispositivo foi utilizado em testes para determinar o condicionamento de bombas centrífugas utilizadas em embarcações de armazenamento de petróleo, apesar do dispositivo funcionar com a colheita de energia, o mesmo não apresentou um rendimento totalmente satisfatório devido a variação das faixas de frequências de operação do equipamento em análise e do consumo elevado dos circuito envolvidos no projeto do instrumento. O esforço demonstra a capacidade de emprego desses modelos de geradores em instrumentação industrial.

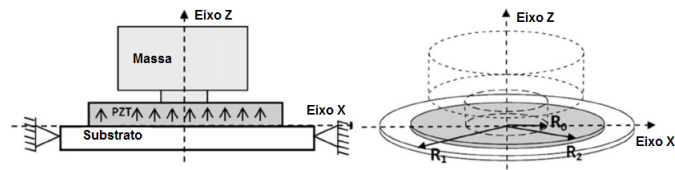
Em respostas aos problemas com faixa de frequência e potência produzida, um gerador eletromagnético composto por um indutor de 1200 espiras e impedância de 550 $\Omega$ , foi capaz de gerar 4mW com tensões de 3 volts. Operando em frequências de 33Hz à 37Hz, maximizando as possibilidade de criação de novos dispositivos móveis utilizado energia de colheita como suporte (HADAS et al., 2007). Torah et al. (2008) criaram dois geradores eletromagnéticos em configurações distintas, e com o auxílio de circuito dobrador de tensão concluíram que a energia poderia ser melhor aproveitada. Dessa forma, enfatizando que os circuitos de condicionamento de energia são partes fundamentais dos sistemas de colheita de energia.

O esquema típico de sistemas de condicionamento de colheita de energia, é composto inicialmente por um conversor AC-DC de retificação, comumente encontrado em fontes de tensão. A segunda etapa do condicionamento da energia é a utilização de conversores DC-

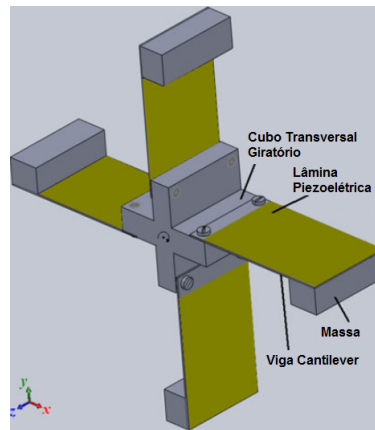
DC, o mais utilizado é o modelo Buck-Boost, também conhecido como conversor híbrido, que apresenta extensão de operação maior que os demais conversores, equilibrando a conversão de acordo com a geração de energia e demanda de corrente (PEKOSLAWASKI; KRASINSKI; NAPIERALSKI, 2011).

Além das técnicas de condicionamento da energia, outros avanços na configuração física dos transdutores foram desenvolvidos para maximizar a geração de energia assim como o espectro de operação do gerador. Dessa forma, além da configuração típica da viga de Cantilever, surgiram os geradores embolo, conforme a Figura 1.1.a, no qual a qualidade e posicionamento da massa influencia diretamente na faixa de frequência de funcionamento, o mesmo é capaz de produzir energia em frequências de até 120 Hz (CHEN et al, 2012). Khameneifar, Arzanpour, Moallem (2013) a pesar de utilizarem a tradicional configuração de Cantilever, propuseram uma abordagem com quatro piezoelétrico posicionados ortogonalmente entre si. Essa configuração permitiu explorar a produção de energia a partir de movimentos rotacionais e em sentidos bidirecional (Figura 1.1.a). A atitude de explorar a colheita de energia em múltiplas direções também foi abordada por YANG et al. (2014), utilizando uma haste cilíndrica e na extremidade um ímã que opera como massa e como agente defletor do transdutor piezoelétrico, assim como demonstrado da Figura 1.1.c, os resultados obtidos confirmaram a possibilidade de utilizar outras geometrias para configuração da viga de Cantilever otimizando a função do movimento da haste, logo proporcionando novas abordagens para arquiteturas e aplicações para a colheita de energia.

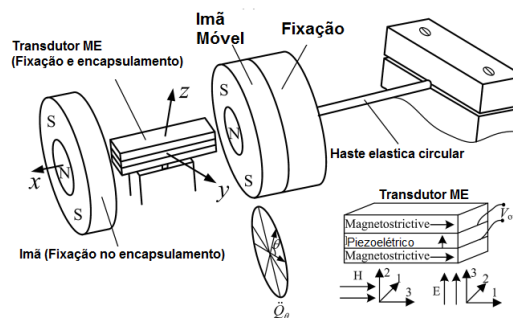
(a) Esquema de gerador embolo (CHEN et al, 2012).



(b) Gerador bidirecional 1 (KHAMENEIFAR; ARZANPOUR; MOALLEM, 2013).



(c) Gerador bidirecional 2 (YANG, et al., 2014).

**Figura 1.1** Modelos de geradores piezoelétricos.

Payne et al. (2015), propuseram soluções mais completas e substanciais para o desenvolvimento de um instrumento de medição autoalimentado utilizando uma esfera de ímã neodímio e duas bobinas de cobre colocadas em série. O deslocamento do ímã ao longo na caixa fechada promoveu energia suficiente para alimentar o sistema. O circuito de condicionamento era composto pelo conversor buck-boost LTC3331 da fabricante Linear, um microcontrolador de baixo consumo, um acelerômetro ADXL363 produzido pela *Analog Device* e um transmissor sem fio CC2500. Ostasevicius et al. (2015), fazendo uso da cápsula piezoelétrica de baixo custo, foi capaz de aprimorar o conceito de micro sensor de vibração, utilizando circuito de condicionamento mais compacto, composto por ponte

de retificação e um conversor DC-DC boost (LTC3588-1, Linear), os resultados obtidos demonstraram que apesar do dispositivo apenas se manter ativo nos períodos de trabalho da ferramenta, o sensor foi capaz de coletar dados relevante acerca do comportamento do equipamento. Liu et al. (2017) trabalharam com dois tipo de colheita de energia, a eletromagnética e o eletrostático, apesar de se tratar de um gerador híbrido, a energia gerada por cada método foi medida separadamente e não houve ao longo do trabalho a medição dos geradores trabalhando em conjunto. Esse fato deve-se as características física de cada gerador, que por possuir impedâncias e comportamentos diferentes, necessitam de um condicionador de sinal mais robusto.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho segue a seguinte estrutura organizacional:

- **Capítulo 1:** Introdução do trabalho contendo os objetivos, problema e motivação do estudo proposto e revisão bibliográfica que contempla os principais métodos de alimentação de circuitos eletrônicos autônomos e a evolução dos sistemas de energia de colheita;
- **Capítulo 2:** Fundamentação teórica dos modelos de geradores de energia elétrica por vibração; são detalhados os princípios dos fenômenos físicos de geração de energia para cada tipo de gerador;
- **Capítulo 3:** Apresentação do protótipo desenvolvido neste trabalho, especificando o funcionamento de cada componente separadamente: gerador híbrido, circuito gerenciador de carga e sensor de vibração;
- **Capítulo 4:** Descrição dos testes realizados no protótipos e os resultados obtidos a partir desses, focando no comportamento de cada gerador e do circuito de gerenciamento de carga;
- **Capítulo 5:** Comentários e análise finais sobre os testes e resultados obtidos e indicações de possíveis extensões do trabalho.

*Neste capítulo será abordado as principais características dos elementos tipicamente utilizados na colheita de energia por vibração, enfatizando as características elétrica e estruturais desses elementos.*

## **COLHEITA DE ENERGIA**

### **2.1 PIEZOELÉTRICO**

A geração de energia elétrica a partir de materiais piezoelétricos está relacionada às propriedades do cristal utilizado, suas dimensões e força aplicada.

Os modelos de geradores tipicamente estudados concentram esforços em analisar o comportamento eletromecânico tais como: frequência de ressonância, modelos matemáticos eletromecânico acoplados e desacoplados, ressonância de piezo-cerâmicas, deformação causada pela aplicação de forças estáticas e potência elétrica gerada. Utilizando como base os trabalhos envolvendo piezoelétricos unimorfos, será apresentado as principais características da cápsula piezoelétrica, e a análise comportamental da cápsula utilizando massas fixadas em pontos distintos.

#### **2.1.1 Efeito Piezoelétrico**

Os irmãos Jacques e Pierre Curie descobriram em 1880 a piezeletricidade presentes em cristais de quartzo. Foi observado pelos irmãos Curie que quando determinados tipos de cristais eram tracionados ou comprimidos, sua estrutura cristalina produzia uma tensão proporcional a esta pressão. Esse fenômeno ficou conhecido como efeito piezoelétrico direto. De modo contrário, quando um campo elétrico é aplicado nestes tipos de cristais, a sua estrutura produz forças de tração ou compressão que alteram as dimensões do cristal, sendo este denominado efeito piezoelétrico reverso. Os efeitos diretos ou reversos ocorrem somente em materiais piezoelétricos (GALLEGO, 1989).

O quartzo e o titanato de bário são alguns dos materiais que apresentam características piezelétricas naturais. A necessidade da obtenção de materiais sintéticos que reproduzam as características piezelétricas naturais motivou a pesquisa e produção de compostos cerâmicos derivados do Zirconato de chumbo e Titanato de chumbo ( $PbZrO_3$  e  $PbTiO_3$ ), conhecidos comercialmente como PZT (GALLEGO, 1989).

O desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas foi revolucionário. Além de apresentarem melhores propriedades que os cristais, após a polarização, também oferecem geometrias e dimensões flexíveis, por serem fabricadas através da sinterização de pós cerâmicos, conformados via prensagem ou extrusão (BERNARD, 1971). A maioria dos materiais piezelétricos sintéticos comercializados atualmente possui em sua composição  $(Pb, La)(Zr, Ti)O_3$ . O desenvolvimento desse tipo de material cerâmico policristalino ampliou consideravelmente a gama de aplicações da piezeletricidade. Tal fato se deve à fácil manipulação das suas características físico-química.

Os PZTs são dotados de características como: dureza e densidade elevadas, podendo ser produzidos em qualquer tamanho e formato, quimicamente inertes, imunes à umidade e outras condições atmosféricas. O eixo mecânico e o eixo elétrico podem ser precisamente orientados conforme a necessidade da aplicação através do processo de polarização do PZT (BERNARD, 1971).

**Tabela 2.1** Propriedades e Características de PZTs. (UCHINO, 2017)

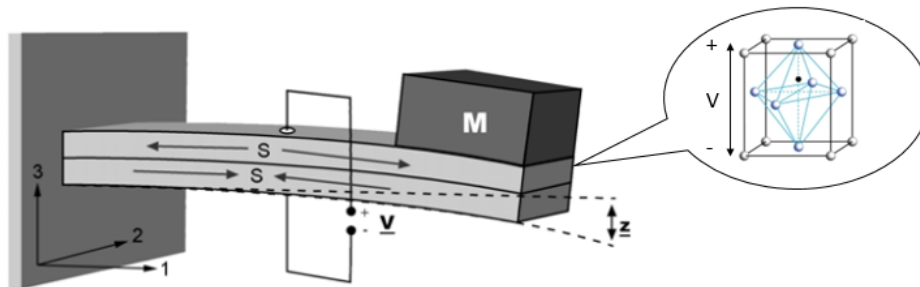
<b>Tipo</b>	<b>Composição</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicação</b>
PZT-4	$PbZrO_3$	Grandes amplitudes mecânicas baixas perdas mecânicas e dielétricas	limpadores ultra-sônicos, sonares e aplicações que exijam potencial acústico
PZT-5A	$PbZrO_3$	Alta sensibilidade, permissividade e tempo de estabilização	Acelerômetros e captadores de vibração
PZT-5H	$Pb(Mn_{1/3}Sb_{2/3})O_3$	Receptores Hiper sensíveis, grande permissividade, acoplamento e constante piezelétrica	Hidrofones, impressoras, instrumentos de alta precisão
PZT-5J	$Pb(Ni_{1/2}Nb_{1/2})O_3$	alta energia gerada, tensão de saída e permissividade	hidrofones



Existe grande variedade de cerâmicas PZT com características diferenciadas. Alguns modelos tipicamente utilizados na constituição de células e atuadores piezoelétricas são apresentadas na Tabela 2.1

A principal característica que torna um determinado cristal ser considerado piezoelétrico é que na sua constituição físico-químico não possua centro simétrico, pois essa propriedade tem sua origem na anisotropia do cristal, ou seja, a resposta do material a um estímulo externo não ser a mesma em todas as direções.

