



UFSM

Dissertação de Mestrado
SISTEMA PARA APROVEITAMENTO DE
ENERGIA VIBRACIONAL BASEADO EM
TRANSDUTORES ACÚSTICOS
PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO

Adilson Jair Cardoso

PPGEE

Santa Maria, RS, Brasil.

2006

**SISTEMA PARA APROVEITAMENTO DE ENERGIA
VIBRACIONAL BASEADOS EM TRANSDUTORES
ACÚSTICOS PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO**

Adilson Jair Cardoso

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Área de concentração em Processamento de Energia, da Universidade
Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

Cesar Ramos Rodrigues

Santa Maria, RS, Brasil.

2006

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

A comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**SISTEMA PARA APROVEITAMENTO DE ENERGIA VIBRACIONAL BASEADO
EM TRANSDUTORES ACÚSTICOS PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO**

elaborada por
Adilson Jair Cardoso

como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Cesar Ramos Rodrigues
(Presidente/Orientador)

Carlos Henrique Figueiredo Alves

Giovani Baratto

João Baptista Martins (Suplente)

Santa Maria, 20 de fevereiro de 2006

© 2006

Todos os direitos autorais reservados a Adilson Jair Cardoso. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Rincão dos Minellos, 3300 Itaara – RS, 97.090-000.

Fone: (0xx) 55 9106.8179; End. Eletrônico.: adilson@mail.ufsm.br

**Dedico esta dissertação aos meus pais e a
minha esposa Viviana, pelo apoio durante sua
realização.**

AGRADECIMENTOS

O trabalho descrito nesta dissertação foi desenvolvido no Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e nas dependências do Grupo de Microeletrônica. O autor é grato aos servidores responsáveis por estes setores pelo auxílio administrativo e técnico.

Aos professores e colegas do curso, o reconhecimento por todo o apoio, críticas e sugestões que contribuíram para o enriquecimento deste trabalho.

O autor é muito grato ao amigo e professor Doutor Cesar Ramos Rodrigues, pela idéia original do trabalho, pelo respeito, seriedade e paciência com que orientou as atividades ao longo do curso e ao Dr. João Baptista dos Santos Martins pelo apoio oferecido desde o início desta pesquisa.

À Mentor Graphics Corporation pela disponibilização de licenças das ferramentas de projeto de circuitos integrados a custos reduzidos através de seu programa universitário.

À MOSIS pelo excepcional apoio na fabricação do CI.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

SISTEMA PARA APROVEITAMENTO DE ENERGIA VIBRACIONAL BASEADOS EM TRANSDUTORES ACÚSTICOS PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO

AUTOR: ADILSON JAIR CARDOSO
ORIENTADOR: PROF. CESAR RAMOS RODRIGUES, DR.
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 20 de fevereiro de 2006.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um sistema para converter energia mecânica de vibrações em energia elétrica. A conversão é realizada através de um transdutor de baixo custo comumente chamado de *buzzer*. O principal objetivo deste sistema é carregar ou estender o tempo entre cargas de baterias recarregáveis de até 2 V. Para o controle do processo de carga, um processador de energia integrado também foi desenvolvido. O projeto do processador de energia é apresentado segundo especificações como definição de topologia, simulação elétrica, layout, extração elétrica do circuito através do layout e a simulação final incluindo os efeitos do layout.

A principal contribuição desta dissertação é mostrar como muita energia poderia ser obtida de vibrações com um transdutor de baixo custo, comparando sua performance a outros microgeradores.

O sistema final implementado é muito simples, composto por um microgerador (*buzzer* com uma esfera de aço colada no centro) e um circuito integrado que controla a carga da bateria, através da monitoração da tensão da mesma.

Uma eficiência de 55% é esperada, sendo comparável com os resultados obtidos por outros pesquisadores.

Palavras Chave: Microgeradores, piezelétricos, piezeletricidade, cerâmicas piezelétricas.

ABSTRACT

Master Dissertation
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

SISTEMA PARA APROVEITAMENTO DE ENERGIA VIBRACIONAL BASEADOS EM TRANSDUTORES ACÚSTICOS PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO

MICROGENERATION BASED ON A LOW-COST PIEZOELECTRIC ACOUSTIC TRANSDUCER

AUTHOR: ADILSON JAIR CARDOSO
SUPERVISOR: PROF. CESAR RAMOS RODRIGUES, DR.
Date and Local: February, 20th of 2006, Santa Maria.

This dissertation presents the development of a system for converting the mechanical energy from vibrations into electrical energy. The conversion is performed in a low-cost piezoelectric transducer, commonly known as buzzer. The main purpose of this system is to charge, or to extend the time between charges, of chargeable batteries up to 2V. In order to control the charging process, an integrated energy processor was also designed. Processor design is presented from its specification, followed by circuit topology definition, electric simulation, layout, extraction of circuit from layout and a final simulation including layout effects.

The main contribution of the investigation is to show how much energy could be obtained from vibrations with a low-cost transducer, comparing its performance to “full custom” generators.

The final system implementation is very simple, composed by a generator (a buzzer with a steel ball glued onto its center) and an integrated circuit that controls the charge delivered to the battery, sensing the voltage across its terminals. An efficiency of 55% is expected, being comparable to results published by other researchers.

Keywords: Microgenerators, piezoelectrics, piezoelectricity, piezoceramics.

PRODUÇÃO CIENTÍFICA

CARDOSO, A. J.; RODRIGUES, C. R.; VIEIRA, F. C. B. **A CMOS Processor for Energy Scavenging using Piezoelectric Generators.** Artigo Publicado XX SIM - South Symposium on Microelectronics, 2005. pp. 85.

CARDOSO, A. J.; RODRIGUES, C. R.; VIEIRA, F. C. B. **Microgeneration based on a Low-Cost Piezoelectric Acoustic Transducer.** Artigo aprovado e a ser publicado INDUSCON 2006.

CARDOSO, A. J.; RODRIGUES, C. R.; VIEIRA, F. C. B. **Microgeneration based on a Low-Cost Piezoelectric Acoustic Transducer.** Artigo aprovado e a ser publicado IBERCHIP 2006.

MARTINS, J. B.; CARDOSO, A. J.; GUISSONI, S.; MANRIQUE, R.; OLIVEIRA, L. L.; DEBESSER, G.; PACHECO, M. **Implementation of na Access Control System using Reconfigurable Architecture** – artigo publicado XX SIM - South Symposium on Microelectronics, 2005. pp.145.

Lista de Tabelas

Tabela 1.1: Densidade de energia e potência para diversas fontes	21
Tabela 1.2. Potência requerida para várias funções orgânicas	22
Tabela 1.3. Comparação entre os métodos de conversão de energia vibracional em eletricidade	23
Tabela 1.4. Relação de projetos segundo aplicação	32
Tabela 3.1. Características do unimorfo utilizado na pesquisa	62
Tabela 3.2. Características dimensionais de unimorfos disponíveis no mercado	64
Tabela 3.3. Comparação das frequências de ressonâncias calculadas com a eq.2.27 com as especificações dos fabricantes	64
Tabela 3.4. Comparação de valores de tensão medida e gerada	68
Tabela 3.5. Valores de Eficiência para geradores piezelétricos	78
Tabela 5.1. Comparação de valores de eficiência do sistema completo	93

Lista de Figuras

Figura 1.1. Velocidade de inovação de dispositivos	19
Figura 1.2. Comparação de sistemas acumuladores de energia	19
Figura 1.3. Geradores propostos por Kymissis	24
Figura 1.4. Capacitor variável com MEMS proposto por Meninger	24
Figura 1.5. Imagem obtida em microscopia eletrônica de um capacitor variável com MEMS	26
Figura 1.6. Gerador em cantilever proposto por Roundy	27
Figura 1.7. a) Ressonadores Helmholtz e b) buzzer piezelétrico	28
Figura 1.8. Simulações para um captador piezelétrico	31
Figura 1.9. Conjunto gerador piezelétrico	33
Figura 1.10. Ponto de operação do controle Ottman	34
Figura 1.11. Exemplo de onda retificada	34
Figura 1.12. Topologia proposta por Kasyap	35
Figura 1.13. Conversor proposto por Meninger	36
Figura 1.14. Microgeração proposto por Kymissis	36
Figura 1.15. Funcionamento do circuito proposto por Richards	37
Figura 1.16. Ponte Bridge_H do conversor proposto por Richards	38
Figura 2.1. Geração de Energia Elétrica em função da pressão P.	41
Figura 2.2. Principais efeitos piezelétricos. Efeito longitudinal (a) e transversal (b).	41
Figura 2.3. Relação entre números sobrescritos, subscritos e eixos coordenados	43
Figura 2.4. Gerador desenvolvido	47
Figura 2.5. Modelo do PZT para baixas frequências	47
Figura 2.6. Deformação de uma <i>buzzer</i> devido a uma força mecânica	48
Figura 2.7. Transformação para a seção transversal equivalente do gerador	49
Figura 2.8. Divisor de tensão na saída	51
Figura 2.9. Modos de vibração simulados no ANSYS	53
Figura 2.10. Deflexão do Buzzer no modo 1	54
Figura 3.1. Conjunto gerador piezelétrico	60
Figura 3.2. Esq. sistema de testes e Fotografia do sist. de teste do gerador	61

Figura 3.3 b. Detalhe do gerador com o acelerômetro acoplado	62
Figura 3.4. Resposta do gerador a um impulso de força	66
Figura 3.5. Tensão de circuito aberto em função da frequência	67
Figura 3.6. Esquema para medição da impedância capacitiva	69
Figura 3.7. Tensão gerada versus frequência aplicada	70
Figura 3.8. Potência Elétrica RMS Medida gerada versus frequência aplicada	71
Figura 3.9. Massa Limite versus aceleração	72
Figura 3.10. Deflexão versus frequência	73
Figura 3.11. Movimento da massa e deflexão do PZT	74
Figura 3.12. Velocidade do sistema versus frequência aplicada.	75
Figura 3.13. Energias em função da frequência	75
Figura 3.14. Eficiência versus frequência	76
Figura 3.15. Impedância da <i>buzzer</i> como função da frequência	77
Figura 3.16. Modelo elétrico completo do PZT	79
Figura 4.1. Topologia estudada inicialmente	81
Figura 4.2. Figura 4.2. Formas de onda do PZT e indutor da figura 4.1	81
Figura 4.3. Ponte Bridge_H	82
Figura 4.4. Figura 4.4. forma de onda retificada do microgerador	83
Figura 4.5. Bloco geral do Circuito Controlador de Carga.	84
Figura 4.6. Caminho da corrente da ponte Bridge_H	85
Figura 4.7. Bridge_L	86
Figura 4.8 Bridge_L Drive	87
Figura 4.9. Bloco Controlador de Carga	87
Figura 4.10 Diagrama da Chave Analógica	88
Figura 5.1. Formas de onda simuladas da carga da bateria	89
Figura 5.2. Formas de onda da ponte retificadora Bridge_H	90
Figura 5.3. Atividade de chaveamento	91
Figura 5.4. Comparador do controle de carga e Sinais de saída dos quatro estágios do comparador	92
Figura 5.5. Layout final do controlador de carga	95
Figura 5.6. Diagrama das ligações dos pinos do controlador de carga	96

ANEXOS

ANEXO I – Arquivo de tecnologia AMI 0.5 μm	103
ANEXO II – Técnicas de layout	107
ANEXO III – Termos e símbolos utilizados	111
ANEXO IV – Arquivo extração do layout	113
ANEXO V – Projeto do <i>Shaker</i>	122

Sumário

CAPÍTULO 1	16
1.1 ORGANIZAÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO:	17
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.3.1 Sistemas de alimentação para circuitos eletrônicos autônomos	18
1.3.2 <i>Microgeração a partir da energia vibracional</i>	23
1.3.3 <i>Microgeradores piezelétricos</i>	29
1.3.4 <i>Condicionamento de energia</i>	33
CAPÍTULO 2 – GERADOR PIEZELÉTRICO	40
2.1. INTRODUÇÃO	40
2.2 PIEZELETRICIDADE	40
2.2.1 <i>Efeito Gerador Elétrico</i>	41
2.2.2 <i>Materiais piezelétricos:</i>	41
2.2.3 <i>O efeito piezelétrico na geração de energia:</i>	43
2.2.4 <i>Perda das propriedades piezelétricas</i>	45
2.3. MODELO DO GERADOR PIEZELÉTRICO	46
2.3.1. <i>A Tensão gerada: V_o:</i>	48
2.3.2. <i>Potência Elétrica de Saída:</i>	51
2.3.3. <i>Frequência de Ressonância:</i>	52
2.3.4. <i>Estimativa da Eficiência do gerador:</i>	56
CAPÍTULO 3 – GERADOR PIEZELÉTRICO : RESULTADOS	60
3.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS:	60
3.2. <i>Resultados Experimentais do Gerador Piezelétrico:</i>	63
3.2.1. <i>Determinação das frequências de ressonâncias:</i>	63
3.2.2. <i>Tensão Elétrica Gerada:</i>	65
3.2.3. <i>Cálculo do Capacitor C_o e da Impedância Capacitiva:</i>	68
3.2.4. <i>Estimativa da Potência Elétrica Gerada</i>	69
3.2.5. <i>Tensão de Saída</i>	70
3.2.6. <i>Potência Gerada</i>	71
3.2.7. <i>Constante de Mola:</i>	71

3.2.8. Cálculo da Massa Acoplada:.....	72
3.2.9. Eficiência do Gerador.....	73
3.2.10. Efeito do aumento da frequência no gerador:.....	79
CAPÍTULO 4 – CIRCUITO CONTROLADOR DE CARGA.....	80
4.1. INTRODUÇÃO:.....	80
4.2. TOPOLOGIA E FUNCIONAMENTO:.....	84
4.2.1. Bloco Principal.....	84
4.2.2. Retificação	85
4.2.3. Bloco Controlador de Carga:.....	87
CAPÍTULO 5 – PROJETO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	89
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	97
6.1. CONCLUSÕES.....	97
6.2 CONTRIBUIÇÕES:.....	98
6.3. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DO TRABALHO	98
CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXO I – SEÇÃO 5.....	103
ANEXO II– SEÇÃO 5.....	107
ANEXO III – SEÇÕES 1,2,3 E 4	111
ANEXO IV– SEÇÃO 4	113
ANEXO V– SEÇÃO 3	122

INTRODUÇÃO

1.1 Organização

O capítulo 1 enfoca o problema da produção de energia para sistemas eletrônicos energeticamente autônomos e as alternativas em estudo. Uma revisão bibliográfica é apresentada de forma evolutiva, conduzindo a linha de raciocínio da apresentação e comparação entre os diversos métodos adequados à produção de energia elétrica para a alimentação de sistemas eletrônicos energeticamente autônomos até a escolha dos geradores piezelétricos como tema de estudo, e a apresentação de suas principais características. Complementando a etapa da geração de energia, são discutidas as topologias de conversores eletrônicos adequadas ao condicionamento da energia para o seu conseqüente armazenamento em baterias. As principais contribuições desta dissertação são destacadas e os objetivos deste trabalho também são apresentados neste capítulo.