Analisando o efeito anisotrópico em uma molécula neutra, antes de submeter o material a uma força externa, centros gravitacionais de cargas positivas e negativas coincidem, provenientes da geometria da ligação. Então os efeitos externos das cargas positivas e negativas são cancelados, resultando em moléculas neutras, conforme abordado na Figura 2.1. Ao exercer uma pressão no material sua estrutura é parcialmente deformada, levando a uma separação dos centros gravitacionais de cargas positivas e negativas das moléculas, gerando pequenos dipolos. As cargas internas dos polos são mutuamente canceladas e a distribuição das cargas ligadas aparecem na superfície do material, polarizando dessa forma o material. Esta polarização gera um campo elétrico, que por sua vez produz a diferença de potencial nos polos do material (TAKAHARA et al, 2005).



**Figura 2.1** Comportamento típico do da estrutura cristalográfica de um sensor piezoelétrico.

## 2.2 EFEITO ELETROMAGNÉTICO

O princípio de indução eletromagnético foi descobertos em 1831 por Michael Faraday, que descobriu o efeito da indução de corrente elétrica ocasionado por campos eletromagnéticos atuantes em um espira de cobre. Posteriormente em 1834 Heinrich Lenz, propôs uma regra para a definição do sentido da corrente induzida, tal feito não havia sido explicado por Faraday e foi de grande relevância para o desenvolvimento dos estudos do eletromagnetismo e dessa mesma forma, para os desenvolvimento de máquinas elétri-

cas, que utilizam da indução produzida pela corrente elétrica para produzir movimento (HALLIDAY et al, 2012).

Segundo a lei de indutância eletromagnética demonstrada nos experimentos de Faraday e quantificada por Franz Neumann, descrevendo o comportamento da força eletromotriz induzida (FEM) como sendo uma relação entre a variação do fluxo magnético pela variação do tempo, de tal maneira a definir a equação 2.1. Contudo, a variação do fluxo magnético quando aplicada em espiras, a equação deve ser multiplicada pelo número de espira, como descrito na equação 2.2 (HALLIDAY et al, 2012):

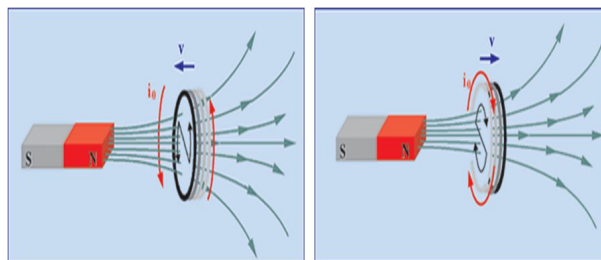
$$\epsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

$$\epsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Uma corrente induzida surgirá numa espira fechada com um sentido tal que ela se oporá à variação que a produz (HALLIDAY et al, 2012).

Complementando a Lei de Faraday, a Lei de Lenz descreve o comportamento da corrente em relação ao movimento do fluxo magnético.

A Figura 2.2 descreve a teoria de Lenz, na qual o polo e o sentido de deslocamento de um material magnético excita uma corrente no sentido horário quando o deslocamento é direcionado ao norte. Após Lenz descrever comportamento da corrente em função de um determinado fluxo magnético em um circuito fechado, foi possível estender esse estudo à aplicações mas avançadas, como o caso dos transformadores, dos geradores e motores elétricos (HALLIDAY et al, 2012).

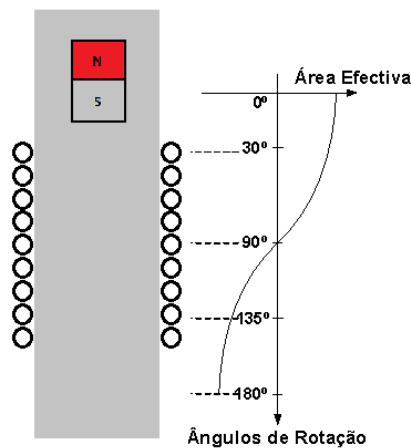


**Figura 2.2** Descritivo da Lei de Lenz.

Em 1831, tanto Michael Faraday, no Reino Unido, como Joseph Henry, nos Estados Unidos, demonstraram cada um a seu modo, a possibilidade de transformar energia mecânica em energia elétrica. Um dos geradores tipicamente estudados são os geradores lineares (Figura 2.3) (TORAH et al., 2008). Por possibilitar a produção de sinais de

tensão lineares e pela simplicidade da configuração, o gerador tem como base de funcionamento o deslocamento linear de um material magnético, no interior de uma bobina de cobre.

Assim como demonstrado na Figura 2.3, a cada instante do deslocamento do ímã ao longo das espiras, corresponde a uma intensidade de tensão produzida, tal fato é proveniente da variação do fluxo magnético assim como descrito na Equação 2.2, ou seja, o rendimento do gerador está diretamente relacionada com a intensidade do campo magnético produzido pelo material e a quantidade de espiras do gerador. Torah (2008) e Takahara et al (2005) abordam o comportamento de geradores lineares e não lineares que utilizam o mesmo princípio de funcionamento exemplificado da Figura 2.3, os resultados demonstram a importância da qualidade do indutor e como o movimento influencia no resultado do sinal produzido. Logo, o deslocamento do material magnético ao longo do centro das espiras produz tensão alternada, com fase e frequência proporcional a posição e a velocidade de deslocamento desse material.



**Figura 2.3** Gerador de Corrente Alternada.

## 2.3 GERADOR HÍBRIDO

A colheita de energia por vibração que utilizam métodos convencionais, compreende modelos de grau de liberdade único e funcionam satisfatoriamente em frequência de ressonância singular, o que os torna eficientes em operações com largura de banda de frequência estreita (RAJARATHINAM, 2018).

Quando as frequências operacionais externas são deslocadas da frequência de ressonância, o desempenho do gerador diminui drasticamente, outra justificativa para o radical decaimento da potência gerada se deve ao fato da relação da potência e da frequência

angular (ROUNDY; WRIGHT, 2004). Em contraste, a maioria das fontes de vibração ao nosso redor são aleatória, variável no tempo e de baixa frequência. Logo, as pesquisas estão objetivando principalmente gerar energia de forma mais eficiente a partir de fontes de vibração de baixa frequência. Várias soluções foram propostas para melhorar o desempenho da colheita de energia em faixas de frequência mais baixa, como propostas: incluir rigidez de mola não linear (WANG et al, 2017), modificar a matriz de gerador (SARI; BALKAN e KULAH, 2008), acoplamento magnético (MANN e SIMS, 2009) e conversão híbrida (SHAN et al, 2013; TOYABUR et al, 2018). No entanto, soluções propostas possui algumas limitações, como ter uma única frequência dominante ou ser efetivo em uma faixa contínua de frequência mais alta.

A maioria dos geradores híbridos propostos até o presente momento apresentam frequências ressonantes mais altas e os modos ressonantes de alta ordem estão longe do primeiro modo de ressonância. Esses fenômenos limitam sua aplicabilidade em algumas situações em que fontes de vibração ambiente, como em faixa de frequência abaixo de 30 Hz.

Nos casos de colheita de energia por vibração utilizando geradores híbridos, a produção de energia é derivado da adição de um ou mais elementos geradores com princípios de geração distintos, no mesmo dispositivo exposto a vibração mecânica. Os métodos de geradores híbrido existentes compreendem a fusão de atuadores piezoelétricos com os geradores eletromagnéticos (RAJARATHINAM, 2018) e eletromagnético com o eletrostáticos (LIU et al., 2017).

Tadesse et al. (2009) apresentaram de forma pioneira um gerador híbrido multimodal utilizando mecanismos de transdução eletromagnéticos e piezoelétricos, o dispositivo reportado tinha dois modos ressonantes de 20 e 300 Hz. Utilizando um piezoelétrico na estrutura Cantiliver e um ímã acoplado a extremidade foi configurado a miscigenação dos atuadores para prover a geração de energia. Rajarathinam e Ali (2018) utilizaram da mesma ideia para coletar ainda mais energia em faixa de frequências variadas, utilizando mais de um atuador conectado a mesma estrutura. Em contra partida Liu et al (2017) utilizaram da estrutura de êmbolo, envolta por uma espira de cobre e um interior ímã e a configuração triboelétrica composta por cobre e alumínio, essa configuração apesar de ineficiente, promove ideias novas e propostas de como se utilizar de outros elementos para produzir energia. Outro aspecto estudado nos geradores híbridos é a forma como os diferentes geradores contribuem para melhoria do desempenho do gerador. A forma tipicamente utilizada é o paralelismo das fontes geradoras, contudo, métodos mais avançados propõe a composição dos sinais pós etapa de retificação onde os sinais já tratados

podem ser somados para aumentar a tensão ou a corrente de saída, ou ainda podem ser utilizados em circuitos de gerenciamentos de cargas mais avançados, que promovem a melhoria do rendimento da geração de energia gerindo de forma eficaz o armazenamento da produção de energia (RAJARATHINAM, 2018).



*Neste capítulo é apresentada a plataforma experimental utilizada para levantamento dos dados obtidos ao longo do estudo. Inicialmente é demonstrado o desenvolvimento de um Shaker responsável pela excitação do sistema de geração e do sensor, em seguida é apresentado a constituição do gerador e do sistema de condicionamento de carga, levando em consideração as análises prévias para concepção do dispositivo de geração de gerenciamento de carga. Adicionalmente é exibido o protótipo do sensor de vibração e seu funcionamento.*

## **PLATAFORMA EXPERIMENTAL**

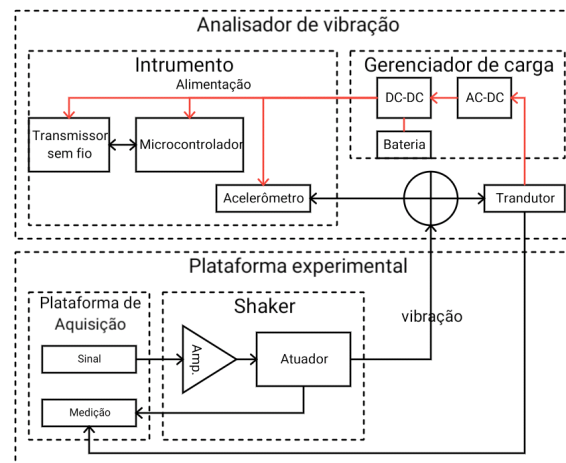
### **3.1 VISÃO GERAL DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL**

A Figura 3.1 ilustra um fluxograma geral da plataforma experimental e o protótipo do sensor de vibração proposto nesta dissertação de mestrado.

A plataforma experimental foi o ambiente criado para realização dos testes e ensaios dos dispositivos que compõem o sensor de vibração. É possível identificar os componentes que estão envolvidos na geração do sinal e na medição da tensão do atuador e do micro gerador, essa etapa é identificada como aquisição de dados. Os elementos responsáveis por prover a vibração é composto por amplificador de sinais e um *shaker*.

O bloco identificado na Figura 3.1, como sensor de vibração, é composto pelo microcontrolador, responsável pelas diretrizes e coleta de dados do sensor opera em conjunto com o transmissor sem fio para transmissão dos dados e realiza as medições a partir do acelerômetro. O gerenciador de carga que funciona diretamente em conjunto com o transdutor está ilustrado interligado por setas na cor vermelha para identificar que esse não se trata de uma interligação de dados ou sinais, e sim de alimentação proveniente do sistema de regeneração.

Essa configuração garantiu a flexibilização para a realização de testes com diferentes configurações. Adicionalmente, permitiu a rápida manutenção e manuseio do *setup* experimental. A plataforma experimental permitiu testar diversos tipos de sinais de excitação, em frequências variadas ou fixa, com amplitudes determinadas, gerando diferentes possibilidades de configuração para o estudo e caracterização do protótipo.



**Figura 3.1** Esquemático da plataforma experimental.

## 3.2 SHAKER

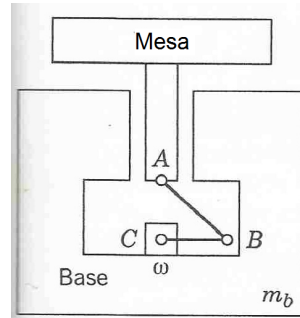
Os excitadores mecânicos ou Shakers são divididos em dois grupos, a saber: condução direta Figura 3.2.a) e rotação desbalanceada Figura 3.2.b). A ação do Shaker de condução direta ocorre em um único sentido, isto é, o movimento é executado pelo excitador mecânico que transfere a energia em deslocamento linear na direção de determinado eixo (MCCONNEL, 1995). Dado a natureza do deslocamento linear, esse tipo de excitador pode ser utilizado em: testes de reação, nos quais um único movimento em forma de impulso é executado e, a partir dessa ação, estuda-se os efeitos causados; e em testes de vibração, nos quais os movimentos são contínuos e a forma do sinal de excitação pode ser modificada para simular ambientes e situações diversas.