O capítulo 2 apresenta uma base qualitativa e analítica, embora simplificada, sobre o fenômeno da piezeletricidade, contextualizada ao projeto do gerador e os resultados obtidos serão apresentados no capítulo 3

Os capítulos 4 e 5 apresentam o princípio de funcionamento de energia, análise, projeto e os resultados obtidos para condicionador de energia.

O Capítulo 6 traz um resumo das principais conclusões e contribuições desta dissertação, onde também são sugeridos possíveis tópicos de interesse para a continuidade deste trabalho.

1.2 Objetivos desta dissertação:

- 1) Estudar o fenômeno da piezeletricidade com ênfase em geração de energia elétrica;
- 2) Desenvolver um microgerador que, através de cerâmica piezelétrica, possibilite a carga de uma bateria recarregável apresentando os resultados de laboratório e simulados,
- 3) Desenvolver um circuito integrado que possibilite o condicionamento da energia elétrica gerada a uma bateria recarregável de até 2 V,
- 4) Apresentar os dados de simulação elétrica do referido circuito e todo o conjunto, bem como apresentar o layout do circuito integrado.

1.3 Revisão Bibliográfica

1.3.1 Sistemas de alimentação para circuitos eletrônicos autônomos

Depois que Alessandro Volta inventou a bateria em 1799, antecedendo em 32 anos o dínamo de Michael Faraday, as baterias vêm sendo a primeira fonte prática de eletricidade. Por volta de 1800, o cabeamento elétrico das cidades impeliu as baterias para aplicações móveis. Em torno de 1900, com a invenção do tubo eletrônico de vácuo, pessoas que iam a piqueniques como exemplo, carregavam rádios portáteis enormes em função do tamanho das baterias.

O avanço da eletrônica vem propiciando o desenvolvimento de equipamentos cada vez menores com decrescente consumo de potência. A figura 1.1 (Staner,1984) ilustra a evolução tecnológica de alguns parâmetros referenciais das tecnologias de sistemas computacionais em comparação com a evolução da capacidade de armazenamento das baterias. Observa-se que embora as baterias tenham viabilizado a expansão dos sistemas eletrônicos portáteis, atualmente, por conta de sua taxa de evolução inferior aos demais referenciais de performance dos sistemas, elas vêm se constituindo em um fator de limitação desta evolução. A partir dessa constatação resultou um esforço para o desenvolvimento de novas tecnologias de baterias e de outras opções para a alimentação dos sistemas eletrônicos portáteis, como por exemplo, a fabricação de micro células de combustíveis (ver ANEXO II) para viabilizar aplicações como as rede de sensores remotos ¹(*sensor network, smart dust*) (Paradiso,2005).

¹ O termo rede de sensores remotos designa uma rede de informações onde cada elemento é constituído de um ou mais sensor, alimentação e de transmissores sem fio. Os elementos geralmente possuem: baixo custo, baixo consumo capacidade reduzida de processamento e executam protocolos simples. A tolerância a falhas é obtida com a redundância no número de elementos e na diversidade de rotas para a troca de informações, passadas de elemento para elemento.

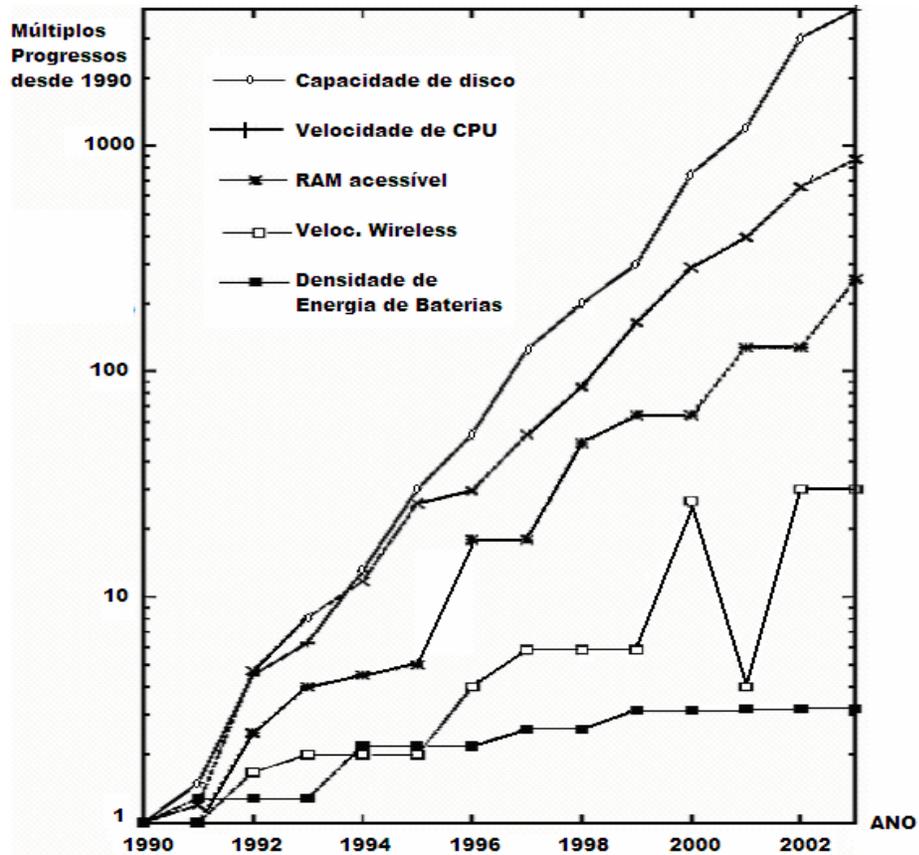


Figura 1.1. Evolução dos referenciais de performance de sistemas eletrônicos computacionais (Paradiso,2005).

Sistemas fixos de energia, como baterias e células de combustíveis dificultam a expansão de redes de sensores remotas, porque as aplicações e ambientes em que estão inseridas complicam a recarga e manutenção de baterias.

A figura 1.2 mostra uma comparação da potência versus a vida útil de alguns sistemas de armazenamento e geração de energia (Otis,2005):

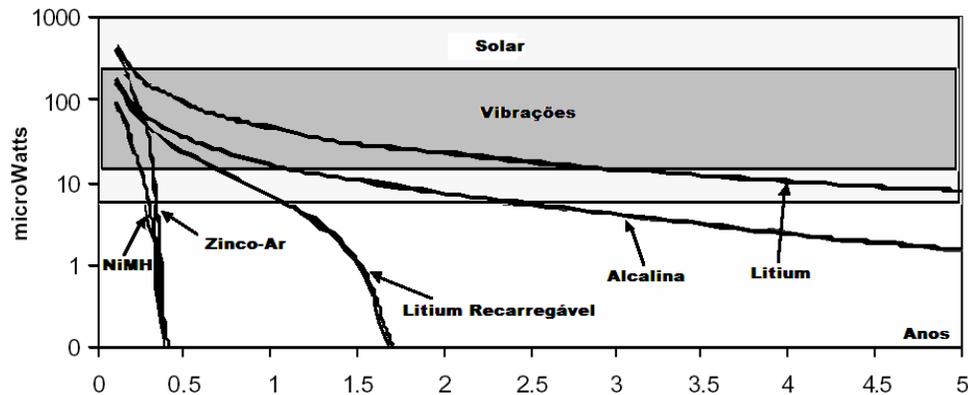


Figura 1.2. Comparação de sistemas acumuladores de energia (Otis,2005)

Nesta figura o limite superior da fonte de energia solar, está relacionado à radiação do meio-dia, enquanto o limite inferior representa a exposição à luz dentro de um escritório. O limite superior da energia vibracional caracteriza as vibrações captadas em tubulações de uma construção e a parte inferior corresponde às pequenas vibrações presentes em uma casa. Esta figura mostra que para aplicações com vida útil superior a um ano, sistemas de micro-conversão de energias solar e vibracional são as melhores opções.

Outro exemplo significativo de aplicação potencial para os sistemas de micro-conversão de energia são os dispositivos de marca-passos cardíacos implantáveis. Sua utilização requer intervenções cirúrgicas periódicas, aproximadamente a cada cinco anos, para substituição da bateria. Se um sistema alternativo de recarga da bateria fosse desenvolvido, este tempo poderia ser prolongado e o número de intervenções, durante a vida do usuário, seria reduzido. Entre outras aplicações para os sistemas de micro-conversão de energia poderíamos citar a alimentação de circuitos para monitoramento remoto de pontes, barragens, máquinas industriais, animais e florestas; alimentação de equipamentos portáteis, etc. As possibilidades de aplicação dos sistemas alternativos de energia elétrica são muito grandes. Existem atualmente centenas empresas e institutos de pesquisa, e milhões de dólares sendo aplicados em pesquisas nesta área (Krikke,2005). Um exemplo relevante da importância dos sistemas de micro-aproveitamento de energia foi desenvolvido pela Nasps Systems da Finlândia, que produziu refrigeradores alimentados por baterias solares permitindo o transporte de vacinas em regiões áridas, utilizando-se de camelos, beneficiando milhares de pessoas em comunidades remotas na África Central (Krikke,2005).

As alternativas de fontes primárias utilizáveis devem ser estudadas caso a caso, considerando-se as características da aplicação e disponibilidade. A tabela 1.1 mostra algumas destas fontes e suas características (Otis,2005):

Tabela 1.1: Densidade de energia e potência para diversas fontes (Otis,2005):

Fonte de Energia	Potência $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Energia Joules/ cm^3	Potência $\mu\text{W}/\text{cm}^3/$ ano	Necessidade de armazena- mento secundário?	Regulação de tensão?	Comercial- mente Avaliável?
Bateria Primária	N/A	2,880	90	Não	Não	Sim
Bateria Secundária	N/A	1,080	34	N/A	Não	Sim
Micro célula de combustível	N/A	3,500	100	Provável	Provável	Não
Ultracapacitor	N/A	50-100	1.6-3.2	Não	Sim	Sim
Máquina a calor	1×10^6	3,346	106	Sim	Sim	Não
Radiatividade(^{63}Ni)	0,52	1,640	0.52	Sim	Sim	No
Solar(na rua)	15.000^A	N/A	N/A	Usualmente	Provável	Sim
Solar(interior)	10^A	N/A	N/A	Usualmente	Provável	Sim
Temperatura	40^B	N/A	N/A	Usualmente	Provável	Sol
Energia Humana	300	N/A	N/A	Sim	Sim	Não
Fluxo de vento	380^C	N/A	N/A	Sim	Sim	Não
Variação de pressão	17^D	N/A	N/A	Sim	Sim	Não
Vibrações	375	N/A	N/A	Sim	Sim	Não

A: Medido em potência por centímetro quadrado,.

B: Demonstrado de uma diferença de temperatura de 5°C .

C: Assumido velocidade do ar de 5m/s e uma eficiência de conversão de 5% .

D: Baseado em volume fechado de 1cm^3 de hélio passando por uma troca de 10°C uma vez ao dia.

Esta tabela apresenta, de forma comparativa, os dados disponíveis sobre as diversas alternativas para a alimentação de sistemas.

A energia gerada como resultado das diversas atividades do ser humano pode ser uma interessante fonte de energia para a alimentação de dispositivos eletrônicos portáteis. Dentre as diversas fontes disponíveis, podem ser relacionadas: o calor corporal, pressão sangüínea, pressão gasosa pulmonar, movimento de expansão e contração da caixa torácica. O movimento dos membros superiores e inferiores também possuem potencial para o aproveitamento (Staner,1984).

Hausler(1984) demonstrou a viabilidade de conversão da energia produzida em um organismo vivo. Foram utilizados implantes de PVDF(fluoride de polyvinydine) pesando 128mg no corpo de um cão de 25kg , para obtenção energia elétrica a partir do movimento de respiração. A tensão gerada foi de 18V com uma potência de $17\mu\text{W}$, uma quantia bastante reduzida frente à demanda das atuais aplicações.

A tabela 1.2 mostra dados relativos à potência conversível, resultante de algumas funções orgânicas (Staner,1984):

Tabela 1.2. Potência requerida para várias funções orgânicas (Otis,2005)

Atividade	Kilocaloria/h	Watts
Sono normal	70	81
Sono leve	80	93
Sentando	100	116
Relaxando	110	128
Conversando	110	128
Almoçando	110	128
Passeando	140	163
Dirigindo carro	140	163
Tocando violino ou piano	140	163
Limpando a casa	150	175
Carpintaria	230	268
Caminhando (6,4 km/h)	350	407
Nadando	500	582
Alpinismo	600	698
Corrida de longa distância	900	1048
Corrida de velocidade	1400	1630

Esta tabela mostra que a corrida de velocidade gera a maior potência, possuindo o maior potencial para a conversão da energia, pois ao se tentar retirar uma pequena parcela desta energia, propiciaria uma maior potência percentual para a o microgerador, embora não seja prática a sua utilização.

Uma outra linha de pesquisas investiga o aproveitamento da energia luminosa com a utilização de células solares. O problema é que estas células têm uma eficiência muito pequena, da ordem de 15%, para células disponíveis comercialmente e de 20% para células em desenvolvimento (Otis,2005), além disso, os sistemas alimentados não poderiam ser colocados em locais pouco iluminados e seu custo atual é elevado (Philipose,2005). Atualmente esta forma de geração de energia tem atraído muita atenção e investimentos. A energia solar já alimenta milhões de máquinas, desde pequenos relógios até casas, e companhias americanas como Nanosolar, Konarka e outras companhias estão investindo milhões de dólares no desenvolvimento de células solares inseridas em finas folhas de plástico, as quais prometem reduzir drasticamente o custo do produto final. Sob a

denominação genérica de “power plastic” estes materiais podem ser laminados em qualquer superfície, desde telhados, notebooks até automóveis.

Os geradores baseados na radioatividade poderiam produzir quantidades de energia comparáveis às baterias, porém, outras questões como segurança e impacto social devem ser observados, pois a sociedade é sensível a questões envolvendo o uso da radiação. Esta fonte de energia possui elevada longevidade em termos de vida útil. Atualmente os estudos são para reduzir os riscos e por enquanto, o aproveitamento desta forma de energia não está muito difundida.

1.3.2 Microgeração a partir da energia vibracional

Atualmente, um grande número de investigações têm sido conduzidas para o desenvolvimento de métodos e sistemas para a geração de energia elétrica a partir de vibrações mecânicas. Do ponto de vista do fenômeno físico da conversão, três alternativas tem sido estudadas : conversão eletromagnética (indutiva), conversão eletrostática (capacitiva) e conversão piezelétrica (através de materiais piezelétricas). A tabela 1.3 mostra uma comparação entre estas três formas de conversão (Otis,2005):

Tabela 1.3. Comparação entre os métodos de conversão de energia vibracional em eletricidade (Otis,2005):

Tipo	Máximo prático milijoules/cm ³	Máximo agressivo milijoules/cm ³
Piezelétrico	35,4	335
Eletrostático	4	44
Eletromagnético	24,8	400

Máximo Prático: Representa valores correntemente armazenados com materiais e processos convencionais.

Máximo Agressivo: Representa o que teoricamente é possível.

A determinação do método de conversão mais adequado depende, certamente, da aplicação desejada. Com relação à tabela 1.3 e considerando a densidade energia, três fatores afetam a escolha da tecnologia para o conversor: Transdutores eletrostáticos são mais facilmente implementados em processos de MEMS², entretanto requerem uma fonte tensão externa. Transdutores eletromagnéticos geram tensões elétricas AC com amplitudes inferiores a 1 V (Otis,2005).

² Sistema Micro Eletro-mecânico:sistemas que podem ser implementados dentro de um circuito integrado.

Conversores piezelétricos podem gerar sinais AC ou DC em função do tempo de aplicação da força (Keawboonchuay,2003).

A conversão de energia com base no efeito eletromagnético foi estudada por vários autores.

Amirtharajah(1998) desenvolveu um gerador baseado em um alto-falante de bobina móvel capaz de gerar uma tensão de saída entre 0,85V e 0,97V, com uma potência gerada da ordem de $400\mu\text{w}$ nas freqüências mais baixas (~ 5 Hz) decrescendo nas freqüências mais altas (~ 1000 Hz).

Kymissis,1999 desenvolveu um gerador eletromagnético para o aproveitamento da energia biomecânica gerada para alimentação de um transmissor de rádio freqüência(RF). A fotografia do protótipo é reproduzida na figura 1.3. O gerador empregado é uma máquina rotativa e a energia do impacto do tênis no solo é convertido a partir da movimentação de manivelas e de uma alavanca. Além de uma estética pouco atraente o elevado curso da manivela (3cm) torna o sistema desconfortável. O mesmo autor investigou também a conversão desta forma de energia com piezocerâmicas comuns e com a instalação de PVDF no solado de um tênis. A conclusão publicada foi que a energia elétrica obtida no primeiro caso é superior, mas as cerâmicas e o PVDF são mais facilmente incorporáveis ao calçado.

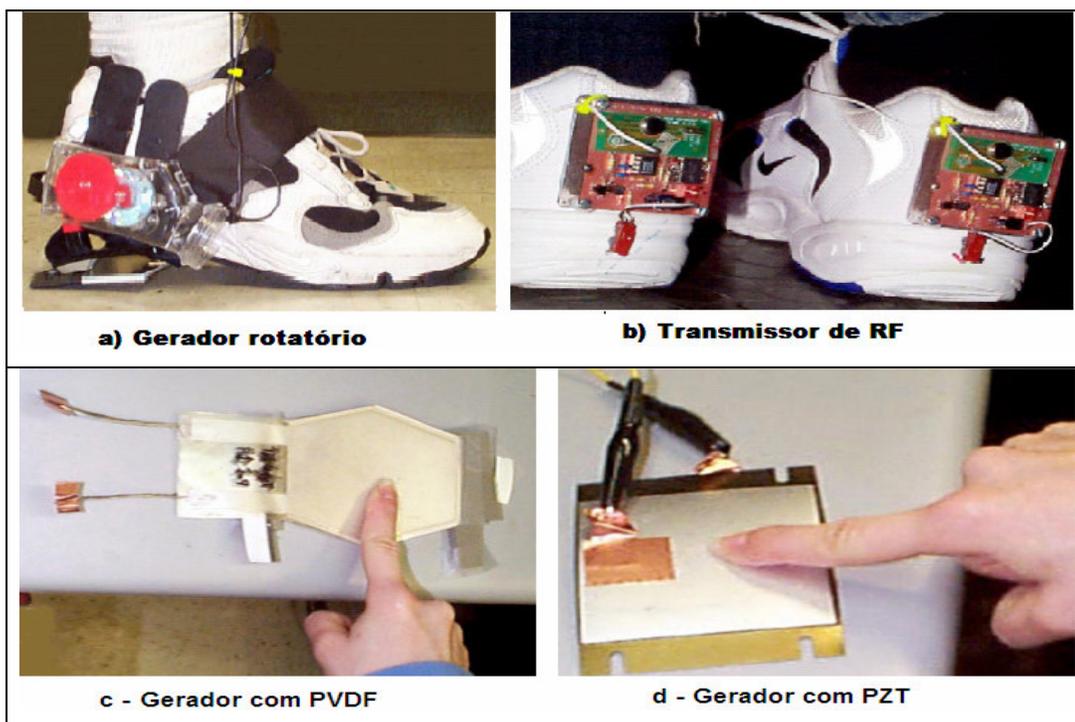


Figura 1.3. Geradores propostos por (Kymissis,1999).

Também na figura 1.3 são mostrados os outros dois geradores desenvolvidos: com PZT literal a e com PVDF literal b.

A conversão da energia vibracional em energia elétrica através do efeito eletrostático também tem sido investigada por diversos pesquisadores.

Meninger(2001) descreve a implementação e performance de um gerador piezelétrico baseado em um capacitor variável com tecnologia de MEMS. O sistema é capaz de gerar $8.66\mu\text{W}$ com uma eficiência de 49,5%. A principal desvantagem deste circuito é a necessidade de uma fonte externa para iniciar o processo de conversão, e a principal vantagem é que com a tecnologia de MEMS, o gerador e os circuitos condicionadores podem ser integrados em uma pastilha única de silício. Os detalhes construtivos do capacitor e sua imagem obtida por microscopia de varredura são mostrados respectivamente nas figuras 1.4 e 1.5.

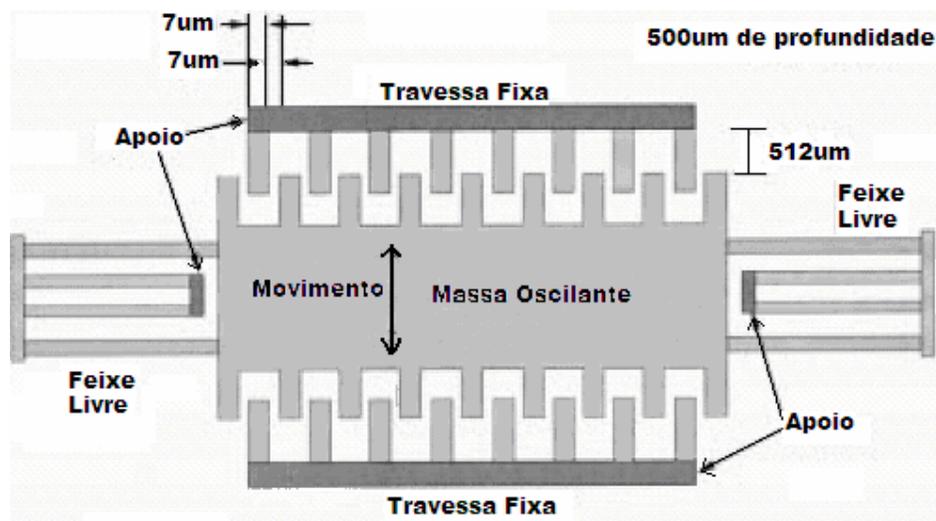


Figura 1.4. Capacitor variável com MEMS proposto por (Meninger,2001)

Neste gerador, as vibrações produzem movimento nas placas e alteram a capacitância do sistema. A capacitância recebendo uma carga inicial de uma fonte externa e seu valor sendo alterado pelo movimento das placas, provoca uma variação da energia segundo $W_{\text{capacitor}} = 1/2 \cdot (C_{\text{máx}} - C_{\text{mín}}) \cdot V^2$. Então quanto maior a diferença valores entre $C_{\text{máx}}$ e $C_{\text{mín}}$, maior será a energia ganha no processo. O sistema massa-mola formado deve ser ajustado para a frequência de ressonância da vibração a ser utilizada, para maximizar a transferência de potência mecânica para elétrica.

Onde $C_{m\acute{a}x}$ e $C_{m\acute{i}n}$ representam a capacit\ancia m\acute{i}nima e m\acute{a}xima da MEMS, respectivamente. V representa a fonte externa acoplada.

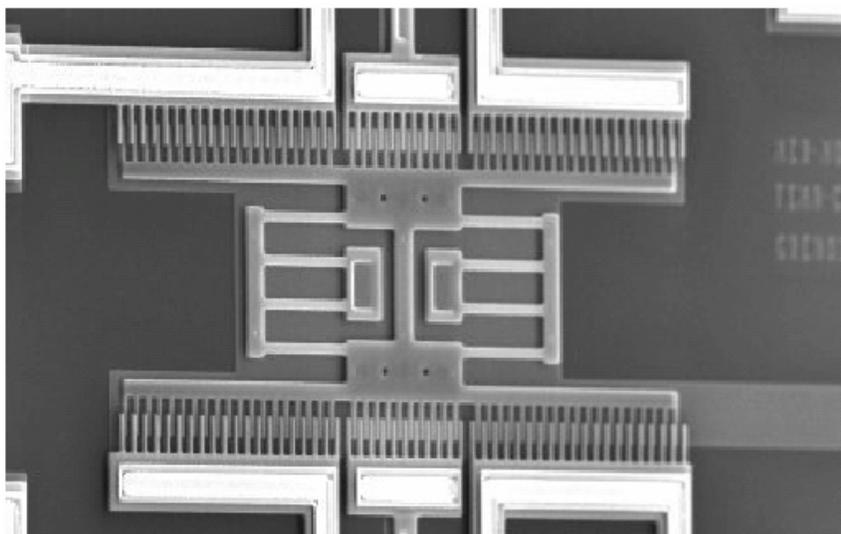


Figura 1.5. Imagem obtida em microscopia eletr\onica de um capacitor vari\avel fabricado com tecnologia de MEMS.

O aproveitamento da energia das vibra\c\oes atrav\es de piezeletricidade constitui outra alternativa para os sistemas de micro-gera\cao, pois associa caracter\xsticas importantes para algumas aplica\c\oes, destacam-se:

- Boa densidade energ\etica,
- Flexibilidade de projeto (a energia pode ser aproveitada de diversas formas),
- Economia,
- Disponibilidade na maioria dos ambientes,

Os geradores piezel\etricos utilizam o fen\omeno da piezeletricidade para a convers\ao de esfor\cos mec\nicos em energia el\etrica. O fen\omeno \e abordado no cap\itulo 2 desta disserta\cao.

A energia mec\nica vibracional pode ser captada pode ser atrav\es do impacto ou de vibra\c\oes cont\inuas. As estruturas mais comuns para a convers\ao da vibra\cao em eletricidade s\ao as membranas e as estruturas em balan\co.

As pesquisas com geradores piezel\etricos t\em investigado diversos formatos de cer\amicas e estruturas de capta\cao. As geometrias mais comumente utilizadas s\ao a circular e retangular (ou quadradas). Nestas pesquisas, a maioria dos pesquisadores utiliza cer\amicas customizadas \as especifica\c\oes de seus projetos,

seja a partir de sua síntese em laboratório ou através de encomendas aos fabricantes de materiais piezelétricos. As cerâmicas piezelétricas disponíveis no mercado têm custos médios da ordem de centenas de reais dependendo, da escala de produção e do tamanho da peça. Este custo dificulta o desenvolvimento de microgeradores para aplicações de baixo custo.

Eggborn(2003) apresenta uma ampla revisão sobre sistemas de conversão de energia com materiais piezelétricos, na qual analisa e modela o comportamento de geradores piezelétricos construídos com estruturas em balanço (*cantilever*). Um exemplo de gerador em cantilever desenvolvido especificamente para a alimentação de transmissores de Rádio Freqüência (RF) é apresentado por (Roundy,2005), reproduzido na figura 1.6:

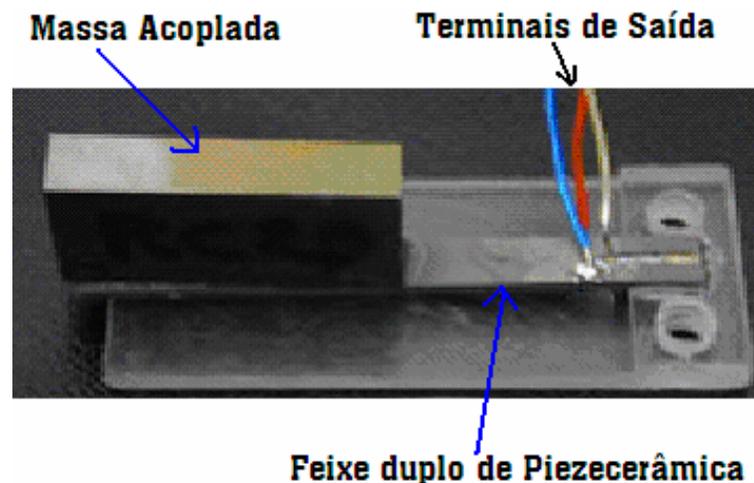


Figura 1.6. Gerador em cantilever proposto por (Roundy,2005).

O princípio básico de construção de um microgerador piezelétrico para conversão contínua das vibrações em eletricidade consiste no acoplamento de uma massa conhecida em determinado ponto do cantilever ou membrana, constituindo um sistema massa-mola, cujas freqüências naturais de oscilação são determinadas pelas propriedades e dimensões dos materiais utilizados. A fixação da massa na estrutura vibrante amplia a energia captada pelo sistema e diminui sua freqüência de ressonância propiciando adequar o gerador à freqüência oscilante desejada. Umeda(1997) apresenta esta idéia de manter a massa acoplada ao gerador e dados de experimentos encontrados.

Uma das principais aplicações vislumbradas para os sistemas de microgeração é a alimentação de redes de sensores distribuídos em edificações. Os esforços

empreendidos na conversão da energia disponível no ambiente das edificações, tem resultado em potências geradas ainda muito pequenas, por consequência da pequena amplitude das vibrações.

O desenvolvimento de sistemas para micro-geração de energia baseados em transdutores piezelétricos de baixo custo (*buzzers* ou unimorfos³), foi muito pouco estudada até o momento, mas pode constituir uma alternativa, quando a miniaturização for um requisito do projeto (Allen,2001). Na bibliografia pesquisada, somente uma referência sobre a geração de energia com buzzers foi encontrada.

Horowitz(2002) utilizou um ressonador acústico de Helmholtz, para conversão de energia acústica em eletricidade. Nos testes, o gerador atingiu uma potência de 7,4mW sob uma pressão sonora de 147 dB e obtendo um rendimento de 37%. Os ressonadores são freqüentemente comercializados junto com os *buzzers* a custos bastante baixos (<1 U\$). A figura 1.7 mostra alguns modelos de ressonadores e o tipo de *buzzer* encontrado em seu interior, do mesmo tipo utilizado nesta dissertação:

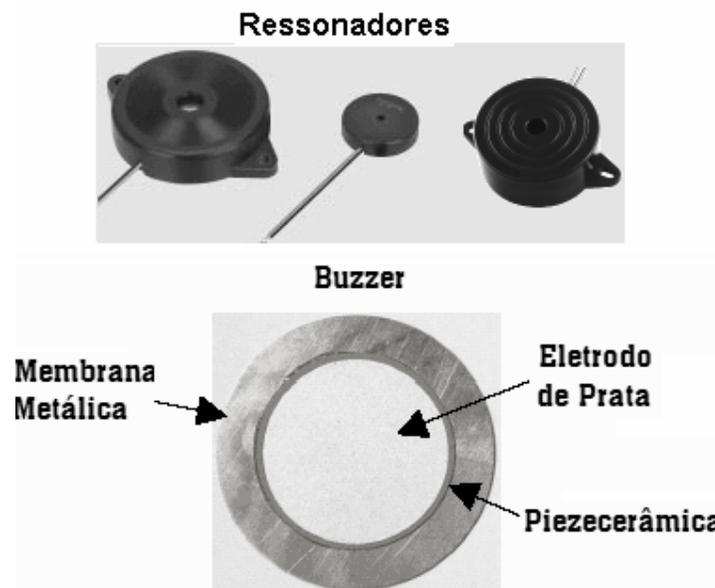


Figura 1.7. a) Ressonadores Helmholtz e b) buzzer piezelétrico.