Os shakers de rotação desbalanceada são constituídos por atuadores rotativos que, a partir da descentralização de uma massa fixada no eixo, geram o desequilíbrio derivado da força centrípeta, esse modelo é aplicado em estudos de vibração com características de torção e cujo os movimentos não são lineares.

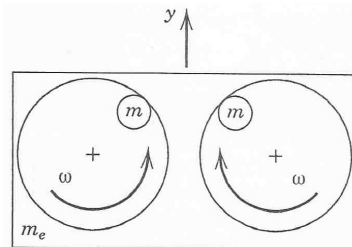
Com base nas técnicas de análise de vibração exploradas, o shaker por condução direta foi escolhido para os testes desempenhados ao longo do trabalho. O shaker proposto foi



(a) Esquema de sheker de condução direta.



(b) Esquema de sheker de rotação desbalanceada.

**Figura 3.2** Modelos de shakers (MCCONNEL, 1995).

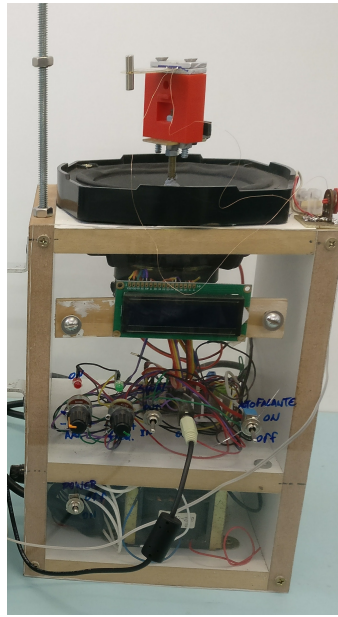
construído utilizando-se um autofalante modelo 20120911, de diâmetro 6.5", impedância  $4\Omega$ , e potência máxima de 90W; amplificador de áudio de 200 Watts de potência e frequência de respostas 20-20kHz; e uma fonte linear (tensão: 24V e potência: 120W). Dessa forma, ao usar um parafuso ao centro do autofalante foi possível fixar os dispositivos e realizar os testes com garantia de eliminação de folgas. A Figura 3.3 apresenta o shaker desenvolvido para os testes realizados nesta pesquisa. Como meio de calibração, foi utilizado o shaker PCB-394C06, gera oscilação senoidal de 159,2Hz e  $9,8\text{m/s}^2$  para carga máxima de 210g.

### 3.3 MICRO-GERADOR

O micro-gerador desenvolvido consiste no paralelismo de duas fontes de geração com princípios de conversão de energia diferentes: piezoelétrico e eletromagnético.

A cápsula piezoelétrica foi o primeiro elemento do gerador a ser estudado. O mesmo é constituído por duas partes: uma lâmina de 0,26mm de espessura e 30mm de diâmetro, feito em latão e uma camada de 0,3mm de espessura e 24mm de diâmetro de cristal piezoelétrico. Esse transdutor é capaz de gerar sinais de tensão de 30Vac.

Com base na Lei de Hooke (equação 3.1), foi possível determinar a deformação cauda



**Figura 3.3** Shaker.

pela força no material estudado, dessa forma, considerando a cápsula piezoelétrica uma barra chata vertical e analisando foi possível determinar a máxima força aplicada para um determinado valor de massa.

Aplicando a mesma Lei de Hooke em estudo de materiais foi possível determinar a relação entre tensão e deformação. Essa relação utiliza o módulo de elasticidade, ou módulo de *Young*, como constante que determina a propriedade elástico do material estudado conforme apresentado na equação 3.2.

$$F = -k.x \quad (3.1)$$

$$F = A_0 E \left( \frac{l - l_0}{l_0} \right) \quad (3.2)$$

A diferença na magnitude do módulo de elasticidade dos metais, cerâmicas e polímeros é consequência dos diferentes tipos de ligação atômica existentes nessas três classe de materiais. Com o aumento da temperatura o módulo de elasticidade tende a diminuir para a maioria dos materiais. Para a maioria dos metais, a magnitude do módulo de elasticidade varia entre 45GPa para 407GPa. Os valores dos módulos de elasticidade para materiais cerâmicos são muito elevados. Para os polímeros, os valores do módulos de elasticidade são menores em relação aos metais, variando entre 0,007 a 4 GPa (CALLISTER, 2002). A Tabela 3.1 apresenta o módulo de elasticidade para alguns metais à

temperatura ambiente (CALLISTER, 2002).

**Tabela 3.1** Módulo de elasticidade. (CALLISTER, 2002)

Material	Temperatura de fusão (°C)	E (GPa)
Alumínio (AL)	660	69
Latão (Liga)	-	97
Cobre (Cu)	1085	110

Utilizando-se as medidas do transdutor, os valores da tabela 3.1 e as equações 3.1 e 3.2 é possível determinar a força suportada pela viga para uma determinada massa considerando aceleração da gravidade de  $9,8\text{m/s}^2$ , conforme apresentado na equação 3.3 e 3.4.

$$F = 0,11 * 97 * \left( \frac{0,035 - 0,032}{0,032} \right) = 1N \quad (3.3)$$

$$m = \frac{1}{9,8} = 0,102Kg \quad (3.4)$$

Para prover a energia suficiente foi projetado um indutor considerando a alimentação de 3,3V para os dispositivos. Dessa forma, utilizou-se a lei de Faraday (equação 3.5) e da equação 3.6 (fluxo magnético), terminar as dimensões da bobina utilizada no gerador. Substituindo a equação 3.5 em 3.6 é calculado a força eletromotriz (3.7), assim, considerando a intensidade magnética do ímã de  $0,587\text{T}$  e o raio do indutor de  $0,11\text{m}$ , o número aproximado de espiras calculado é de 1500 voltas e área aproximada de  $0,0038\text{m}^2$ .

$$E = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.5)$$

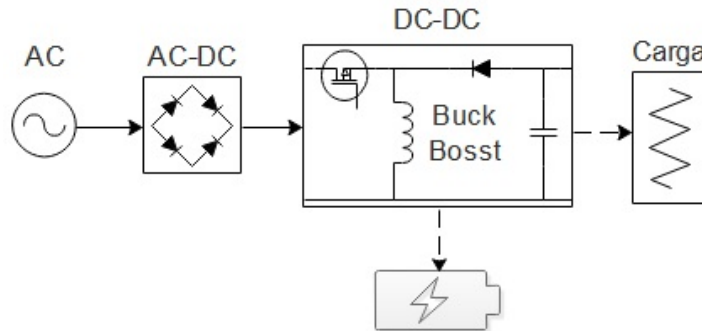
$$\phi = B.A.\cos(\omega.t + p/2) \quad (3.6)$$

$$E = N.B.A.\cos(\omega.t) \quad (3.7)$$

$$E_{max} = N.B.A \quad (3.8)$$

### 3.4 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE ENERGIA

A Figura 3.4 apresenta o esquemático do sistema de condicionamento de energia.



**Figura 3.4** Esquemático de condicionador de carga.

O circuito integrado CBRHDSH1-40L, fabricado pela *Central Semiconductor Corp.*, corresponde a uma ponte de retificação completa, constituída por diodos *Schottky*, cuja a máxima queda de tensão é igual a 0,38V por diodo. Essas características foram consideradas previamente devido à necessidade de garantir que as mínimas tensões geradas seriam suficientes para romper a barreira dos diodos e que a frequência do sinal gerado não seria distorcida pela resposta dos diodos.

O circuito de gerenciamento de carga utilizado foi o BQ25505RGRR desenvolvido pela *Texas Instrument*, o dispositivo é capaz de reaproveitar energia a partir de tensões da ordem de 0,1 Volts, enquanto consome 5nA de corrente. A flexibilidade do circuito garante configurações que proporcionam mais robustez ao projeto, informando o nível da bateria, viabilizando a desabilitação do circuito em casos de hibernação de todo o dispositivo. Por se tratar de um conversor DC-DC do tipo *Buck-Boost*, o dispositivo é capaz de entregar níveis de tensões estáveis na saída do sistema. Composto também por um sistema *zero crossing* (detector de cruzamento de zero), esse responsável por informar ao controlador do conversor *Buck-Boost* o momento ideal para acionamento das chaves internas do dispositivo. Por outro lado o gerenciador de carga é responsável pelo acionamento da chave que desvia parte da energia produzida para recarregar a bateria.

O acumulador utilizado no desenvolvimento desse sistema foi uma bateria CR2032 de Lithium de 3V, e capacidade de 250mAh. Essa capacidade é suficiente para manter uma carga de 15K $\Omega$  por aproximadamente 1300 horas. Além das dimensões e da capacidade energética as baterias do modelo CR2032 pesam 3 gramas, garantindo uma adaptabilidade para sistemas de dimensões reduzidas.

O circuito apresentado no Anexo A foi criado a partir da integração dos componentes,

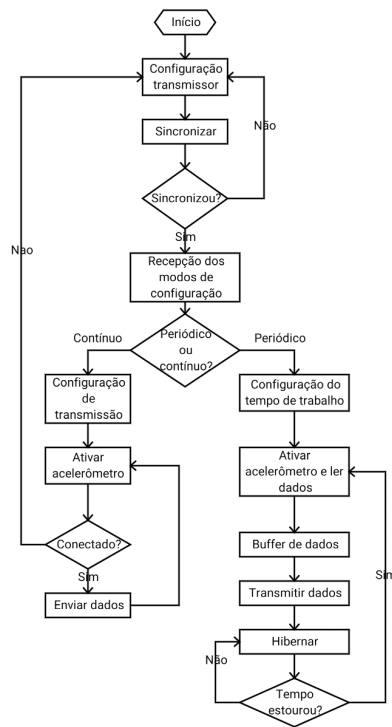
que correspondem à aplicação do CI BQ25505RGRR no protótipo. A composição dos componentes foi dimensionada com os seguintes critérios: sobre tensão da bateria igual a 3,5V, tensão de uso da bateria a partir de 2,8V até 3,1V, tais parâmetros foram avaliados previamente para determinar os resistores, indutores e capacitores responsáveis pelo o ponto de operação do *zero crossing*, do gerenciador de carga e do conversor DC-DC. O CI colocar o pino 13 em nível alto quando a bateria está com o nível de carga aceitável, isso permite ao dispositivo ativar ou desativar o circuito de gerenciamento, diminuindo o consumo quando não houver necessidade de uso.

### 3.5 SENSOR DE VIBRAÇÃO

O sensor de vibração corresponde a um conjunto de subcircuitos que juntos desempenham a função de coletar os dados produzidos pela vibração, empacotar essas informações e enviar esses via transmissão sem fio para outro dispositivo conectado a um computador configurado com o software de aquisição. Desta maneira, o sensor é subdividido em três estágios, conforme pôde ser observado no diagrama da Figura 3.1: Microcontrolador, transmissor *wireless* e o acelerômetro. Os componentes designados que constituem o sensor, tiveram como ponto de avaliação prevalente o consumo de energia, por consequência, o microcontrolador elegido foi o MSP430G2553 produzido pela *Texas Instrument*, com o consumo de  $230\mu\text{A}$  à 2,2V operando a 1MHz, e o consumo em estado de hibernação  $0,5\mu\text{A}$ . Além desses fatores o microcontrolador tem quatro modos de operação que modificam a forma de consumo e de processamento o que favoreceu a estratégia de racionamento de energia.

O firmware desenvolvido para o microcontrolador possui duas formas de operação, a saber: modo contínuo e modo período, como apresentado na Figura 3.5. O primeiro foi concebido com o intuito de execução de teste no qual o sistema se mantém coletando dados continuamente até que exista uma interrupção ou que o sistema seja desligado. O segundo modo atua de forma intermitente com as leituras dos dados e o tempo de hibernação configurados pelo usuários. Esse tipo de configuração é a base de sistemas operacionais voltados para nó de sensores sem fios. A periodicidade de operação da medição determina o tempo de vida do sensor, contudo, medições em períodos muito espaçados não favorecem a confiabilidade das análises.

Considerando-se os critérios de baixo consumo de energia e de faixa de operação de frequência, o acelerômetro eleito foi ADXL362 criado pela *Analog Devices* (12Bits de resolução, com consumo de  $3\mu\text{A}$  à 2V em funcionamento e  $10\text{nA}$  em estado de hibernação, além da capacidade de medir variações de 0,001 à 8g, a taxa de amostragem de 400Hz).



**Figura 3.5** Fluxograma do programa do sensor de vibração.

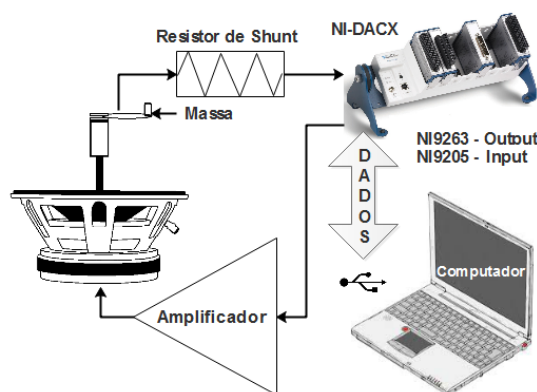
Como foi abordado por Payne et al. (2015), o acelerômetro ADXL362 é aplicável para a prática de análise de vibração, mesmo que suas características técnicas sejam limitadas quando comparados com sensores mais robustos.