A *buzzer* mostrada na figura 1.7.b) é composta por dois materiais: uma membrana metálica e um piezocerâmica, unidas por um adesivo industrial. Normalmente as *buzzers* são utilizadas como sinalizadores sonoros em equipamentos como computadores, eletro-eletrônicos, alarmes, etc. Entretanto sua

³ Unimorfo é marca registrada da empresa Morgan-Matroc.

utilização na geração de energia elétrica a partir da energia vibracional é incomum. Na revisão bibliográfica realizada não se encontrou nenhum exemplo desta forma de geração e seu desenvolvimento, caracterização e teste constitui uma contribuição desta dissertação para a área de microgeração.

1.3.3. Microgeradores piezelétricos

O objetivo inicial deste trabalho era gerar, especificamente, energia capaz de alimentar redes de sensores, talvez a maior motivação atual para o forte interesse pelos sistemas de microgeração. Com a análise de outras possibilidades de aplicação, como o enorme avanço de eletrônicos portáteis, optou-se por um tema de investigação mais amplo e mais adequado às restrições econômicas da produção em massa, passando-se a estudar a capacidade de geração e a viabilidade de dispositivos de baixo custo para a geração de eletricidade. Os estudos e experiências iniciais buscaram responder as seguintes perguntas: Qual o potencial energético aproveitável e como maximizá-lo ? Que pesquisas anteriores podem ser aplicadas? Qual a eficiência destes sistemas e como maximizá-la ? Quais as principais aplicações potenciais?.

Umeda(1997) mostrou que as cerâmicas piezelétricas, sob impacto, geram mais energia elétrica se acoplarmos uma massa a piezocerâmica para aproveitar melhor a energia cinética existente. Concluiu que com uma massa acoplada, o aproveitamento da energia cinética aumentou em 67%, em comparação ao gerador sem a massa. O piezogerador conseguiu com eficiência máxima de 52% com a massa acoplada. O autor também descobriu com esta estrutura que a forma de onda da tensão da saída muda em função pela resistência da carga, existindo um valor ótimo para a resistência da carga que fornece a eficiência máxima. Também descobriu que a eficiência aumenta se aumentarem o fator de qualidade mecânico e o fator de acoplamento eletromecânico e também se diminuïrem as perdas dielétricas.

Xu(1998) também pesquisou a energia elétrica gerada por uma cerâmica piezelétrica sob a forma de pressão e ao ser impactada por uma esfera de aço recoberta por uma camada de borracha. Encontrou uma energia da ordem 400 μ W. A autora descobriu que a cerâmica gera um sinal de tensão elétrica alternada quando recebe uma força mecânica. Este tipo de sinal alternado também foi encontrado por

(Morgan,2003). Estes dois pesquisadores (Umeda,1997 e Xu,1998) apenas realizaram medidas de laboratório, sem nenhum tratamento matemático, enquanto em (Keaeboonchuay,2003) se encontra um tratamento matemático de geração elétrica das piezocerâmicas sob impacto e sob pressão.

Estes dados apresentados respondem as perguntas: Como maximizar a eficiência: acrescentar uma massa ao gerador e mantê-la em contato com a cerâmica e também responde a pergunta de como maximizar o potencial energético: a carga deve possuir uma impedância semelhante a do gerador.

Roundy(2005) apresenta dados importantes para definir uma sistema de geração incluindo o sistema massa-mola, proposto nesta dissertação, através de três curvas, as quais são mostradas na Figura 1.8: Ele utilizou um sistema cantilever com uma piezocerâmica de 1cm^3 , uma massa de 9 gramas e uma aceleração de $2,5\text{m/s}^2$. Então elaborou três gráficos da potência. Um gráfico da potência versus frequência, outro da potência versus massa acoplada e o último, da potência gerada versus fator de acoplamento.

Na figura 1.8(a) se percebe que o comportamento da potência de saída de sistema de conversão eletromecânica baseado em cerâmica piezoeletrica possui uma elevação bastante abrupta nas proximidades da frequência de ressonância do sistema (120 Hz neste caso). Quanto maior o fator de qualidade Q, maior a taxa de variação da potência em relação à frequência. A massa foi mantida constante e com valor de 9 gramas.

Na figura 1.8(b) o referido autor, manteve a frequência do sistema na frequência de ressonância. Percebe-se que a potência elétrica gerada é uma função linear da massa acoplada, ou seja, quanto maior a massa, maior a potência gerada. Neste experimento a frequência foi mantida constante em 120 Hz. Como a ressonância de um sistema massa-mola é dependente da rigidez do material e da massa acoplada (Resnick,1980), um aumento na massa deve ser acompanhado num aumento da rigidez do material.

Na figura 1.8(c) é mostrada a relação entre potência e fator de acoplamento. Percebe-se que a partir de um fator de 0.4 a potência não aumenta mais. O fator de acoplamento representa a relação entre energia fornecida ao gerador e energia produzida.

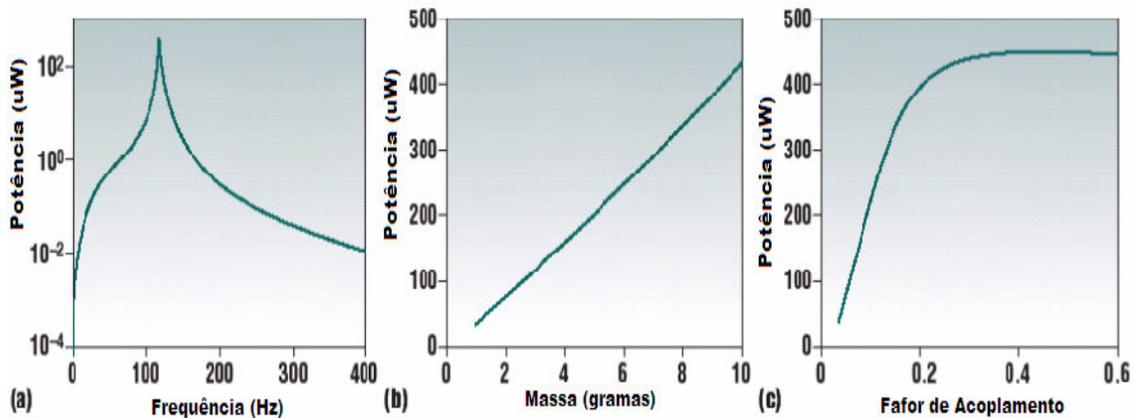


Figura 1.8. Simulações para um captador piezelétrico (Roundy,2005).

- (a) Potência de saída versus, freqüência aplicada. A freqüência de ressonância do projeto é de 120 HZ e massa acoplada de nove gramas,
- (b) Potência de saída versus massa acoplada. Todos os parâmetros constantes, exceto a espessura do feixe piezelétrico. Deflexão de $90\mu\text{m}$
- (c) Potência de saída versus coeficiente de acoplamento. A massa acoplada foi de 9 gramas e a deflexão máxima de aproximadamente $90\mu\text{m}$.

Através da figura 1.8 se podem obter as seguintes estratégias para definir a forma de captar a energia vibracional:

- Potência gerada versus freqüência de ressonância: A operação é limitada a uma estreita faixa de freqüência. O projeto deve contemplar um circuito adaptativo de auto-sintonia da freqüência de ressonância,
- Potência versus Massa: A potência é limitada à massa acoplada. O projeto deve prever sistema que facilite a pressão da massa,
- Potência versus Fator de Acoplamento: O sistema deve ficar abaixo do ponto de estabilização(joelho da figura 1.9c). O projeto deve primar por piezocerâmicas com maior fator de acoplamento e qualidade.

A tabela 1.4 resume estas estratégias:

Tabela 1.4. Relação de projetos segundo aplicação

Relações de projeto	Projeto da corrente	Estratégia de projeto/Aperfeiçoamento
Potência X frequência de ressonância	Operação limitada à estreita faixa de frequência	Projeto que adaptativo de auto-sintonia da frequência de ressonância
Potência X massa acoplada	Potência limitada pela massa acoplada no fim do cantilever	Explorar projeto que facilite a pressão por uma massa
Power X coeficiente de acoplamento piezométrico	Sistema de coeficiente de acoplamento está abaixo do joelho na curva de potência X acoplamento	Projeto que possua melhor coeficiente de acoplamento e o filme de piezocerâmica possua melhores qualidades.
Sistema integrado	Limitando a fabricação manual.	Possibilidade de usar MEMS(sistema micro-eletromecânico), integrando o sensor e o circuito CMOS

1.3.4. Condicionamento de energia

A cerâmica PZT gera em seus terminais, uma tensão alternada(AC) de acordo com o regime de aplicação de força (Keawboonchuay,2003), enquanto que a bateria necessita de tensão DC (corrente contínua). A figura 1.9 mostra a idéia da estrutura geral proposta nesta dissertação para compatibilizar a tensão gerada com o tipo de tensão exigida pela bateria:

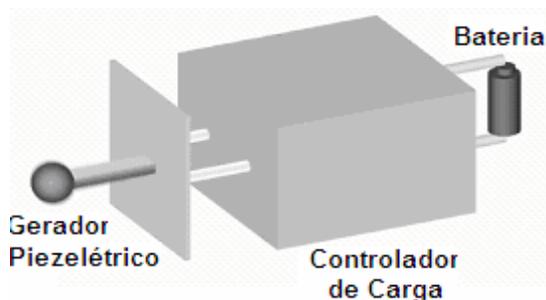


Figura 1.9. Conjunto gerador piezelétrico

Então, a menor estrutura a ser implementada é um retificador de onda completa, pois como já é de conhecimento geral, os retificadores de onda completa são os que fornecem a maior tensão média em sua saída. A carga de uma bateria direta de um retificador não é a melhor maneira, pois como a tensão no gerador piezelétrico varia de acordo com vibrações recebidas por ele, cria-se a necessidade de flexibilizar a tensão de saída retificada para transferir o máximo de potência pra a carga e isto poderia ser conseguido através de um conversor DC-DC colocado entre o retificador e a bateria (Hofmann,2002). Também existe um valor da impedância da carga que transfere a máxima potência (Xu,1998). Então foram estudadas várias topologias de conversores tradicionais (Barbi,1990) e topologias propostas para operar com piezocerâmica e se notou que quase todos os autores trabalharam estruturas convencionais, como conversores eletrônicos tipo flyback (buck – abaixadores ou boost – elevadores de tensão) ou conversores forward, também conversores push-pull forma encontrados no estudo bibliográfico. Alguns operaram seus conversores no modo contínuo de corrente, outros no modo descontínuo.

Alguns autores como Ottman(2002),trabalharam seus conversores através do controle PWM (Controle por Largura de Pulso). Este autor desenvolveu um conversor tipo Buck (porém controle via computador), no qual um algoritmo controla a razão cíclica (*duty cycle*) do PWM. A razão cíclica de um conversor é relação entre os tempos de ligado / desligado dos transistores de chaveamento. Através da

medição da curva de caída (*slope*) $\frac{\partial I}{\partial D}$, da corrente de carga da bateria, o controle calcula a razão cíclica ótima em que o PZT está em seu pico de potência fornecendo mais corrente para a bateria, conforme pode ser visto na figura 1.10:

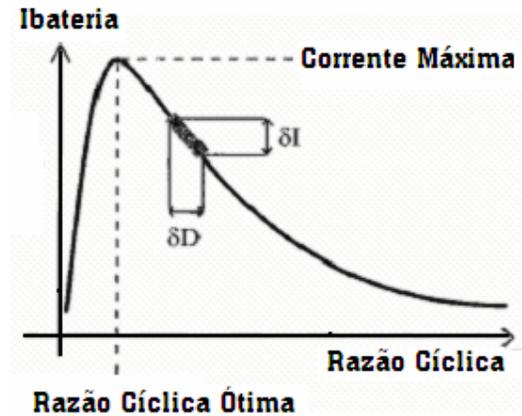


Figura 1.10. Ponto de operação do controle (Ottman,2002).

Esta forma de controle é a maior contribuição deste autor. A eficiência encontrada estabeleceu-se entre 74-88%, sem considerar as perdas nos diodos da ponte retificadora e no circuito de controle. Estas perdas podem ser muito significativas quando o PZT forneça tensões da ordem de 2 a 3 V e os diodos da ponte retificadora infiram uma perda de tensão por condução da ordem de 1,2V por semiciclo, além disso a menor tensão para operar a ponte é 1,2V, limitando sua aplicação à circuitos com vibração mecânica de menor amplitude, pois a tensão no PZT depende diretamente da força mecânica aplicada, sendo que este fator será apresentado no capítulo 2. A figura 1.11 mostra este problema da retificação:

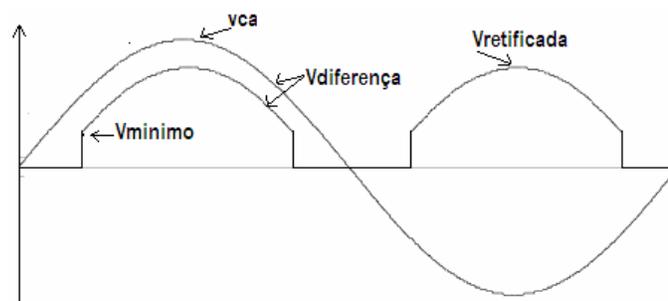


Figura 1.11. Exemplo de onda retificada

A figura 1.11 mostra claramente que se necessita de um retificador não convencional para se trabalhar com baixas tensões.

Outra grande perda deste circuito é relativa à inserção de uma capacitância em paralelo C_{rect} em paralelo com o PZT. Como exemplo, um PZT com capacitância interna $C_P = 14\text{pF}$ poderia fornecer uma energia máxima da ordem de 240 mW. Ao ser colocada uma capacitância em paralelo de $1\mu\text{F}$, essa energia cairia para 3,9mW, segundo dados fornecidos pelo fabricante Morgan,2003. Este fato é extremamente importante, pois implica em uma estrutura de conversor adaptada ou diferente aos padrões existentes. Outro ponto importante é que este autor não projetou um circuito integrado, o qual implicaria em uma série de problemas, nem tampouco utilizou um sistema auto-alimentado, ou seja, a alimentação para o circuito parte desde a bateria totalmente descarregada até sua carga completa.

Outra forma de operar um conversor é relativa ao modo contínuo de corrente. Este modo foi explorado por (Otman,2002), obtendo uma eficiência de 65% com uma tensão de circuito aberto de 45 V (a qual pode ser desprezar as perdas na retificação). Uma importante contribuição deste autor é que para níveis baixos de vibração e conseqüentemente de tensão gerada, deve-se buscar uma carga da bateria com um conversor mais simples e para níveis mais altos, operar de outra forma, no qual o consumo do circuito não impacte fortemente. Este autor também buscou maximizar a razão cíclica descrita em (Hofmann,2002).

Outra topologia utilizada é a de conversores tipo Flyback. Estes conversores possuem características gerais como: aceitam grandes variações de resistência de carga e possuem boa estabilidade.

Kasyap(2002) propõe um conversor elevador tipo flyback. A justificativa de seu conversor é mostrada na figura 1.12 :

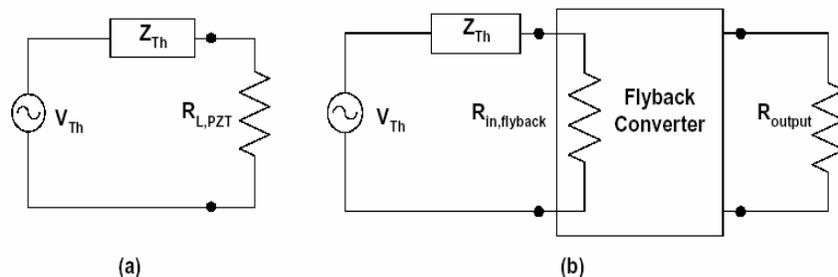


Figura 1.12. Topologia proposta por (Kasyap,2000)

A idéia para maximizar o fluxo de potência para a carga R_{output} é sintonizar a impedância de entrada do conversor flyback com a impedância de saída da cerâmica PZT. Esta topologia obteve uma eficiência máxima de 20% com uma

resistência de carga de 10 kΩ. Estes valores foram conseguidos com uma potência mecânica média de 800μW, com uma força correspondente de 12 mN e velocidade de 0,065 m/s. Esta topologia apresenta problemas semelhantes à estrutura forward anterior.

Alguns autores buscaram topologias diferenciadas. Um exemplo é a estrutura apresentada por (Meninger,2001) mostrado na figura 1.13:

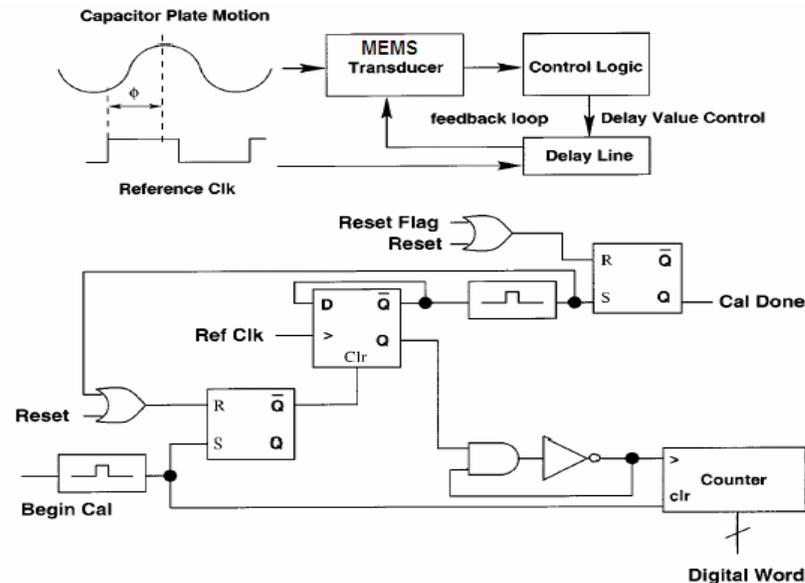


Figura 1.13. Conversor proposto por (Meninger,2001).

Este conversor se baseia em um controle digital, e em seu circuito de chaveamento possui interruptores tipo push-pull. A eficiência encontrada foi da ordem de 51%.

Na revisão bibliográfica também se encontrou um conversor linear utilizando componentes discretos e o circuito integrado (MAX 666). Este conversor foi proposto por (Kymissis,1999), sendo um circuito auto-alimentado e fornecendo energia para um transmissor de sinal (HT12E eTX66). Este circuito é mostrado na figura 1.14:

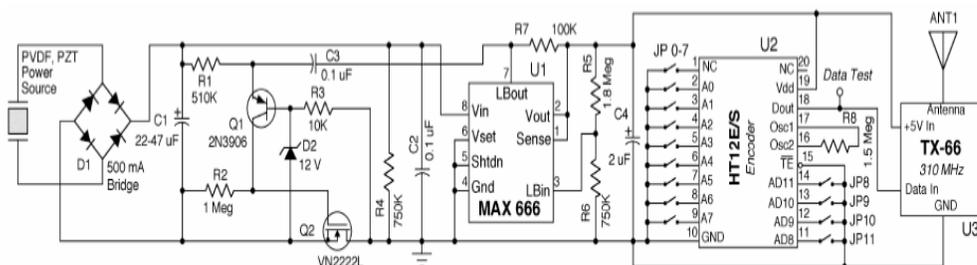


Figura 1.14. Microgeração proposto por (Kymissis,1999).

Este autor não referencia eficiência deste conversor, o qual se baseia em um regulador linear. Porém como possui componentes bipolares, a potência consumida será maior em relação aos MOSFET.

Richards(2004), propôs uma estrutura diferente em relação às apresentadas até aqui. Este autor trata especificamente do projeto de um circuito integrado desenvolvido especialmente para microgeração com cerâmica piezelétrica.

O princípio básico deste conversor é mostrado na figura 1.15

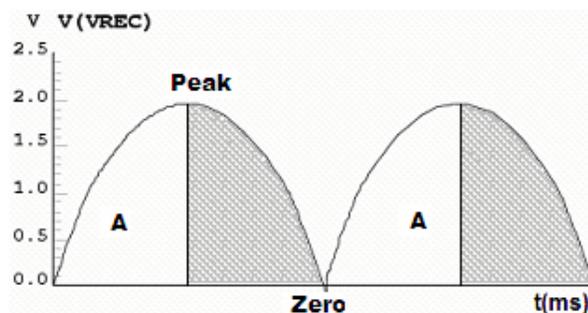


Figura 1.15. Funcionamento do circuito proposto por (Richards,2004).

A figura 1.15, mostra a forma de onda retificada pelo conversor. A cerâmica piezelétrica entre os pontos A e Peak, está formando a tensão no capacitor interno da mesma. Este ponto será melhor explorado no capítulo 2 e 3. Do ponto Peak e Zero, a energia gerada está pronta para ser captada. Então a idéia do circuito é possuir uma retificação controlada, para apenas deixar passar sinal da cerâmica para a bateria entre os pontos Peak e Zero e com isso melhorando a eficiência do sistema como um todo. Esta idéia parece ser bastante coerente, pois visa aproveitar melhor a energia da cerâmica piezelétrica.

Este circuito integrado foi projetado para operar com variações de modelo de PZT, frequência de trabalho e potência fornecida pelo gerador PZT desde $3\mu W$ até $1000\mu W$. A eficiência apresentada variou de 49% até 75%, dependendo da frequência de operação e da potência gerada pelo PZT. Neste artigo têm-se desde a idéia teórica até as medidas com o circuito fabricado, fornecendo ótimo material para estudo. Este autor traz grandes contribuições, como exemplo uma ponte retificadora utilizando transistores MOSFET em vez de diodos. Esta estrutura retificadora reduz sensivelmente as perdas na retificação. A figura 1.16 mostra a estrutura da ponte retificadora. Esta estrutura pode colocar na carga praticamente toda a tensão de pico da entrada, descontando apenas a tensão de $R_{ds_{on}}$ do MOSFET. Um MOSFET

sendo corretamente polarizado, perde apenas poucos milivolts entre dreno-fonte. Este circuito será mais bem abordado no capítulo 3.

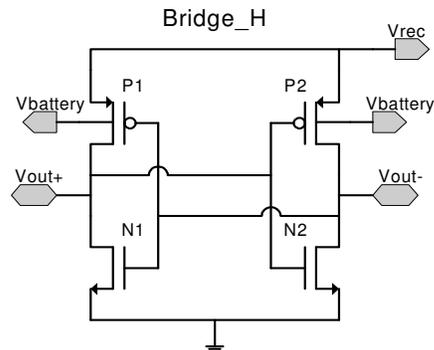


Figura 1.16. Ponte Bridge_H do conversor proposto por (Richards,2004).

As medidas iniciais realizadas em laboratório com o gerador piezelétrico, apontaram para tensões em circuito fechado em torno de 3 Vac. Então, analisando as várias topologias apresentadas, definiu-se uma linha de trabalho para esta pesquisa. Para isto definiram-se premissas necessárias para o projeto do circuito integrado, em função da cerâmica PZT utilizada, como segue :

- a) Deveria possuir um retificador onda completa,
- b) Os circuitos deveriam consumir o mínimo possível. Isto implica em polarizar o máximo de transistores na região chamada de sub-threshold (ver ANEXO III),
- c) Como o sistema é auto-alimentado, as tensões de alimentação e referência são variáveis. Isto implica em estruturas não convencionais de controle,
- d) Possuir o mínimo de componentes externos e otimizar a razão Área/Eficiência,
- e) O conversor deve trabalhar com tensões baixas, da ordem de 1,2V. Isto também implica em estruturas não convencionais
- f) A corrente fornecida pelo conversor piezelétrico é muito menor que a corrente de carga lenta da bateria a ser utilizada. Então esta carga pode ser aplicada à bateria indefinidamente sem danificar a bateria (Battery,2005). Baterias de Ni-Cad aceitam carga lenta da ordem de 1/10 de sua corrente nominal, enquanto baterias de NiMH, aceitam correntes de carga lenta da ordem de 1/40 de sua corrente nominal. Então se tem para estas baterias valores de Slow Charge da ordem de 40 mA-h e as medidas iniciais em laboratório indicaram que o gerador

pode fornecer aproximadamente $230\mu\text{A}$ de corrente de pico. Então se pode trabalhar o controle da tensão máxima sem necessidade de controlar a corrente,

g) As baterias estão carregadas quando sua tensão é de aproximadamente 20% superior à tensão nominal (Bateria,2005). Então para baterias de 1,5V, deve-se carregar com uma tensão de 1,8V, então o circuito integrado deve estar apto a operar com valores de tensões desta ordem.

Considerando todas as estruturas apresentadas e as premissas acima citadas, definiu-se iniciar o projeto do circuito integrado com a estrutura apresentada por (Richards,2004). O projeto do circuito integrado será tratado no capítulo 4.

GERADORES PIEZELÉTRICOS

2.1. Introdução

A geração de energia elétrica em cerâmicas piezelétricas está relacionada às propriedades piezelétricas do material utilizado, suas dimensões e força aplicada. Este capítulo apresenta a base teórica necessária ao entendimento dos fenômenos associados ao funcionamento do gerador construído.

A bibliografia encontrada apresenta modelos e equações matemáticas que descrevem, aspectos como: frequência de ressonância de um unimorfo, modelos elétrico e mecânico, ressonância de uma piezecerâmica, ressonância de uma membrana, deformação causada pela aplicação de uma força estática, energia elétrica e mecânica de um unimorfo, potência elétrica gerada, etc. Entretanto não foi encontrada uma abordagem do ponto de vista das condições de operação existentes nesse projeto: Uma estrutura tipo unimorfo, circular fixo pela periferia com uma massa acoplada ao centro. Este capítulo apresentará uma metodologia que considera estas condições, sendo uma das contribuições desta dissertação. Busca-se ainda, a compreensão e validação dos dados através de uma análise comparativa dos resultados obtidos com os softwares ANSYS e Mathcad e medições em bancada.

2.2 Piezeletricidade

A piezeletricidade foi descoberta em cristais de quartzo pelos irmãos J. Curie e P. Curie por volta de 1880. Na oportunidade, eles observaram que quando determinados tipos de cristais eram tracionados ou comprimidos, sua estrutura cristalina produzia uma tensão proporcional a esta pressão. Este fenômeno ficou conhecido como efeito piezelétrico 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

piezoeétrico reverso. Os efeitos direto e reverso ocorrem somente em materiais piezoeétricos, e sua aplicação na construo de transdutores eletromecânicos  muito eficiente.

2.2.1 Efeito Gerador Elétrico

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram que uma peça piezocerâmica ao ser comprimida ou expandida gera uma tensão elétrica E, a qual possui valores alternados ao ser pressionada e a seguir solta. Também na figura 2.2 podem-se observar os dois principais modos de aproveitamento de energia.

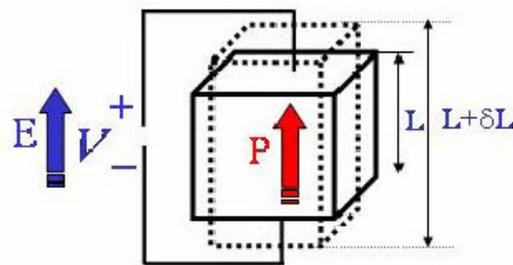


Figura 2.1. Gerao de Energia Elétrica em funo da pressão P.

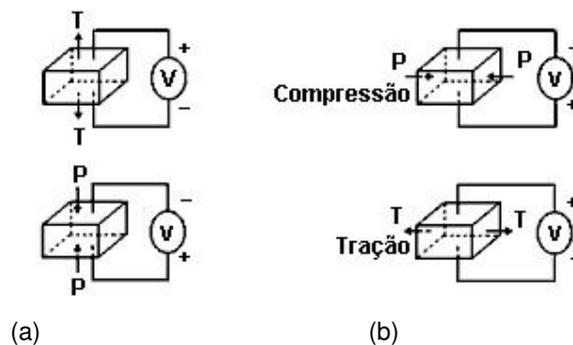


Figura 2.2. Principais efeitos piezoeétricos. Efeito longitudinal (a) e transversal (b).

2.2.2 Materiais piezoeétricos:

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

PZT. A maioria dos materiais piezelétricos sintéticos comercializados atualmente possui em sua composição $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$. 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 físicas e químicas. Os PZTs são dotados de características ímpares 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.

Existem muitos tipos de cerâmicas PZT e características diferenciadas. A seguir serão apresentados alguns destes modelos, que são mais aplicáveis a *buzzers*.

PZT-4: Este material é ideal para aplicações de limpadores ultra-sônicos, sonar e outras aplicações de alta potência acústica. PZT-4 é um material Titanato Zirconato de Chumbo capaz de produzir grandes amplitudes mecânicas, enquanto mantém baixas as perdas mecânicas e dielétricas. Além disso, ele pode ser utilizado sob condições de repetição e continuidade de esforço;

PZT-5A: Este material é utilizado como elemento receptor ou gerador em hidrofones, acelerômetros e captadores de vibração. PZT 5A é um material Titanato Zirconato de Chumbo com alta sensibilidade, permissividade (ANEXOIII) e tempo de estabilização;

PZT-5H: Este material é usado em receptores sensíveis e aplicações que requerem controle de movimento. Ele pode se usado em uma ampla faixa de aplicações desde hidrofones até impressoras jato de tinta. Este material possui uma grande permissividade, acoplamento e constante piezelétrica. Ele também possui baixo coeficiente de temperatura Curie, como toda a família PZT-5, que restringe sua aplicação a uma faixa ($<300^\circ\text{C}$).