O transmissor utilizado foi o nRF24L01 fabricado pela Nordic. Ultra baixo consumo de energia tendo um consumo de 11,3mA para envio de dados e 12,3mA em recepção e em estado de suspensão  $22\mu\text{A}$ , funcionando na faixa de 2,4GHz e com taxa de transmissão máxima de de 2Mbps. Esse transceptor, assim como o acelerômetro, utilizam o *Serial Peripheral Interface* (SPI) como meio de comunicação com microcontrolador. Com esse meio é possível alcançar taxas de até 4MHz, além disso, o mesmo possui protocolo simples e destinado à comunicação de microdispositivos.

### 3.6 PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A plataforma de aquisição de dados, representado pelo bloco "Medição" na Figura 3.1, é parte responsável pela coleta dos dados referente ao comportamento do gerador e dos sinais de excitação do *shaker*. Essa etapa descreve também a metodologia desenvolvida para estudo, caracterização e dimensionamento do sistema de geração.

A Figura 3.6 ilustra o sistema de aquisição de forma ampliada, no qual é utilizado o módulo NI-DACX da *National Instruments* com os cartões NI-9205 e NI-9263. O cartão NI-9263 corresponde a um conversor digital-analógico (DAC) de 32 canais, 16bits de resolução, taxa de aquisição de 250kS/s, gera sinais com amplitudes que variam de  $\pm 200\text{mV}$  à  $\pm 10\text{V}$ . Esse cartão é responsável por gerar o sinal senoidal na frequência determinada para excitar o *shaker*. O cartão NI-9205 tem um conversor analógico-digital (ADC) com resolução de 16bits. Possui 4 canais de leitura e tensão de  $\pm 200\text{mV}$  à  $\pm 10\text{V}$ , e taxa de amostragem é de 100kS/s/ch. Foi utilizado um resistor *shunt* para simular os diferentes tipos de carga e o comportamento da corrente e da tensão durante o processo de geração. Foi determinado como a tensão referência de  $\pm 5\text{V}$  com taxa de amostragem de 1kS/s, visto que a frequência de excitação utilizadas nos testes não ultrapassariam 200Hz e a máxima tensão 10 V. Outros pontos importante que foram considerados é a sensibilidade do conversor, que ao operar com a leitura de  $\pm 5\text{V}$  representa um sensibilidade de  $46,4\mu\text{V}$  com um erro de 4%, a garantia das medidas realizadas se sustenta ainda na auto-calibração realizada no equipamento antes do início de cada teste, com o objetivo de eliminar offset do próprio instrumento.

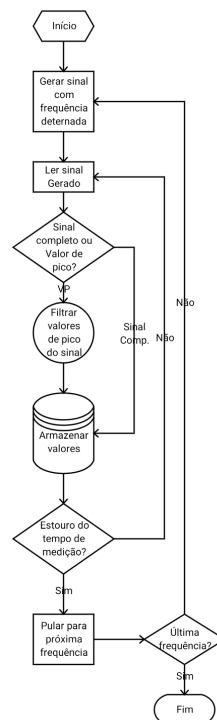


**Figura 3.6** Esquema de coleta de dados.

O método utilizado para coletar os dados foi automatizado utilizando o software *Lab-View* produzido pela *Nacional Instruments* (Anexo B). O programa elaborado para a coleta de dados (Anexo C) consiste na geração de um sinal senoidal com frequência e amplitude definidos pelo usuário e em coletar o sinal de tensão nos terminais do piezoelétrico a partir da excitação gerada pelo *shaker* no transdutor. O programa foi dividido em dois modo de aquisição do sinal completo, em que é registrados todos valores possíveis do sinal amostrado, permitindo dessa forma reconstruir o sinal sob análise. O segundo modo consiste em filtrar o sinal e registrar apenas os valores de pico e eficazes de tensão. Este

modo permite determinar as frequências de maior produção de energia além da máxima amplitude para cada faixa de frequência. Enquanto o primeiro existe para determinar as características de fase e formato do sinal produzido pelo transdutor.

A Figura 3.7 corresponde ao fluxograma do programa em *LabView* para o sistema de coleta de dados. O algoritmo do método de aquisição inicia-se gerando o sinal senoidal, que foi previamente configurado com o tempo de duração de teste para cada frequência, a frequência inicial e final do teste, a amplitude do sinal de excitação, o número de amostras por segundo, qual a frequência de amostragem do sinal coletado e a seleção da filtragem da tensão de pico ou da aquisição do sinal completo. Após as configurações, o programa lê os sinais produzidos no transdutor e realiza a aquisição do valor de pico e RMS ou do sinal completo que são previamente armazenados em arquivo .xls. Esse processo se repete variando-se a frequência a cada 1Hz até que a frequência final seja testada. Ao fim de cada teste é possível determinar a resposta do sistema para cada 1Hz de frequência dentro do limite especificado, isso garante a possibilidade de caracterização do sistema gerador e condicionador de carga.



**Figura 3.7** Fluxograma do programa em LabView do sistema de coleta de dados.



*Este capítulo apresenta e discute os principais resultados, enfatizando a caracterização do gerador estimando a resposta elétrica do sistema em função da configuração do massa, com a finalidade de determinar a máxima eficiência do gerador e conseqüentemente os pontos de operação do sensor*

## **TESTES E RESULTADOS**

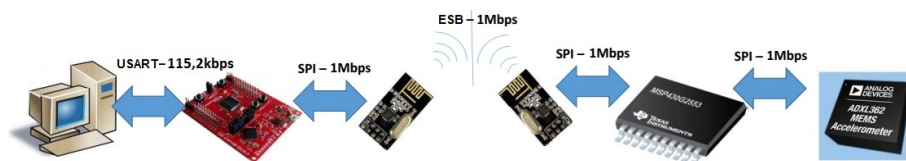
Assim como identificado na Figura 3.1 o sensor de vibração é composto pelo instrumento, pelo transdutor e pelo gerenciador de carga. A fim de definir a máxima carga do sistema, foi desenvolvido primeiramente o projeto do instrumento, com foco na minimização do consumo de energia. Com conhecimento das características das necessidades energéticas do instrumento foi possível dimensionar a estrutura do micro-gerador. A seguir, os testes de caracterização dos modelos de geradores foram desempenhados para confirmar que a geração de energia seria suficiente para suprir a demanda do instrumento. Por fim, foi realizados testes no sensor completo.

### **4.1 SENSOR**

O acelerômetro foi conectado ao microcontrolador através do barramento serial SPI, a maior taxa de amostragem do mesmo é 400Hz, cerca de duas vezes maior que a maior frequências de excitação utilizada nos testes. Com o auxílio do multímetro MINIPA MDM-8156A, foi medido a corrente do acelerômetro e do microcontrolador separadamente. Obteve-se respectivamente os valores de 1,2mA e  $3\mu\text{A}$ , considerando a tensão de alimentação de 3,3V. As medições de corrente dos dispositivos separadamente serviram para identificar a máxima potência consumida pelo dispositivos.

Em seguida foram realizados os teste com o transmissor sem fio nRF24L01 e o microcontrolador, também utilizando comunicação serial SPI com mesma taxa de comunicação

do acelerômetro. Os ensaios permitiram definir a taxa de comunicação entre os transmissores em 1Mbps, essas velocidades foram determinadas para viabilizar a sincronia entre os dispositivos interconectados preponderando o consumo de energia e a frequência de processamento do microcontrolador. A Figura 4.1 ilustra as taxas/protocolos de comunicação dos dispositivos que compõem o sensor e os componentes responsáveis pela aquisição dos dados. A corrente consumida pelo transmissor em modo de transmissão foi de 8,9mA e em modo de recepção 9,7mA, considerando a mesma tensão de alimentação de 3,3V.



**Figura 4.1** Esquema de comunicação entre os dispositivos.

A partir da aquisição do sinal senoidal de 100Hz capturado como o acelerômetro 602D01, fabricado pela *IMI* e com o acelerômetros ADXL362 foi possível observar que a resolução proporcionado pelo ADXL362 sofre com a baixa taxa de amostragem do sensor, contudo, ainda é possível retirar informações relevantes do sistema sob análise. Apesar da baixa resolução demonstrada nos dados fornecidos pelo acelerômetro, se apresentou viável em aplicações reais, considerando-se um dispositivo de baixo consumo de energia e de baixo custo.

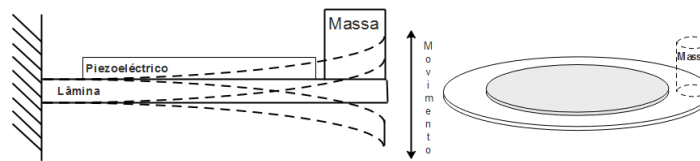
Foi verificado que a máxima potência consumida pelo dispositivo foi aproximadamente 35mW em modo ativo e 0,085mW em repouso. O valor em modo ativo, apesar de elevado para as proporções do circuito, não representa um valor constante já que a transmissão dos dados ocorrem em rajadas de pacotes, e a operação do dispositivo, de forma intermitente.

## 4.2 MICRO-GERADOR

Com base nos testes realizados com o sensor de vibração ficou definido que a potência proporcionada pelo o micro-gerador deveria suprir a demanda de consumo de todo o circuito. Dessa forma os estudos desempenhados sob o gerador tiveram foco na análise e caracterização dos elementos envolvidos, procurando conhecer os limites e comportamento, em especial da cápsula piezoelétrica. Os testes realizados no gerador foram divididos em três etapas: caracterização do sistema piezoelétrico, caracterização do sistema eletromagnético e caracterização do sistema híbrido.

### 4.2.1 Caracterização do sistema Piezoelétrico

A configuração proposta para o desenvolvimento do gerador foi a viga de Cantilever que baseia-se em fixar a extremidade de uma lâmina enquanto a outra extremidade livre acomoda uma massa de valor determinado, conforme apresentado na Figura 4.2 . A variação da posição e do peso da massa influenciam diretamente na amplitude de deflexão e frequência ressonância da lâmina. A partir da observação desses fatores, foi alterado o valor da massa para determinar o valor que melhor se aplicaria aos testes. Dessa forma variando em 0,5g até 5g e excitando o sistema com aceleração de 1G à frequência de 10Hz, aumentando em 1Hz até a frequência de ressonância, identificou-se que para massas superiores a 3g tem-se uma deformação na lâmina de latão que é destrutiva a célula piezoelétrica. Adicionalmente, também observou-se uma distorção da resposta de tensão causada pelo shaker com um consumo excessivo de corrente do amplificador. Percebendo-se as limitações do atuador e do elemento piezoelétrico, a massa foi definida em 2,6g para realização dos testes.

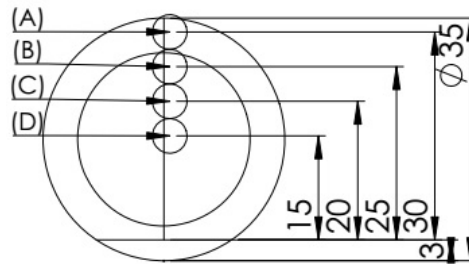


**Figura 4.2** Esquema do modelo de viga de Cantilever aplicado no gerador.

Na caracterização do piezoelétrico, foram executados dois grupos de testes: o primeiro grupo consistiu em variar a posição da massa ao longo do eixo central do piezoelétrico (chamado de Distribuição Linear) e o segundo grupo consistiu em dividir a massa em dois e distribuir de forma equidistante (chamada de Distribuição Angular) (SOUZA; FONTANA e LIMA, 2018).

Os ensaios realizados no primeiro grupo de testes da caracterização do piezoelétrico obedeceram o posicionamento da massa apresentado na Figura 4.3, no qual o ponto de ancoragem do disco corresponde a 3mm e o posicionamento das massas corresponde à 5mm de um centro de massa a outro.