PZT-5J: Este material é usado em fusos, hidrofones e outras aplicações que requerem uma combinação de alta energia gerada e alta tensão de saída. Ele possui alta permissividade e alta constante de tensão piezelétrica.

2.2.3 O efeito piezétrico na geração de energia:

A maior parte das expressões que envolvem grandezas de compressão, dilatação e deformação utiliza subscritos e sobrescritos em seus símbolos. O sobrescrito mostra a grandeza que permaneceu constante durante o fenômeno (deformação). Os subscritos indicam a eixo de orientação de atuação do fenômeno do efeito resultante, respectivamente. A Figura 2.3 mostra a correspondência dos eixos coordenados x, y e z com os números 1, 2 e 3. Os números 4, 5 e 6 se referem aos modos de torção associados à x, y e z respectivamente.

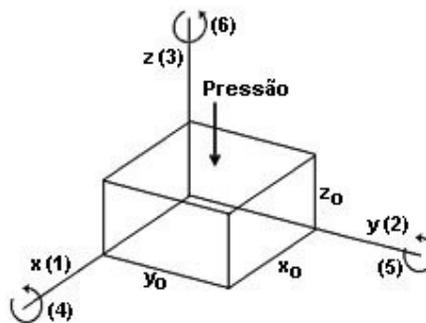


Figura 2.3. Relação entre números sobrescritos, subscritos e eixos coordenados.

Os itens a seguir apresentam as principais grandezas relacionadas à piezeletricidade. O conhecimento de tais parâmetros é fundamental na modelagem e estimativa das características de um atuador piezétrico.

Constante de Deformação Piezétrica: A constante de deformação piezétrica d relaciona o campo aplicado em um PZT polarizado com a deformação por ele sofrida. Sua unidade é expressa em m/V.

Para um estado de polarização positiva:

$$\frac{\Delta l}{l} = d \cdot U \quad \text{Equação 2.1}$$

Para um estado de polarização negativa:

$$\frac{\Delta l}{l} = -d \cdot U \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde U é o campo elétrico .

Coefficiente de Poisson: O coeficiente de Poisson é o parâmetro que indica a deformação relativa entre as direções longitudinal e transversal. Em outras palavras, é a razão entre a expansão transversal e a contração longitudinal quando o material é submetido à pressão com campo constante.

$$\nu = \frac{S_{31}}{S_{33}} \quad \text{Equação 2.3}$$

S_{33} representa a deformação $\Delta z/z_0$ causada pela aplicação de uma pressão na direção z e S_{31} representa a deformação ocorrida em x causada pela mesma pressão em z .

Direcionalidade da Constante de Deformação Piezelétrica: Quando os fenômenos de deformações relativas forem causados por campos elétricos ao invés de pressões externas, não é possível utilizar o coeficiente de Poisson para quantificar as relações de deformação. O princípio de geração da deformação neste caso é eletromecânico e não apenas mecânico, como exemplificado no item anterior, fazendo com que os princípios de deformação sejam diferentes. Sendo assim, utilizam-se as constantes de deformação piezelétricas agregadas aos subscritos de direcionalidade para expressar as deformações relativas em piezeletricidade.

A constante de deformação na direção z (para o efeito longitudinal) é representada por d_{33} , Isto é:

$$\frac{\Delta z}{z} = d_{33} E_z \quad \text{Equação 2.4}$$

A expansão na direção x (para o efeito transversal) é dada por d_{31} .

Tomando o exemplo da Figura 2.3, onde as dimensões x e y são iguais:

$$\frac{\Delta x}{x} \left(= \frac{\Delta y}{y} \right) = d_{31} E_z \quad \text{Equação 2.5}$$

Coefficientes de Tensão de Saída: As expressões relacionadas ao efeito piezelétrico reverso são sintetizadas da seguinte forma:

$$V_z = -g_{33} \cdot T_z \quad \text{Equação 2.6}$$

$$V_z = -g_{31} \cdot T_{x,y} \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde: T é a pressão aplicada e V_z é a tensão gerada no PZT.

As constantes de proporcionalidade g_{33} e g_{31} são chamadas de constantes de tensão de saída e relacionam grandezas mecânicas e elétricas. A constante g está relacionada com a constante d através das relações:

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T} \quad \text{Equação 2.8}$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{31}^T} \quad \text{Equação 2.9}$$

onde ϵ_{33}^T e ϵ_{31}^T representam a permissividade do PZT em diferentes direções.

A constante g é representada pela unidade V·m/N.

Coefficiente de Acoplamento Eletromecânico: O coeficiente de acoplamento eletromecânico k representa a capacidade do material em converter energia elétrica em mecânica e vice-versa.

$$k = \sqrt{\frac{\text{energia mecânica armazenada}}{\text{energia elétrica aplicada}}} \quad \text{ou} \\ = \sqrt{\frac{\text{energia elétrica armazenada}}{\text{energia mecânica aplicada}}} \quad \text{Equação 2.10}$$

Constante Dielétrica Relativa: A constante dielétrica relativa K é a razão entre a permissividade do material ϵ e a permissividade do espaço livre ϵ_0 .

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \text{Equação 2.11}$$

Módulo de Young: O módulo de Young E , também chamado de módulo de elasticidade, é a razão da pressão aplicada pela deformação produzida.

$$E = \frac{\text{pressão}}{\text{deformação}} \quad \text{Equação 2.12}$$

Sua unidade é o N/m².

2.2.4 Perda das propriedades piezelétricas

A maior parte das propriedades dos PZTs varia em escala logarítmica com o passar do tempo, a partir do momento de sua polarização. Esta taxa de “envelhecimento” depende da composição da cerâmica e do modo como foi

produzida. Por isto, os ensaios para especificação de propriedades como: constante dielétrica, coeficiente de acoplamento eletromecânico e constantes piezelétricas; devem ser efetuados após um intervalo padrão à polarização do material. Pois devido à taxa de decréscimo das propriedades, estas tendem a estabilizar após o referido período. O processo de envelhecimento pode ser acelerado pela exposição da cerâmica a qualquer um dos três fatores abaixo.

- Altas temperaturas(>300°C);
- Grandes campos elétricos (despolarização);
- Altas pressões mecânicas.

A escolha do tipo de material deve ser feita com base nas condições de trabalho da cerâmica, pois fora desses limites o PZT pode ser parcial ou totalmente despolarizado.

Limitação de temperatura: O aumento da temperatura faz com que o desempenho do material diminua até a situação de total despolarização na temperatura limite. Essa temperatura é conhecida como ponto de Curie e é a temperatura máxima permissível para exposição de um material piezelétrico. Acima dela, todas as características piezelétricas do PZT são perdidas. Na prática, a temperatura de trabalho deve ser bem menor que o ponto de Curie, pois em altas temperaturas o processo de envelhecimento acelera, o rendimento piezelétrico diminui e a resistência à pressão é reduzida.

Limitações de pressão mecânica: Altas pressões mecânicas também podem despolarizar a cerâmica. Os limites de segurança também dependem do tipo de PZT e da duração da aplicação da pressão

2.3. Modelo do gerador piezelétrico

Como foi exposto no capítulo 1, o sistema proposto baseia-se no emprego de um gerador de construção simples e custo reduzido, implementado a partir de um unimorfo e uma esfera metálica fixa ao centro, conforme mostra a figura 2.4:

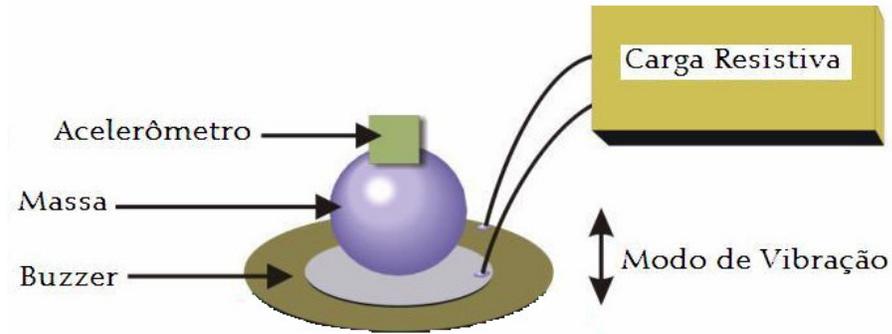


Figura 2.4. Gerador desenvolvido

Para a avaliação da potência gerada e a eficiência do sistema, foi utilizado um sistema de testes capaz de monitorar a potência sob variações da frequência e amplitude das vibrações, através de um acelerômetro. As vibrações de teste foram geradas em um *shaker*, composto de um gerador de sinais, um amplificador de áudio e um alto-falante. Uma vez que o alto-falante não possui resposta linear, foi utilizado um acelerômetro para manter a forma de onda de aceleração com a amplitude desejada. Este sistema será descrito mais detalhadamente nos capítulos 4 e 5.

Nas baixas frequências, uma cerâmica piezelétrica submetida a vibrações mecânicas pode ser representada eletricamente por uma fonte de tensão, sendo seu valor estático definido na equação 2.6 ($V_z = -g_{33} \cdot T_z$); e pela capacitância C_0 , que relaciona a carga adquirida à tensão aplicada ao PZT. O valor desta capacitância depende do processo de polarização, da geometria e do tipo de material piezelétrico.

A figura 2.5 representa o modelo de geração elétrica. (Morgan,2003):

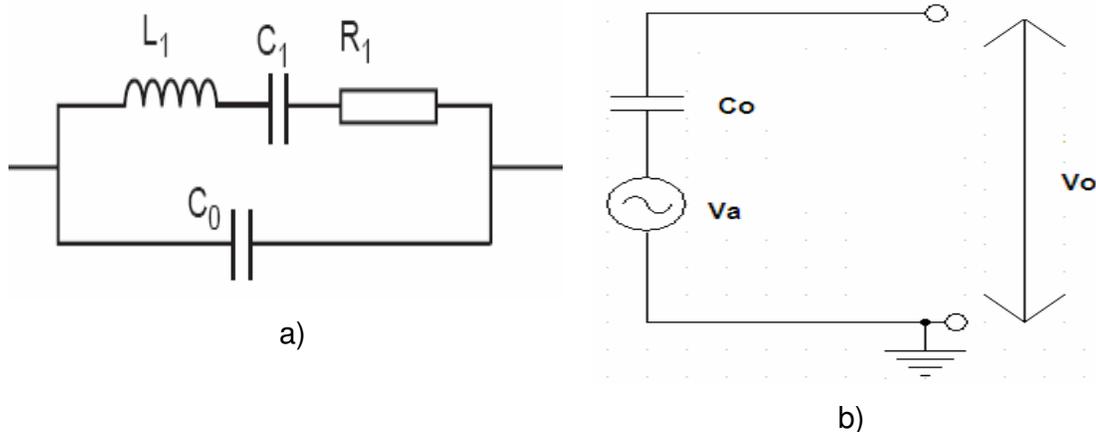


Figura 2.5. Modelo do PZT: a) Completo. b) Para baixas frequências.

Onde: C_0 representa a capacitância intrínseca ao PZT, V_a representa a tensão interna do PZT em resposta à pressão aplicada na piezocerâmica e V_o é a tensão elétrica disponível na saída. L_1 e C_1 se relacionam com a massa e a compliância elástica do cristal, multiplicados por um fator representado o efeito piezoeletrico. R_1 representa a perda mecânica por fricção do cristal.

2.3.1. A Tensão gerada: V_o :

Para determinar a tensão elétrica gerada, necessitamos relacionar parâmetros mecânicos com elétricos. A energia mecânica fornecida à cerâmica está relacionada à força exercida sobre o material e ao deslocamento que a superfície experimenta em relação ao seu estado de equilíbrio. Os deslocamentos possuem maior amplitude no centro da estrutura e tem por conseqüência um deslocamento angular nas seções transversais do unimorfo. Estes deslocamentos variam do centro para a periferia e são definidos em relação a um eixo neutro, que compreende os pontos de deslocamento angular nulo, conforme ilustra a figura 2.6:

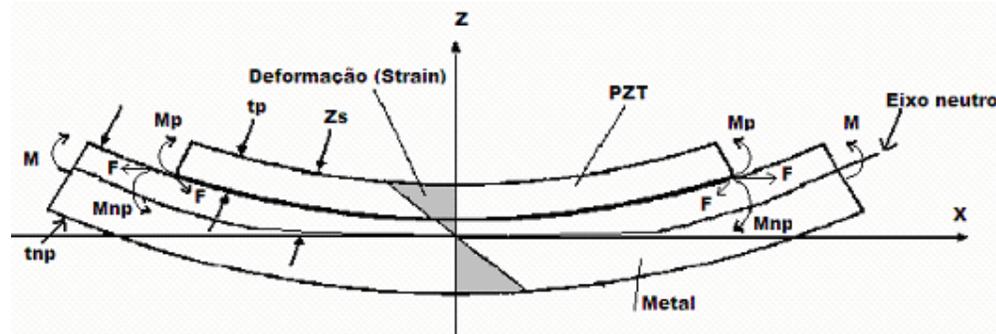


Figura 2.6. Deformação de uma *buzzer* resultante da aplicação de uma força mecânica.

Na figura, E_p e E_{np} são os módulos de Young do PZT e metal respectivamente. M_p e M_{np} são os momentos nos respectivos materiais. O valor t_p representa espessura da piezocerâmica e E_p o seu respectivo módulo de Young. O valor de t_{np} representa espessura da membrana metálica e E_{np} seu módulo de Young e z_s a distância ao eixo neutro. O espaço entre a piezocerâmica e o metal é desprezado. Como ambos os materiais possuem diferentes módulos de Young, a área de seção transversal deve ser transformada em uma seção transversal equivalente. Considerando que cerâmica e metal vibram como um corpo único, a

área de seção transversal equivalente representa um gerador formado por apenas um tipo de material, como mostra a figura 2.7.

Os termos b_2 e D estão relacionados com os módulos de Young dos materiais de acordo com a expressão (Sashida,1993):

$$\frac{b_2}{D} = \frac{E_p}{E_{np}} \rightarrow b_2 = D \cdot \frac{E_p}{E_{np}} \quad \text{Equação 2.13}$$

Onde, E_p é o módulo de Young da cerâmica piezolétrica na direção 1-1 e E_{np} é o módulo de Young do metal, D é o diâmetro externo da *buzzer* e b_2 a dimensão a ser transformada.

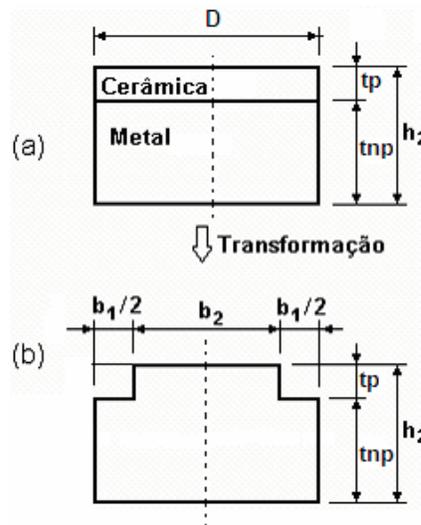


Figura 2.7. Transformação para a seção transversal equivalente do gerador (Sashida,1993).