Os testes realizados para caracterização do micro-gerador consistiu em excitar o gerador com um sinal senoidal a 1G de aceleração na frequência inicial de 10Hz durante 10 segundo variando-se a frequência em 1Hz até a frequência final de 200Hz, com a taxa de 1 amostra por segundo, foram coletados os valores de tensão de pico. O tempo de 10 segundos corresponde ao tempo necessário para garantir que a transição entre as frequências não gerem componentes indesejadas. Ao fim de cada teste foi gerado um conjunto



**Figura 4.3** Distribuição linear: (A) 30mm; (B) 25mm; (C) 20mm e (D) 15mm.

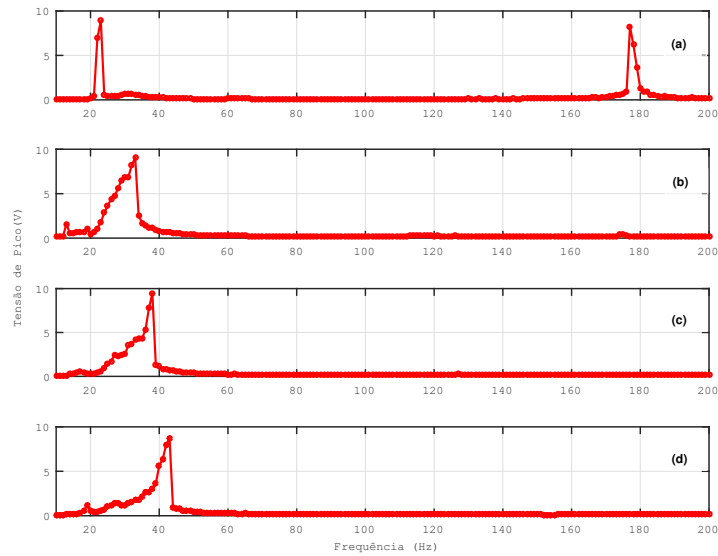
de dados de 1900 valores para cada ponto, em seguida esses foram tratados, formando 190 valores que constituiu os gráficos de resposta elétrica.

A Figura 4.4 representa a resposta elétrica do transdutor piezoelétrico para o teste de caracterização, considerando o posicionamento de massa à 30mm (Figura 4.4.a), 25mm (Figura 4.4.b), 20mm (Figura 4.4.c) e 15mm (Figura 4.4.d). Foi observado que os valores de tensão de pico-a-pico coletados nos pontos **A**, **B**, **C** e **D** atingem as mesmas amplitudes, variando apenas a frequência de ressonância.

O Ponto **A** apresentou duas frequências de ressonância em 22Hz e 178Hz, o que pela ótica da aplicabilidade possibilita a operação do gerador em frequências mais altas. Contudo, os pontos **B**, **C** e **D**, respectivamente, apresentaram respostas significativas nas frequências próximas à de ressonância (33Hz, 38Hz e 43Hz). Outra observação esclarece que o posicionamento da massa sobre a lâmina estima que a deformação do cristal piezoelétrico pode garantir respostas em frequências diferentes da frequência de ressonância, levantando a hipótese de um posicionamento ideal para cada tipo e valor de excitação.

Como parte do processo de análise dos dados, foi realizado a medição dos sinais de tensão produzidos pelo elemento de excitação (Shaker) e pela cápsula piezoelétrica na frequência de ressonância medida no teste de variação da frequência, nos respectivo ponto de fixação da massa: 30mm, 25mm, 20mm, e 15mm. A Figura 4.5 apresenta o comportamento dos sinais, identificando as defasagens dos sinais para cada posicionamento da massa. A defasagem entre os sinais variou entre  $210^\circ$  e  $220^\circ$  para as distâncias do ponto **A**, **B** e **C**, contudo, o ponto **D** apresentou resposta praticamente em fase ( $0,3^\circ$ ) com o sinal de excitação, comprovando que a posição da massa impacta não somente na frequência de ressonância mas também no tempo de resposta elétrica do piezoelétrico (SOUZA; FONTANA e LIMA, 2018). Os dados referentes aos sinais de resposta do transdutor serviram para analisar a relação entre resposta do transdutor e o potencial elétrico do gerador, conforme apresentado na Tabela 4.1, utilizando um resistor de shunt de  $20k\Omega$ .

A potência máxima gerada pelo piezoelétrico foi de 4,51mW correspondente à posição



**Figura 4.4** Resposta elétrica do piezoelétrico para distribuição Linear: (A) 30mm; (B) 25mm; (C) 20mm e (D) 15mm.

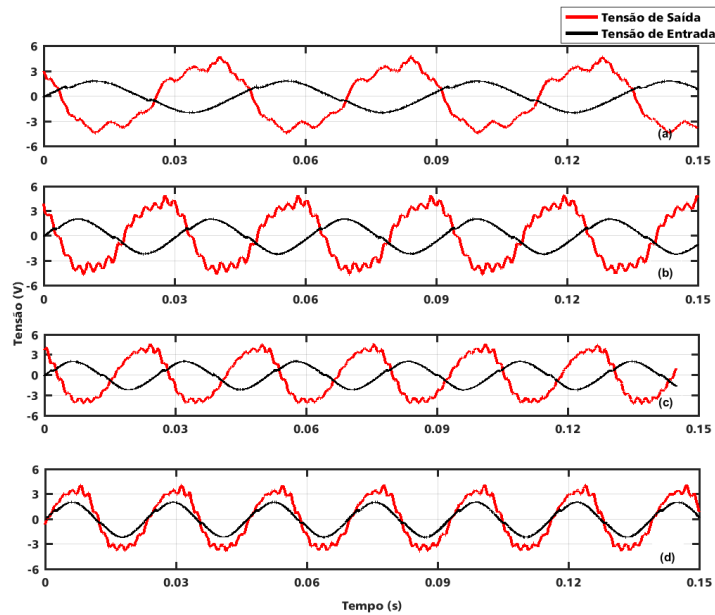
**b**, apesar de não ser o posicionamento mais extremo do transdutor, esse é o ponto mais extremo do cristal localizado sob a lamina de latão. Avalia-se que tal condição proporcionou ao transdutor maior deformação ao cristal e conseqüentemente maior produção de energia.

**Tabela 4.1** Análise de sinais do teste de distribuição linear.

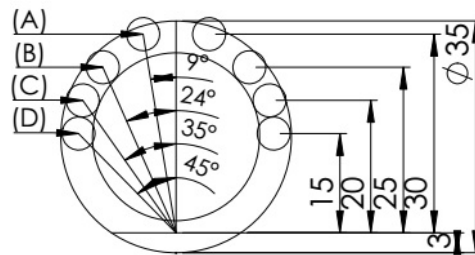
Posição Massa	Defasagem	Tensão	Corrente	Potência	Frequência
30mm	213,7°	8,89V	450 $\mu$ A	4,00mW	23Hz
25mm	220,1°	9,08V	460 $\mu$ A	4,18mW	33Hz
20mm	221,8°	9,44V	478 $\mu$ A	4,51mW	38Hz
15mm	0,3°	8,71V	441 $\mu$ A	3,84mW	43Hz

Continuando o processo investigativo de caracterização do piezoelétrico, foram realizados mesmos testes concluídos na distribuição linear, contudo, massa foi fracionada em duas partes iguais e distribuída ao longo da superfície do disco, nomeando-se esse processo por Distribuição Angular (Figura 4.6).

O resultado obtido a partir dos testes de distribuição angular, apresentou similaridade com os resultados obtidos no teste anterior. A frequência de ressonância obtidas foram



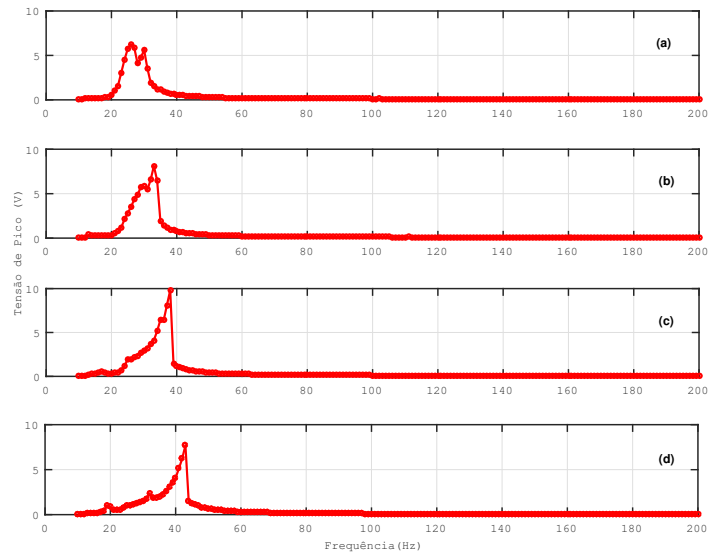
**Figura 4.5** Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição Linear: (A) 30mm; (B) 25mm; (C) 20mm e (D) 15mm.



**Figura 4.6** Distribuição angular: (A) 10° ; (B) 25°; (C) 35° e (D) 45°.

as mesmas para os pontos **B**, **C** e **D**, contudo o ponto **A** expôs uma frequência de ressonância diferente e com valores de amplitude menos significativo que os demais pontos dos testes, além da inibição do frequência de ressonância de 178Hz presente no teste com distribuição Linear, identificou-se a diminuição significativa do potencial de geração de energia e o aumento da faixa de frequência, conforme a Figura 4.7. Para os demais pontos o comportamento da frequência de ressonância e de tensão foram basicamente os mesmos dos obtidos nos teste de distribuição Linear, com a ressalva que os valores de tensão obtidos nos pontos **B** e **D** foram significativamente superiores.

A partir da Figura 4.8 e dos valores referenciados na Tabela 4.2, foi identificado que o ponto de maior rendimento energético apresentou atraso de fase em relação ao sinal de excitação, o que se deve ao fato da alteração do comportamento do piezoelétrico durante



**Figura 4.7** Resposta elétrica do piezoelétrico para distribuição Angular: (A) 10° ; (B) 25° ; (C) 35° e (D) 45°.

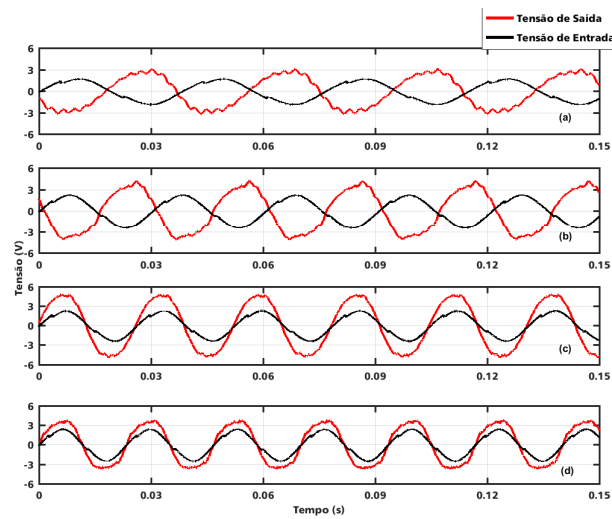
a vibração quando submetido à distribuição da massa em pontos diferentes da superfície do transdutor (SOUZA; FONTANA e LIMA, 2018).

**Tabela 4.2** Análise de sinais do teste de distribuição linear.

Posição Massa	Defasagem	Tensão RMS	Corrente RMS	Potência Média	Frequência
10°	165,9°	6,24V	316 $\mu$ A	1,98mW	26Hz
25°	193,8°	8,12V	411 $\mu$ A	3,34mW	33Hz
35°	-5,9°	9,81V	498 $\mu$ A	4,87mW	38Hz
45°	1,4°	7,69V	390 $\mu$ A	3,00mW	48Hz

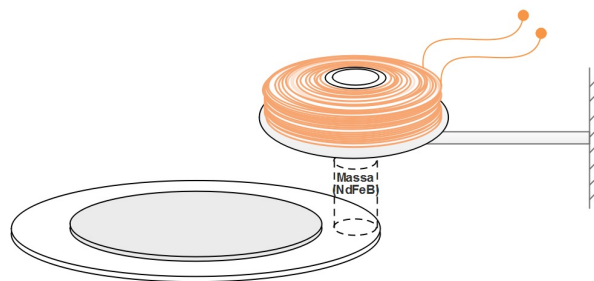
#### 4.2.2 Caracterização do Gerador Eletromagnético

O processo de caracterização do gerador eletromagnético foi simplificado em relação a caracterização do piezoelétrico, pois as limitações mecânicas não permitiram o estudo de todas as combinações das massas utilizada no modelo piezoelétrico. A Figura 4.9 ilustra a montagem do sistema de caracterizador do gerador eletromagnético, o qual é composto por uma bobina de 1500 voltas com fio de cobre de 38 AWG, fixada em uma haste de



**Figura 4.8** Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição Angular: (a)  $10^\circ$  ; (b)  $25^\circ$ ; (c)  $35^\circ$  e (d)  $45^\circ$ .

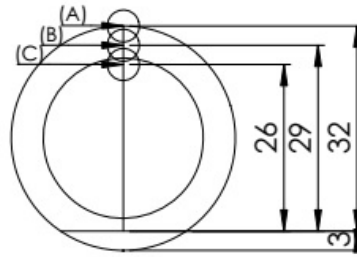
alumínio e a cápsula piezoelétrica. A massa utilizada foi 2,6g e por se tratar de um ímã de neodímio, ao oscilar, o deslocamento provocado de forma vertical faz com que o campo magnético varie no interior da espira, conseqüentemente induz corrente elétrica no sistema.



**Figura 4.9** Esquemático do gerador eletromagnético.

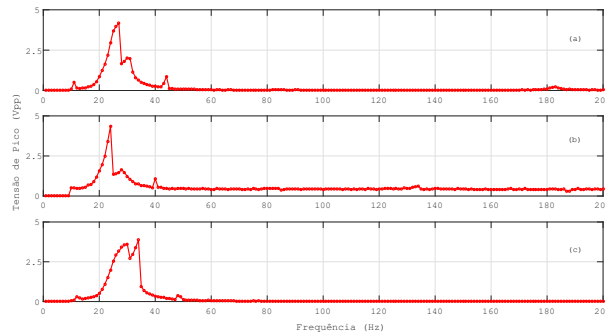
Os ensaios realizados para a caracterização do gerador eletromagnético utilizaram a massa em três diferentes posições conforme ilustrado na Figura 4.10, no qual a diferença de espaçamento entre os pontos foi de 3mm, devido ao comprimento da cápsula e ao diâmetro interno da bobina. Novamente, os teste realizados para caracterização do micro-gerador, consistiu em excitar o gerador com um sinal senoidal a 1G de aceleração, na frequência inicial de 10Hz durante 10 segundo, variando a frequência em 1Hz até a frequência de 200Hz, com a taxa de amostragem de 1 amostra por segundo, foram coletados os valores de tensão de pico. O tempo de 10 segundos corresponde ao tempo necessário para garantir





**Figura 4.10** Distribuição Linear para caracterização do eletromagnético: (A) 32mm; (B) 29mm; (C) 26mm.

que a transição entre as frequências gerem componentes indesejadas.

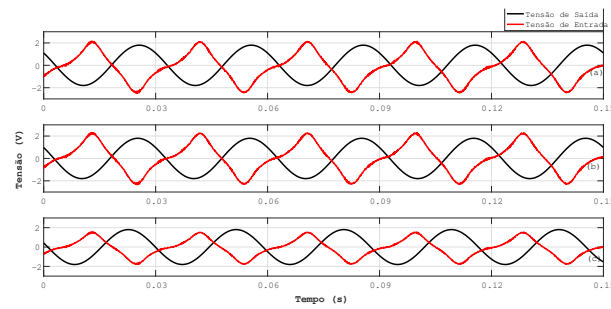


**Figura 4.11** Resposta elétrica do gerador eletromagnético. (A) 32mm; (B) 29mm; (C) 26mm.

A cada teste foi gerado um conjunto de dados de 1900 valores para cada posicionamento da massa. Na sequência, os dados foram tratados formando 190 valores que constitui os gráficos de resposta elétrica. A Tabela 4.3 apresenta resumidamente as principais informações referente a cada resposta do sinal do gerador eletromagnético em função da massa, referente a Figura 4.12 e as principais informações entre o sinal de excitação e a resposta do gerador eletromagnético, ver Figura 4.11 e Figura 4.12, onde a frequência de ressonância do gerador apresentou faixa de operação de 24 Hz à 30Hz, e a defasagem dos sinais em relação ao sinal de entrada é cerca de  $180^\circ$  correspondente à relação de defasagem do deslocamento do ímã no interior do indutor.

### 4.2.3 Caracterização do Gerador Híbrido

As caracterizações preliminares serviram serviram para confirmar que os pontos na extremidade do cristal correspondem aos pontos com maior potencial de geração do piezoelétrico e identificar as limitações da frequência em relação à configuração mecânica e a máxima amplitude da tensão produzida.

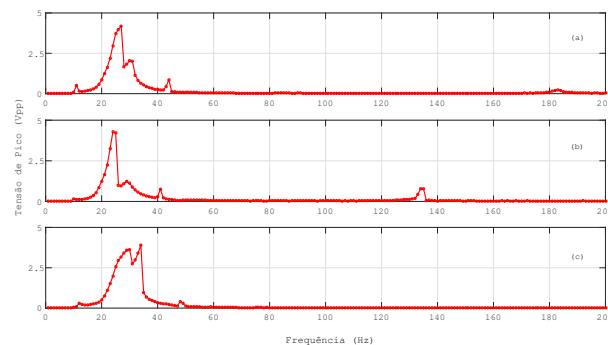


**Figura 4.12** Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição linear no gerador eletromagnético: (a) 32mm ; (b) 29mm; (c) 26mm.

**Tabela 4.3** Análise de sinais do teste de distribuição linear do gerador eletromagnético.

Posição Massa	Defasagem	Tensão	Corrente	Potência	Frequência
32mm	178,6°	4,28V	217 $\mu$ A	930 $\mu$ W	24Hz
29mm	175,8°	4,21V	214 $\mu$ A	990 $\mu$ W	27Hz
26mm	175,2°	3,65V	185 $\mu$ A	676 $\mu$ W	30Hz

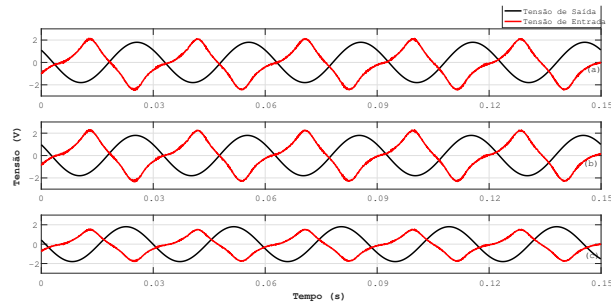
Devido ao potencial elétrico obtido nos testes dos geradores piezoelétrico e eletromagnético, foi proposto a integração dos dois métodos, a fim de buscar a maximização das características individuais, e ampliar a potência final. Introduzindo o piezoelétrico em paralelo com o indutor, e seguindo a mesma configuração apresentado na Figura 4.10 e refazendo os mesmo testes realizados com o gerador eletromagnético, foram obtidos os resultados descritos na Figura 4.13 .



**Figura 4.13** Resposta elétrica do gerador híbrido. (A) 32mm; (B) 29mm; (C) 26mm.

A Tabela 4.3 apresenta os valores obtidos a partir dos dados coletados dos testes com o gerador híbrido. Traçando um paralelo com os dados obtidos com os testes do

gerador eletromagnético, baseado na similaridade dos resultados é possível afirmar que as características do indutor se sobrepõe as características do piezoelétrico, fato que pode ser identificado na Figura 4.14, que possui os mesmo comportamento identificado nos teste do gerador eletromagnético.



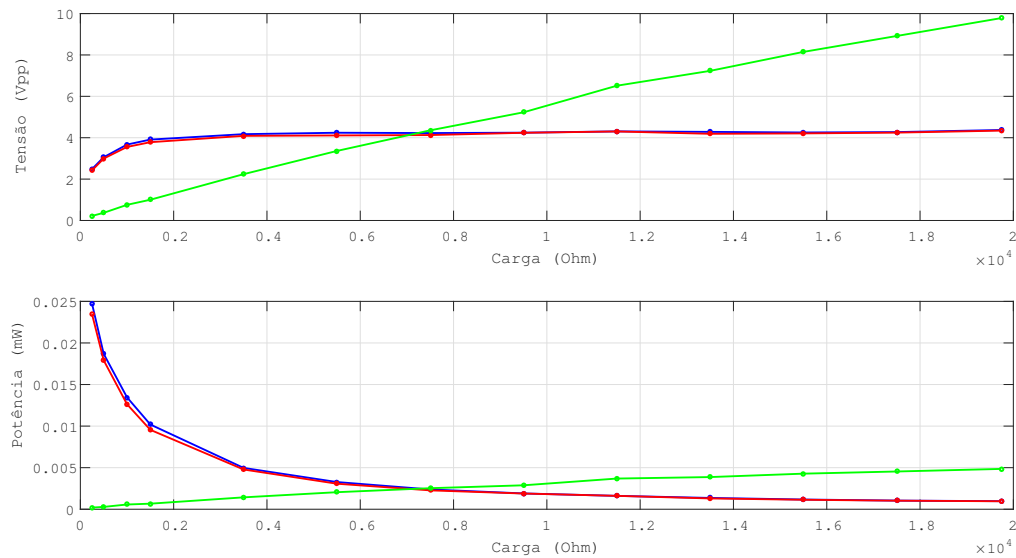
**Figura 4.14** Análise do sinal elétrico de excitação e de resposta da distribuição linear no gerador eletromagnético: (a) 32mm ; (b) 29mm; (c) 26mm.

**Tabela 4.4** Análise de sinais do teste de distribuição linear do gerador híbrido.

Posição Massa	Defasagem	Tensão	Corrente	Potência	Frequência
32mm	178,6°	4,34V	220 $\mu$ A	956 $\mu$ W	24Hz
29mm	175,8°	4,19V	212 $\mu$ A	991 $\mu$ W	27Hz
26mm	175,2°	3,63V	184 $\mu$ A	667 $\mu$ W	30Hz

Como não foram identificados melhorias nos resultados, realizou-se uma nova coleta de dados focando apenas na análise da potência produzida, dessa forma, considerando o ponto **A** da Figura 4.10 e a frequência de ressonância para esse ponto, 24Hz. Coletando as tensões de pico e variando a resistência de *shunt*, obteve-se a Tabela 4.5 e os gráficos da Figura 4.15 que descreve o comportamento da tensão e da potência em relação à carga.

A partir dos dados presentes na Tabela 4.5, foi possível identificar melhoras de até 6% no desempenho do gerador híbrido, apesar da melhoria relevante não foi possível afirmar que houve o funcionamento paralelo de ambos os geradores, que de fato apenas sugere que a baixa resistência do indutor suprimiu o funcionamento do piezoelétrico. Identificou-se ainda que quanto mais baixa for carga, melhor o desempenho do gerador híbrido, atingindo assim 24mW de potência, mostrando que mesmo o melhor dos resultados não seria suficiente para alimentar diretamente o instrumento, esse fator foi decisivo para a escolha do componente de armazenamento.



**Figura 4.15** Análise do comportamento da potência gerada.

Outro fator que foi esclarecido com o teste foi o decaimento da tensão produzida pelo gerador piezoelétrico em função da demanda de corrente, constatando que as dimensões físicas e as propriedades do cristal não garantem um potencial de geração elétrica suficientes para sozinhos alimentar o sensor.

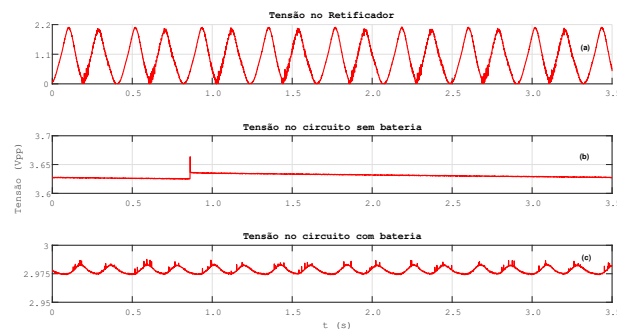
### 4.3 SISTEMA GESTOR DE CARGA

Após a caracterização do micro-gerador o sistema de gerenciamento de carga foi testado e montado (apêndice A). Os testes realizados nesse circuito teve como principal objetivo aferir o funcionamento desse dispositivo. Utilizando a frequência de ressonância de 24Hz, proveniente no posicionamento da massa no ponto **A** da Figura 4.9, e coletando a forma de onda produzida pelo micro-gerador, em três condições do circuito: ponte retificadora, circuito completo sem a bateria e circuito completo com a bateria conforme a Figura 4.16.