A equação para calcular a distância ao eixo neutro z_s , mostrado na figura 2.6, como função das dimensões e módulo de Young é dado por (Eggborn,2003):

$$z_s = \frac{\left(\frac{t_p}{2}\right) \cdot t_p \cdot \left(\frac{E_p}{E_{np}}\right) + \left(t_p + \frac{t_{np}}{2}\right) \cdot t_{np}}{t_p \cdot \frac{E_p}{E_{np}} + t_{np}} \quad \text{Equação 2.14}$$

O valor t_p representa espessura da piezocerâmica e E_p o seu respectivo módulo de Young. O valor de t_{np} representa espessura da membrana metálica e E_{np} seu módulo de Young. O espaço entre a piezocerâmica e o metal é desprezado.

A tensão elétrica gerada no PZT pode ser relacionada à média da deformação sobre a estrutura (S_p), e que pode ser calculada por (Eggborn,2003):

$$S_p = \frac{M}{(E_p \cdot I_p + E_{np} \cdot I_{np})} \cdot \left(z_s - \frac{t_a}{2} \right) \quad \text{Equação 2.15}$$

A tensão elétrica gerada no PZT pode ser relacionada à média da deformação sobre a estrutura (S_p), e que pode ser calculada por (Eggborn,2003):

$$S_p = \frac{M}{(E_p \cdot I_p + E_{np} \cdot I_{np})} \cdot \left(z_s - \frac{t_a}{2} \right) \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde, I_p e I_{np} representam os momentos de inércia da cerâmica e da membrana metálica e podem ser calculados a partir das espessuras da cerâmica (t_p) e do metal (t_{np}) por:

$$I_p = \int_{z_s - t_p}^{z_s} D \cdot z^2 dz = \frac{1}{3} \cdot D \cdot [z_s^3 - (z_s - t_p)^3] \quad \text{Equação 2.15}$$

$$I_{np} = \int_{z_s - t_p}^{(t_p + t_{np} - z_s)} D \cdot z^2 dz = \frac{1}{3} \cdot D \cdot [(t_p + t_{np} - z)^3 - (z_s - t_p)^3] \quad \text{Equação 2.16}$$

Sendo, D o diâmetro da membrana metálica, z_s a distância ao eixo neutro e z o eixo de análise que ocorre a deflexão.

Substituindo a equação 2.14 na equação 2.15 a deformação (strain) ser descrita (Eggborn,2003):

$$S_p = - \frac{6 \cdot M \cdot E_{np} \cdot t_b \cdot (t_a + t_b)}{D \cdot [E_a^2 \cdot t_a^4 + E_b^2 \cdot t_b^4 + 2 \cdot E_a \cdot t_a \cdot E_b \cdot t_b \cdot (2 \cdot t_a^2 + 3 \cdot t_a \cdot t_b + 2 \cdot t_b^2)]} \quad \text{Equação 2.17}$$

M é o momento fletor resultante da aplicação da força externa.

O esforço normal pode ser calculado :

$$T_p = E_p \cdot S_p \quad \text{Equação 2.18}$$

A tensão elétrica gerada pode ser escrita como:

$$V_o = g_{33} \cdot t_p \cdot T_p \quad \text{Equação 2.19}$$

Substituindo a equação 2.17 na equação 2.18 e depois na equação 2.19, a tensão elétrica gerada pode ser escrita como:

$$V_o = \frac{6 \cdot g_{33} \cdot M \cdot J \cdot (1+J)}{D \cdot t_p \cdot [1+J \cdot G^2 + 2 \cdot J \cdot (2+3 \cdot G+2 \cdot G^2)]} \quad \text{Equação 2.20}$$

As variáveis J e G são apenas variáveis de substituição para efeito de simplificação da equação. Estas variáveis representam:

$$J = \frac{E_{np} \cdot t_{np}}{E_p \cdot t_p} \quad \text{Equação 2.21}$$

$$G = \frac{t_{np}}{t_p} \quad \text{Equação 2.22}$$

O momento fletor M é definido como (Nash, 1982):

$$M = \frac{\text{Força Aplicada} \cdot D}{8} = \frac{\text{massa} \cdot \text{aceleração} \cdot D}{8} \quad \text{Equação 2.23}$$

Onde D = Diâmetro externo do PZT.

Na equação 2.23 se percebe a importância da massa acoplada citada no capítulo 1, pois quanto maior a massa acoplada, maior o momento fletor e por conseguinte, maior a tensão gerada.

2.3.2. Potência Elétrica de Saída:

A potência elétrica máxima de saída pode ser estimada através do conhecimento da tensão V_o e da impedância capacitiva de C_o , pois com a variação da frequência e da corrente, a impedância do capacitor C_o , passa a influenciar na tensão de saída V_o . Pelo teorema da máxima transferência de potência, o valor máximo de potência na saída ocorre quando a impedância da carga for igual à impedância de C_o . A figura 2.8 mostra que a tensão na carga V_L pode ser encontrada através de um divisor de tensão formado pela impedância e pela carga:

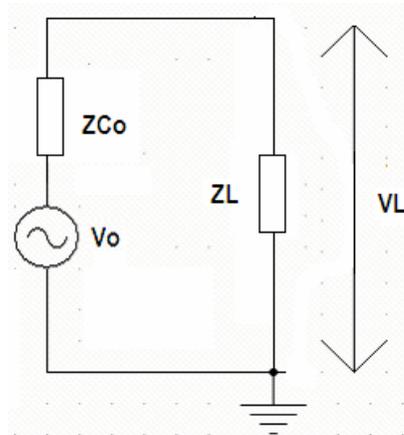


Figura 2.8. Divisor de tensão na saída

$$V_L = V_o \cdot \frac{Z_L}{(Z_L + Z_{C_o})} \quad \text{Equação 2.24}$$

E a potência elétrica máxima de saída será :

$$P = \frac{VL^2}{ZL} \quad \text{Equação 2.25}$$

Sendo $ZL = ZCo$. Sendo necessária a determinação do valor do capacitor e da frequência de ressonância.

O capacitor C_o pode ser calculado como:

$$C_o = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{t_p} \quad \text{Equação 2.24}$$

Onde: A é a área transversal à aplicação da força, ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($=8,85 \times 10^{-12}$ F/m), ϵ_r representa a permissividade relativa e t_p é a espessura do material piezocerâmico.

No capítulo 3 será apresentada também uma forma experimental para a determinação da capacitância C_o .

A impedância de C_o é dada por:

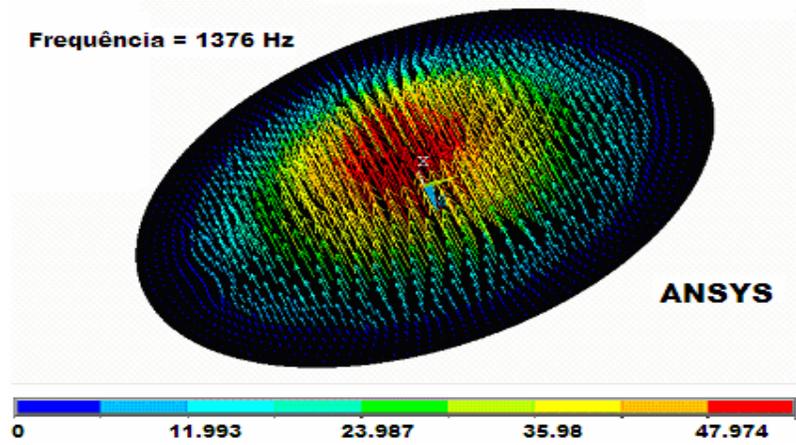
$$ZC_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad \text{Equação 2.25}$$

Onde f = frequência onde é gerada a maior amplitude de tensão de circuito aberto (ressonância).

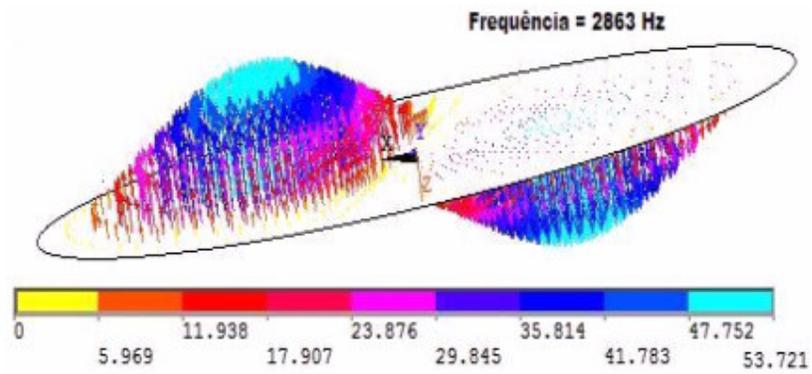
2.3.3. Frequência de Ressonância:

O unimorfo, por ser constituído de uma cerâmica piezelétrica unida a uma membrana metálica, possui ressonâncias relativas à parte elétrica e a parte mecânica. Mecanicamente o dispositivo comporta-se como um sistema massa-mola e possui vários modos de vibração com diferentes frequências de ressonância. O modo de vibração 1, é o que fornece a frequência de vibração mais baixa e a deformação que a membrana metálica sofre é mostrado na figura 2.9 a.

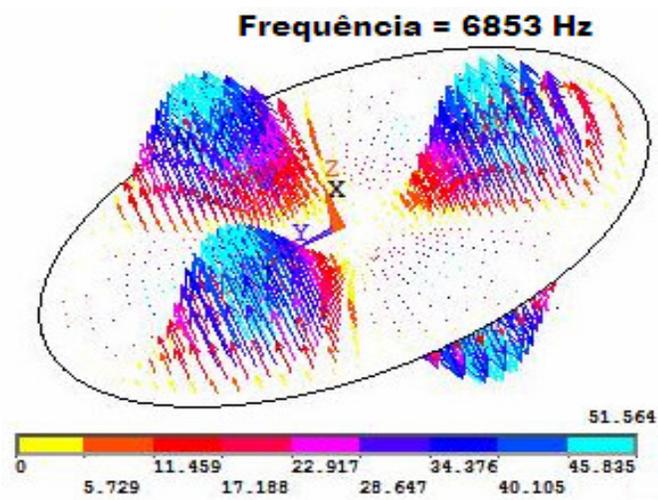
Teoricamente, no modo fundamental, a maior deflexão do unimorfo é esperada no centro do dispositivo. Este comportamento é confirmado nas simulações por elementos finitos efetuadas no programa ANSYS. Também na figura 2.9 são mostrados outros dois modos de vibração. Percebe-se que a frequência de ressonância é maior na figura 2.9 b e ainda maior na figura 2.9 c. A figura 2.9, mostra a simulação somente da membrana metálica, sem considerar a cerâmica piezelétrica. Nesta figura se percebe que no centro (em vermelho) está a maior flexão. Também se pode notar que a frequência de ressonância é de 1376 Hz para o modo 1, 2863 Hz para o modo 2 e 6853 para o modo 4.



a)



b)



c)

Figura 2.9. Modos de vibração simulados no ANSYS.

A figura 2.10 mostra a deflexão da *buzzer* com uma massa acoplada de 44,86 gramas. quando esta é fixada pelas bordas e uma massa de 44,86 gramas acoplada é acoplada ao centro. Este corresponde ao modo de vibração 1, que possui a menor freqüência de ressonância (286 Hz). Percebe-se que a massa contribui consideravelmente para a redução da ressonância como mostrado na figura 2.8.

Posteriormente será mostrado que, quanto menor a freqüência de vibração, maior será a deflexão da membrana e com isso maior tensão interna gerada, mas com a ligação da carga na saída surge uma queda de tensão na impedância de ZCo, diminuindo a tensão disponível nos terminais de saída.

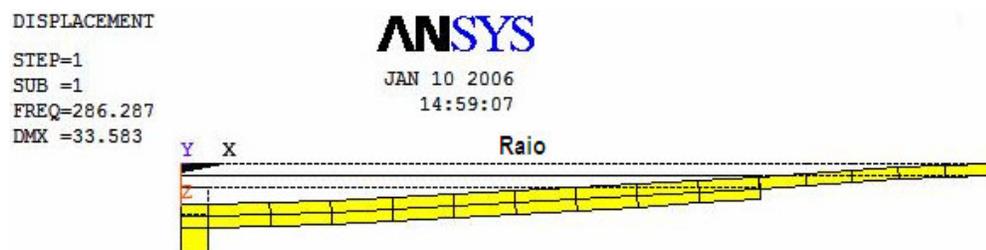


Figura 2.10. Simulação da deflexão da Buzzer no modo 1

Com o objetivo de desenvolver um modelo genérico, as freqüências de ressonâncias que serão apresentadas, foram divididas em quatro partes: uma relativa ao sistema massa-mola, uma relativa ao unimorfo, uma referente ao disco cerâmico e outra somente à membrana metálica.

Na abordagem clássica, a freqüência de ressonância de um sistema massa-mola pode ser definida como:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{mola}}}{\text{massa} + \frac{m_p}{3}}} \quad \text{Equação 2.26}$$

Onde: K_{mola} é a constante de mola, “massa” representa a massa acoplada e m_p é a massa da piezocerâmica. A constante de mola será deduzida mais adiante na equação 2.43 deste capítulo.

Um fator a ser conhecido é se existe uma coincidência de ressonância elétrica com uma freqüência de ressonância mecânica de baixo valor, proporcionando uma maior geração de energia elétrica. Para este fim o primeiro modo de ressonância mecânica de um unimorfo, pode ser conhecida através de (Li,1999):

$$F_{res} = \left(\frac{\xi}{Dequiv} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{E_p^2 \cdot t_p^4 + E_{np}^2 \cdot t_{np}^4 + 2 \cdot E_p \cdot E_{np} \cdot t_p t_{np} \cdot (2 \cdot t_p^2 \cdot 2 \cdot t_{np}^2 + 3 \cdot t_p \cdot t_{np})}{12 \cdot (E_p \cdot t_p + E_{np} t_{np}) \cdot (\rho_{equiv} t_p + \rho_{equiv} t_{np}) \cdot (1 - \nu^2)}}$$

Equação 2.27. Freqüência mecânica ressonância de um unimorfo

Onde: ξ representa é um valor adimensional que depende da forma da *buzzer* e das condições em que ela é fixada, sendo igual a 6,028 para o modo 1 e 12,42 para o modo 2 de vibração (Li,1999), também indicando que o segundo modo deve possuir uma amplitude maior de vibração. Este dado será verificado no capítulo 3. Os sub-índices p e np indicam material piezelétrico e membrana metálica. Esta equação é de fundamental importância quando se deseja projetar um unimorfo para geração de energia elétrica, pois para uma dada freqüência mecânica de trabalho, se pode encontrar as dimensões do unimorfo em função dos materiais utilizados.

O Coeficiente de Poisson tem valor de $\nu=0,31$. Este dado se refere aos dois materiais (estrutura composta).

Os fabricantes de *buzzers* informam a freqüência de ressonância e sua margem de erro, porém, nosso objetivo é obter um modelo genérico.