A Figura 4.16.a apresenta a forma de onda retificada com amplitude de 2,00V, considerando a amplitude do sinal gerado de 2,25V, identificando a queda de tensão nos diodos da ponte de retificação aproximadamente 0,25V. A curva da Figura 4.16.b exibe o decaimento da tensão até um determinado ponto (0,8 segundos), no qual a variação do comportamento descreve o chaveamento do circuito entre o capacitor de filtragem e a energia do micro-gerador. Devido a falta da bateria, o circuito mantém a tensão totalmente proveniente da fonte geradora. Diferente da Figura 4.16.c em regime de cha-

**Tabela 4.5** Valores da análise do comportamento da potência gerada

Resistência (Ohm)	Tensão (Vpp)			Potência (mW)		
	Híbrido	Eletromag.	Piezo.	Híbrido	Eletromag.	Piezo.
19740	4,37	4,34	9,78	0,969	0,956	4,85
17500	4,27	4,24	8,92	1,04	1,03	4,54
15500	4,25	4,21	8,15	1,17	1,14	4,28
13500	4,28	4,19	7,23	1,36	1,30	3,87
11500	4,31	4,30	6,51	1,61	1,61	3,69
9500	4,24	4,24	5,23	1,90	1,89	2,88
7500	4,22	4,13	4,36	2,38	2,27	2,53
5500	4,24	4,11	3,36	3,27	3,07	2,05
3500	4,17	4,09	2,24	4,97	4,78	1,43
1500	3,91	3,78	1,00	10,2	9,55	0,671
1000	3,67	3,55	0,76	13,5	12,6	0,572
500	3,06	2,99	0,37	18,7	17,9	0,275
250	2,48	2,42	0,22	24,7	23,5	0,195

**Figura 4.16** Análise do comportamento do circuito gerenciador de carga.

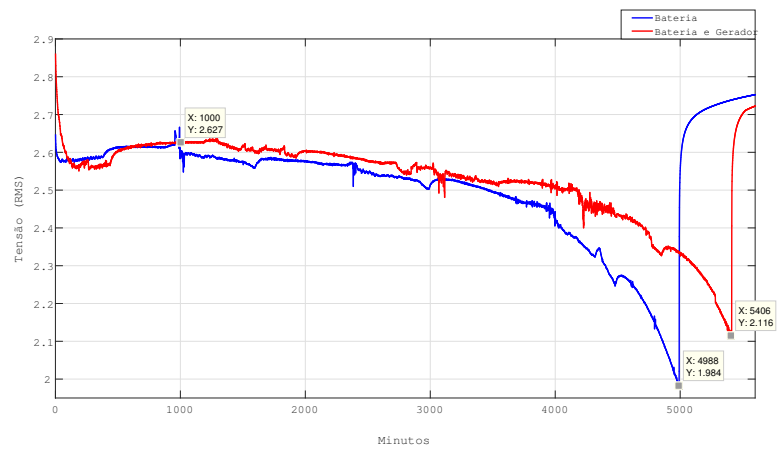
veamento entre a bateria e o sinal gerado, ocasionando no *ripple* da tensão, esse efeito também foi gerado pelo dimensionamento incorreto do capacitor de saída do estágio de condicionamento de carga, o que foi posteriormente corrigido. Apesar do *ripple*, a tensão média foi de aproximadamente 2,98V, suficiente para alimentar o sensor de vibrações. Os testes comprovaram o correto funcionamento do circuito de condicionamento uma vez que o comportamento esperado foi identificado em cada resultado, tornando o circuito apto para ser integrado ao resto do sensor.

#### 4.4 OPERAÇÃO DO SISTEMA COMPLETO

Com os testes devidamente realizados e assegurando-se o funcionamento de todas as partes do sistema separadamente, foi executado o teste final de funcionamento do dispositivo, que consistiu em conectar o sensor de vibração ao gerenciador de carga e ao gerador. Primeiramente, o sensor de vibração foi configurado para analisar continuamente a excitação aplicada pelo *shaker* com frequência de 24Hz e amplitude de 1G. Na perspectiva do monitoramento do comportamento da tensão de alimentação do circuito sensor de vibração, os dados foram coletados com a taxa de amostragem de 1 amostra/minuto (1s/min) até o sistema parar de funcionar, a segunda parte dos testes, o gerador foi desconectado, deixando apenas a bateria como fonte exclusiva de alimentação do circuito.

A Figura 4.17 ilustra o comportamento típico da tensão de alimentação do circuito nas duas condições: com o micro-gerador acoplado ao circuito e com o micro-gerador desacoplado do circuito. O teste de desempenho teve duração de quatro dias para cada uma das condições, coletando-se 5760 valores ao longo desse período. Na Figura 4.17, é possível verificar o momento de transição (1000 minutos), em que o circuito começa a regenerar parte da energia consumida e como a carga da bateria sozinha tem um decaimento mais rápido a partir desse ponto, até o circuito parar de funcionar completamente com a tensão final de 1,98V após operar por 3566 minutos, correspondendo a aproximadamente 2,5 dias. Em contrapartida o tempo de funcionamento do sensor com a bateria e o gerador foi de 5406 minutos (3,75 dias), o que representa 7,73% de melhoria em relação à alimentação exclusiva por bateria.

Esse trabalho apresenta-se promissor a concepção de um sensor de vibração sem fio auto alimentado por colheita de energia, em especial, com a integração de pelo mais de uma forma complementar de colheita de energia. Considerando esse dispositivo, um modelo para estudos de prolongamento de tempo de operação em dispositivos sem fio de baixo consumo de energia.



**Figura 4.17** Teste de desempenho do sensor de vibração.





## **CONCLUSÕES**

### **5.1 CONTRIBUIÇÕES**

Nesse trabalho desenvolveu-se um protótipo de um sensor de vibração autoalimentado. As propriedades mecânicas e elétricas do sistema de geração de energia foram examinadas, destacando-se a relação do posicionamento da massa com a frequência de ressonância e geração de energia, do comportamento do gerador híbrido em relação à carga, do sistema de gerenciamento de energia e do desempenho do sensor.

Uma plataforma experimental foi desenvolvido para caracterizar as propriedades mecânicas e elétricas do micro-gerador, assim como o desempenho do sensor e gerenciador de carga. Foi também criado um sistema de aquisição de dados utilizando o LabView e os módulos do DACX para integrar a plataforma experimental, gerando o sinal de excitação do sistema e coletando os sinais elétricos provenientes da resposta do sistema de geração. A caracterização do gerador piezoelétrico certificou que a cápsula piezoelétrica poderia ser utilizada para a geração de energia e ainda ser reutilizada para a concepção do gerador eletromagnético como elemento flexível. Dessa forma, a concepção do gerador híbrido foi demonstrado e adicionalmente apresentou um melhoria de 6% em relação ao gerador eletromagnético. Os resultados também demonstraram que o gerador híbrido foi capaz de alimentar o sensor durante a máxima produção de energia, ou seja, na frequência de ressonância do transdutor.

Este trabalho demonstrou que o sensor de vibração autoalimentado funciona dentro dos limites de frequência e em ambiente controlado. Também foi provado que é possível utilizar a vibração para regenerar ou até mesmo alimentar dispositivos microeletrônicos

de baixo consumo. Os resultados obtidos indicam que o desempenho final do micro-gerador híbrido foi de aproximadamente 8% melhor, garantido ao sistema uma sobrevivência de 10 horas a mais que o sistema alimentado apenas pela bateria.

Ainda como dos estudos do comportamento de cápsulas piezoelétricas de baixo custo para geração de energia, produziu o artigo científico *Piezoelectric Micro-generator Characterization for Energy Harvesting Application* publicado na revista *World Academy of Science, Engineering and Technology*.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Estas sugestões tem por objetivo dar prosseguimento ao estudo sobre *Energy Harvesting* e sensores de vibração. Os principais trabalhos identificados para continuação da pesquisa são:

- Testes de desempenho envolvendo o modo de operação periódico do sensor a fim de verificar o desempenho do micro-gerador;
- A implementação de mais unidades de micro-geradores em conjunto para avaliar o rendimento total;
- Utilização de outros tipos de piezoelétricos com maior capacidade de geração;
- Testes do instrumento autoalimentado acoplados a compressores, motores elétricos e motores à combustão.
- Modelagem matemática dos geradores, com o objetivo de viabilizar a compreensão dos fenômenos que ocorrem no processo de geração de energia.

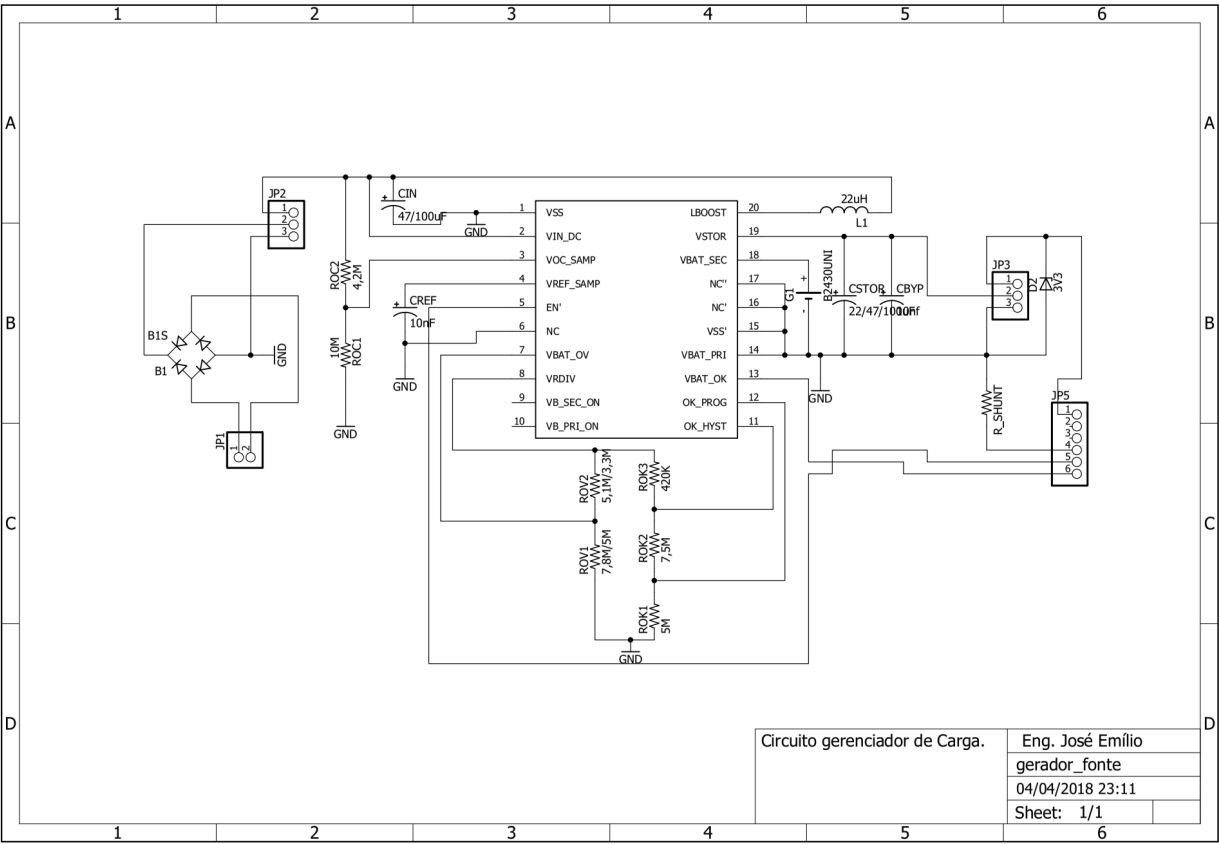
Na área de instrumentação, propõe-se alguns trabalhos a serem desenvolvidos:

- Otimizar o algoritmo do sensor para melhorar a eficiência do dispositivo;
- Desenvolver mais sensores sem fio para compor uma rede de sensores;
- Desenvolver um protocolo de comunicação para utilizar na rede de sensores, voltado para otimização do consumo de energia.

# Apêndice

# A

## ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE GERENCIAMENTO DE CARGA

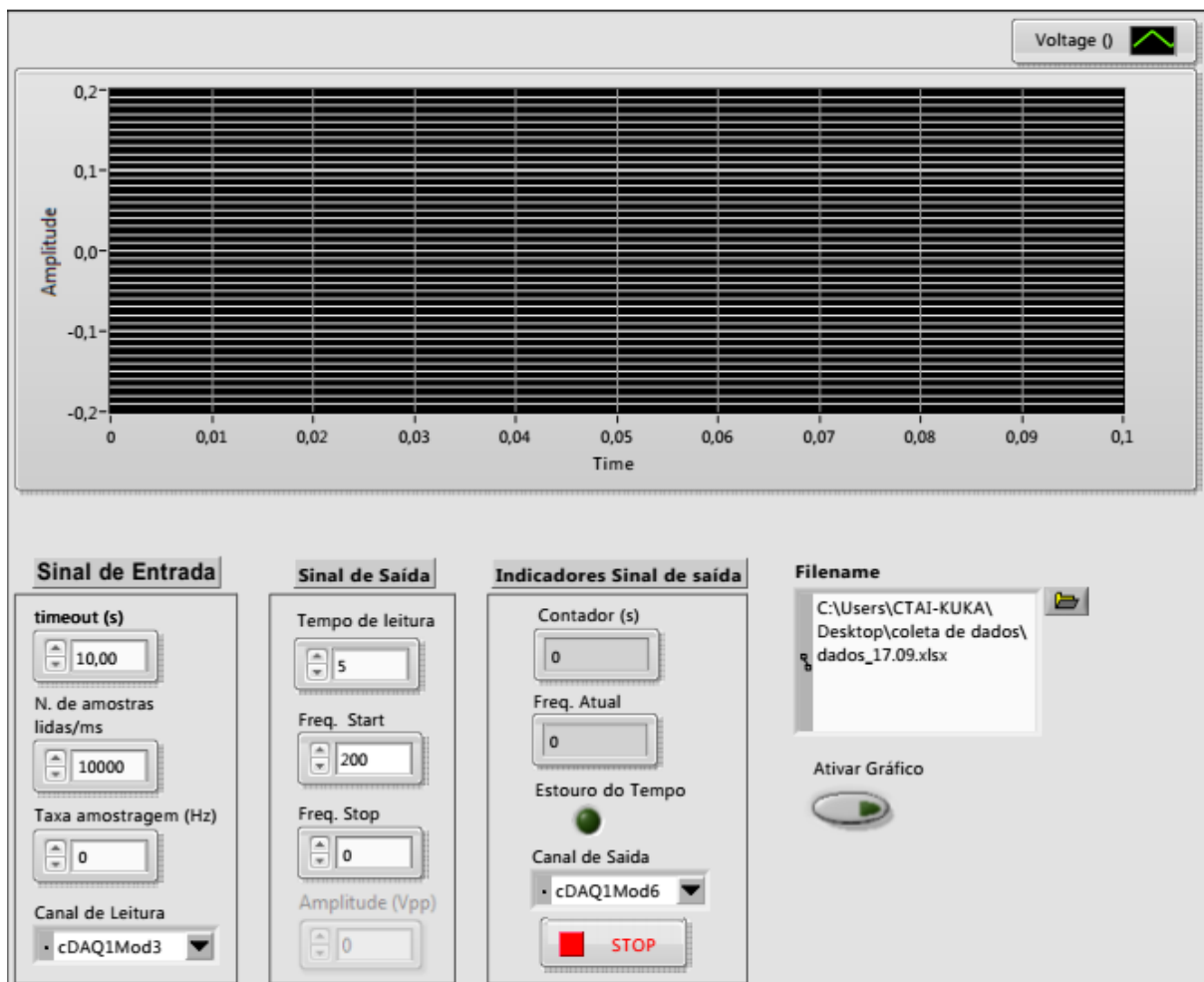




## Apêndice

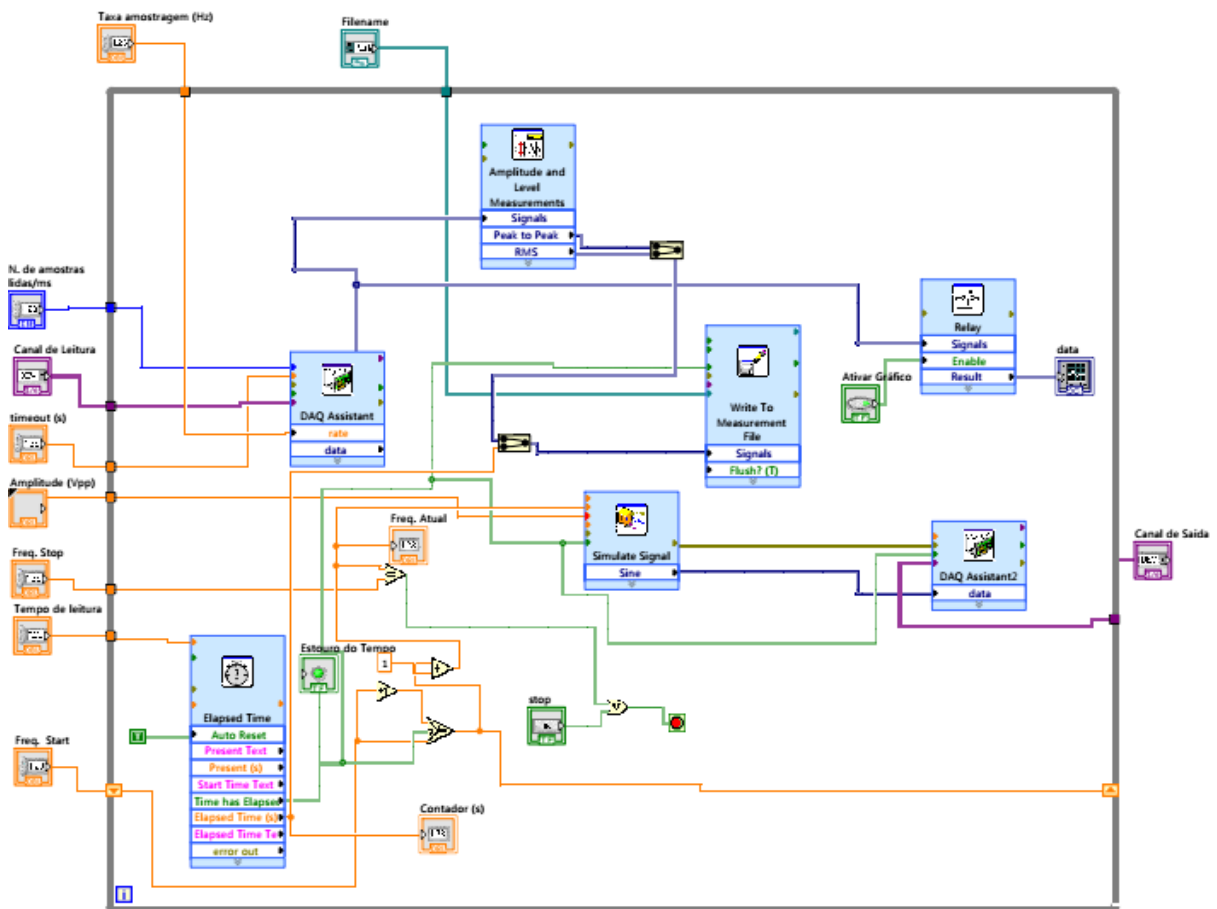
# B

## SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS





# CÓDIGO FONTE DO SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS







## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- STARNER, T; PARADISO, J. A. Human Generated Power for Mobile Electronics. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2004. Cap. 45, p. 1-35.
- BRODD, R. et al. Batteries, 1977 to 2002. Journal of The Electrochemical Society, v. 151, p. K1-K11, janeiro 2004.
- PARADISO, J. A.; STARNER, T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. IEEE Pervasive Computing, v. 4, p. 18-27, março 2005.
- MILANI, D. et al. Design of a Wireless Sensor Powered by a Piezoelectric Energy Harvester. ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Copenhagen, Denmark: ASME. 2014.
- TORAH, R. et al. Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting. IOP Science: Measurement Science and Technology, v. 19, n. 12, outubro 2008.
- LIU, H. et al. Study of a Hybrid Generator Based on Triboelectric and Electromagnetic Mechanisms. IEEE Sensors Journal, v. 17, n. 12, p. 3853-3860, Junho 2017.
- MOORE, G. E. Cramming more componenets onto integrated circuits. Electronisc Magazine, v. 38, n. 8, Abril 1965.
- NITTA, N. et al. Li-ion battery materials: Present and future. Materials Today, v. 18, p. 252-264, Junho 2015.
- DUBAL, D. P. et al. Hybrid energy storage: the merging of battery and supercapacitor chemistries. Chemical Society Reviews, v. 44, p. 1777-1790, Julho 2015.
- HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. Renewable Energy, v. 36, p. 2641-2654, Julho 2011.
- Williams, C. B.; Yates, R. B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. Sensors and Actuators A: Physical, v. 52, p. 8-11, 1996.

KYMISSIS, J. et al. Parasitic Power Harvesting in Shoes. Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers, Pittsburgh, 19-20 outubro 1998. 132-139.

GLYNNE-JONES, P.; BEEBY, S.P.; WHITE, N.M. Towards a piezoelectric vibration powered microgenerator. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, v. 148, p. 68, 2001.

ROUNDY, Shad; WRIGHT, Paul K.; RABAEY, Jan. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. Computer Communications, v. 26, p.1131-1144, 2003.

GLYNNE-JONES, P. et al. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. Sensors and Actuators A: Physical, v. 110, p. 344-349, setembro 2003.

ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. Smart Materials and Structures, v. 13, p. 1131-1142, junho 2004.

DISCENZO, F. M.; CHUNG, D.; LOPARO, K. A. Pump Condition Monitoring Using Self-Powered Wireless Sensors. Sound and Vibration, Cleveland, v. 40, n. 5, p. 12-15, maio 2006.

HADAS, Z. et al. Electromagnetic Vibration Power Generator. 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Cracow, Poland, 6-8 Setembro 2007. 451-455.

PEKOSLAWASKI, B.; KRASINSKI, P.; NAPIERALSKI, A. Power processing circuits for wireless sensor nodes utilizing energy harvested from mechanical vibrations. Proceedings of the 18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2011. Gliwice, Poland: IEEE. 2011. p. 632-637.

CHEN, X.-R. et al. Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm. Ceramics International, v. 38, p. 271-S274, 2012.

KHAMENEIFAR, F.; ARZANPOUR, S.; MOALLEM,. A Piezoelectric Energy Harvester for Rotary Motion Applications: Design and Experiments. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, v. 18, p. 1527-1534, 2013.

YANG, J. et al. Design and analysis of a 2D broadband vibration energy harvester for wireless sensors. Sensors and Actuators A: Physical, v. 205, p. 47-52, 2014.

PAYNE, O. R. et al. Implementation of a robust hybrid rotary-translational vibration energy harvester for autonomous self-powered acceleration measurement. SPIE, p. 9431, 2015.

SHASHI, K. et al. Modeling, simulation and analysis of piezoelectric energy harvester for wireless sensors. 2015 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), Cambridge, 2015. 63-69.

OSTASEVICIUS, V. et al. Cutting tool vibration energy harvesting for wireless sensors applications. Sensors and Actuators A: Physical, v. 233, p. 310-318, 2015.

SANTOS, A. F. M. et al. Aplicação de acelerômetros de baixo custo em sistemas automatizados de medição. POSMEC, p. 1-4, 2012.

YOUNG, J. C. Vibration analysis using a mems accelerometer. 2006. 61f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Naval Postgraduate School: Monterey, California.

LAUMANN, F. et al. Energy harvesting through piezoelectricity - technology foresight. Energy Procedia, Cardiff, 21-24 Agosto 2017. 3062-3068.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. Introdução ao Magnetismo dos Materiais. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2005.

MCCONNEL, K. G. Vibration Testing: Theory and Practice. New York: Wiley-Interscience, 1995.

CALLISTER JR, W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MITCHELL, J.S. From vibration measurements to condition based maintenance: seventy years of continuous progress. Sound and Vibration, 62-78, 2007.

GALLEGO, J.; Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers, J. Phys. E: Sci. Instrum., 22 804-816 1989.

BERNARD, J.; PIEZOELECTRIC CERAMICS, ACADEMIC PRESS, New York, 1971.

UCHINO. K.; Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology. 2. ed. Woodhead Publishing, 2017

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. e WALKER, J. Fundamentos de Física 3: Eletromagnetismo. 9. ed. LTC, 2012.

KRAUS, J. D.; CARVER. K. R. Electromagnetics. 2. ed. McGRAW-HILL KOGAKUSHA: London, 1973.

GÓMEZ, E. S. Piezoelectric Ceramics. IntechOpen. 2010.

TAKAHARA. K.; OHSAKI, S.; OHYAMA, K.; KAWAGUCHI, H. e ITOH, Y. Electric Power Acquisition from the Vibration of an Electric Vehicle Using a Permanent Magnetic Linear Power Generator, Journal of Asian Electric Vehicles. 3. ed, 2005.

Rajarithnam M.; Ali SF. Energy generation in a hybrid harvester under harmonic excitation. Energy Convers Manage 2018;155:10–9.

Wang et al. A frequency and bandwidth tunable piezoelectric vibration energy harvester using multiple nonlinear techniques. Appl Energy 2017;190:368–75

Sari, I.; Balkan, T.; Kulah, H. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations. Sens Actuator A: Phys 2008;145–146:405–13.

Mann, B.P.; Sims, N.D. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. J Sound Vib 2009;319:515–30.

Shan, X.; Xu, Z.; Song, R.; Xie, T. A new mathematical model for a piezoelectric-electromagnetic hybrid energy harvester. Ferroelectrics 2013;450:57–65.

Toyabur, R.M.;Salaudinn, M.; Cho, H.; Park, J.Y.A multimodal hybrid energy harvester based on piezoelectricelectromagnetic mechanisms for low-frequency ambient vibrations. Elsevier: Energy Conversion and Management, 2018;Ed. 168, 454–466.

Tadesse, Y.; Zhang, S.; Priya, S. Multimodal energy harvesting system: piezoelectric and electromagnetic. J Intell Mater Syst Struct 2009;20:625–32.

Souza, J.E.Q.; Fontana, M.; Lima, A.C.C. Piezoelectric Micro-generator Characterization for Energy Harvesting Application. World Academy of Science, Engineering and Technology: WASET 2018; vol. 12:8