Os diâmetros da membrana metálica e da piezocerâmica devem comportar a mesma freqüência de ressonância no modo radial. Então no caso de um buzzer formado por latão e PZT, a relação entre o diâmetro do metal e do PZT deve ser igual a 0,65, para uma maior eficiência na operação como transdutor (Morgan,2003).

Como o unimorfo é composto por materiais diferentes e dimensões diferentes, este será representado por uma estrutura uniforme equivalente, através da consideração de diâmetro equivalente e densidade equivalente. Então:

$$\rho_{equiv} = \frac{\rho_p \cdot Volume_p + \rho_{np} \cdot Volume_{np}}{Volume_{equiv}} \quad \text{Equação 2.28}$$

$$V_p = \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 \cdot t_p \quad \text{Equação 2.29}$$

$$V_{np} = \pi \cdot \left(\frac{D_{np}}{2} \right)^2 \cdot t_{np} \quad \text{Equação 2.30}$$

$$V_{equiv} = V_p + V_{np} \quad \text{Equação 2.31}$$

$$D_{equiv} = \sqrt{\frac{D_p^2 \cdot t_p + D_{np}^2 \cdot t_{np}}{t_p + t_{np}}} \quad \text{Equação 2.32}$$

A ressonância elétrica da camada piezocerâmica do unimorfo pode ser obtida através das seguintes formas: medição, simulação no ANSYS ou equações matemáticas.

As equações que podem definir o valor da frequência de ressonância elétrica da piezocerâmica são dadas por (Pulpán,2004):

$$f_{\text{res}} = \frac{n1}{\pi \cdot D} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot (1 - \nu^2)} \cdot Se_{11}} \quad \text{Equação 2.33.}$$

Onde: n1 é uma constante relativa ao modo de vibração e possui valor de 2.05 para o modo 1. D é o diâmetro da piezocerâmica, ν é o Coeficiente de Poisson, Se_{11} é a compliância elástica (1/Módulo de Young) e ρ é a densidade do material.

De uma maneira mais prática, a frequência pode ser estimada também através de (Morgan,2003):

$$f_{\text{res}} = \frac{N_p}{D_p} \quad \text{Equação 2.34}$$

N_p é a constante de frequência para o modo diâmetro e possui unidade de Hz x m e D_p é o diâmetro da piezocerâmica em metros.

A frequência da membrana metálica como função dos parâmetros físicos, pode ser descrita como (Cobbold,1974):

$$f_{\text{res}} = \frac{2,56 \cdot t_{np}}{\pi \cdot \left(\frac{D_{np}}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{E_{np}}{3 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)}} \quad \text{Equação 2.35}$$

Onde, E_p é o módulo de Young do material e ρ sua densidade, D_{np} é o diâmetro da membrana metálica e t_{np} sua espessura

Através da equação 2.35, dados a frequência de trabalho desejada e o material utilizado, se pode estimar o diâmetro do unimorfo:

$$D_{np} = 1,805 \cdot \sqrt{\frac{t_{np}}{f_{\text{res}}} \cdot \left(\frac{E_{np}}{3 \cdot \rho \cdot (1 - \nu^2)}\right)^{1/2}} \quad \text{Equação 2.36}$$

2.3.4. Estimativa da Eficiência do gerador:

A eficiência é um dos parâmetros mais importantes a serem encontrados. De uma forma geral, pode ser definida como:

$$\eta = \frac{\text{Energia Elétrica na Saída}}{\text{Energia Mecânica Aplicada}} \cdot 100\% = \frac{\text{Potência} \cdot T/2}{\text{Energia Cinética}} \cdot 100\%$$

Equação 2.37

Nesta equação, o termo multiplicador T/2 indica que a energia elétrica calculada é avaliada somente no período/2, pois a energia mecânica aplicada, para um sistema senoidal tem valores de zero até um máximo no primeiro semiciclo, repetindo-se no seguinte semiciclo.

O cálculo da energia cinética pode ser realizado a partir da velocidade do sistema. Esta, por sua vez, pode ser obtida da integração da forma de onda da aceleração, cuja amplitude é mantida constante durante os ensaios.

$$a = a_{\text{máximo}} \cdot \text{sen}(wt) \quad \text{Equação 2.38}$$

Onde, que $a_{\text{máximo}}$ foi mantido constante em ($1 \text{ G} = 9,81 \text{ m/s}^2$) com uso de acelerômetro.

A velocidade pode ser expressa por:

$$v = \int a \cdot dt = \frac{a_{\text{máximo}}}{w} \cdot -\cos(wt) \quad \text{Equação 2.39}$$

E a deflexão correspondente:

$$X = \int v \cdot dt = \frac{a_{\text{máximo}}}{w^2} \cdot \text{sen}(wt) \quad \text{Equação 2.40}$$

Sendo $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ para as três equações.

Uma cerâmica PZT pode atingir sua deflexão máxima em aproximadamente um terço do período da frequência de ressonância, ou seja, $T_{\text{mínimo}} = \frac{1}{3 \cdot f_{\text{res}}}$ (PI,2003) e

suportar acelerações maiores que 10G. Este tempo mínimo é importante, pois ao se projetar uma cerâmica será necessário saber se ela poderá suportar esta deflexão máxima. Com base nesta informação, podemos calcular a energia cinética máxima no sistema e determinar o limite para a massa acoplada:

$$W_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \text{Equação 2.41}$$

Onde: m é valor da massa acoplada e v é a velocidade (equação 2.38).

A massa a ser acoplada é uma importante variável no projeto de um gerador genérico. Ela pode ser aproximada reescrevendo a equação 2.26 e resultará:

$$\text{massa}_{\text{acoplada}} = \frac{K_{\text{mola}}}{f_{\text{res}}^2 \cdot 4 \cdot \pi^2} - \frac{mp}{3} \quad \text{Equação 2.41}$$

Onde mp é a massa da piezocerâmica e K_{mola} é a constante de mola formada pelo buzzer.

O conceito de constante de mola não se aplica integralmente ao PZT (PI,2003), pois apresenta variações em função da amplitude de sinal, modo de operação estático ou dinâmico (contínuo) e condições de eletrodos abertos ou em curto-circuito. Este fato foi evidenciado nas simulações do software ANSYS, pois ao se executar as simulações com eletrodos abertos ou em curto-circuito, a deflexão máxima possuía valores diferentes e esta depende da rigidez (constante de mola) do material.

A polarização é afetada pela força e pela tensão elétrica aplicada. O processo de polarização deixa uma deformação (*strain*) residual que depende da magnitude da polarização. Quando se aplica uma força externa à cerâmica PZT polarizada, a mudança dimensional depende da rigidez e da variação na deformação residual. A equação $\text{Deflexão } X = \frac{\text{Força}}{\text{Cte. Mola}}$ é válida somente para forças de baixas

intensidades. Para forças de maiores intensidades deve-se acrescentar um termo na constante de mola para descrever a influência da mudança de polarização.

A constante de mola para os modos estático e dinâmico possui valores diferentes e não constantes. Então a constante de mola possui relativo grau de dificuldade na sua determinação. Entretanto, ela pode ser estimada através de medidas de laboratório do uso dos valores medidos na equação 2.26,

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{mola}}}{m + \frac{mp}{3}}} : \quad \text{Equação 2.42}$$

$$K_{\text{mola}} = f_{\text{res}}^2 \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot \left(m + \frac{mp}{3} \right)$$

A constante de mola também pode estimada através do conhecimento da deflexão e velocidade do sistema, na frequência de ressonância, como sendo:

$$K_{\text{mola}} = \frac{m \cdot v^2}{X^2} \quad \text{Equação 2.43}$$

Esta constante de mola inclui o efeito da piezocerâmica e da membrana metálica.

Onde m é a massa acoplada.

GERADOR PIEZELÉTRICO: ASPECTOS CONSTRUTIVOS E RESULTADOS

3.1. Aspectos construtivos:

A figura 3.1 ilustra, em diagrama de blocos, a idéia do sistema para geração piezométrica de energia elétrica e carga de baterias. O principal objetivo deste estudo é o desenvolvimento e caracterização de um sistema de baixo custo para captação de energia vibracional e sua conversão em energia elétrica, e o condicionamento desta energia para a carga das baterias atualmente utilizadas em equipamentos eletrônicos portáteis.

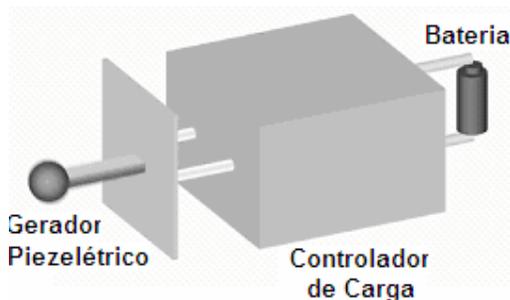
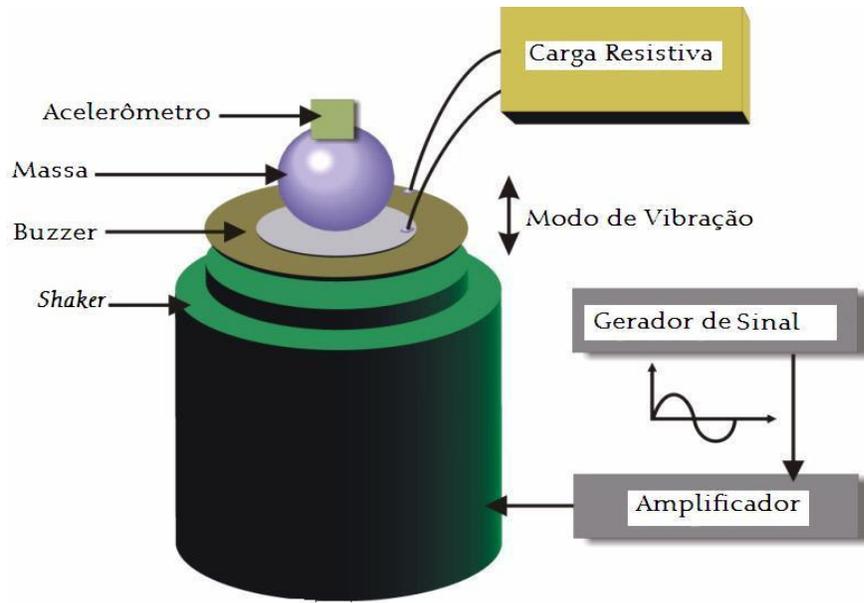


Figura 3.1. Conjunto gerador piezométrico

Para a caracterização do gerador, desenvolveu-se um sistema de ensaio capaz simular as vibrações da fonte primária de energia sob diversas condições. O sistema é mostrado Figura 3.2:



a)

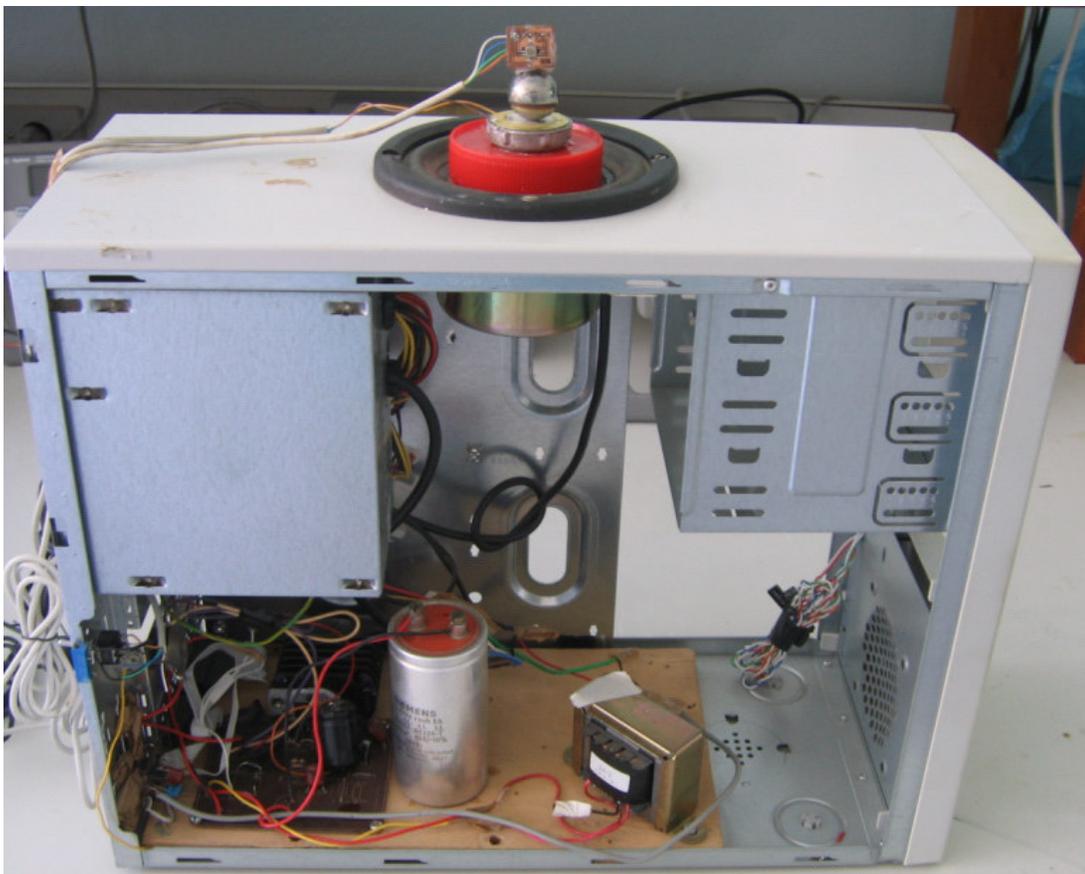


Figura 3.2. a). Esquema do sistema de testes; b) Fotografia do sistema de teste, montado em um gabinete de computador.

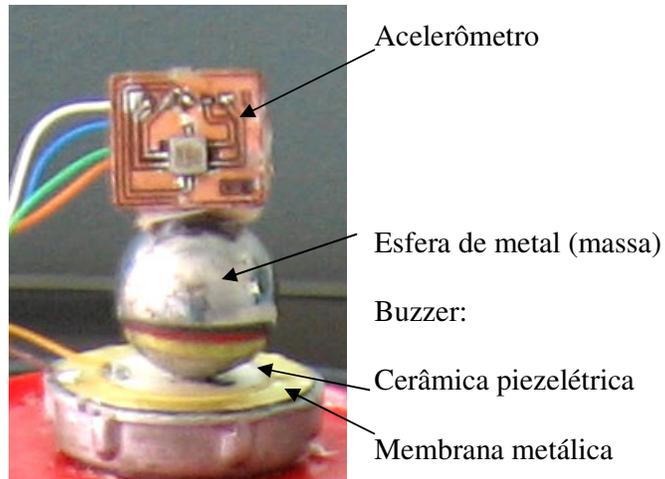


Figura 3.3 b. Detalhe do gerador com o acelerômetro acoplado.

O gerador de vibrações mecânicas, usualmente chamado de *shaker*, é acionado por um amplificador de áudio integrado (LM 3875, ANEXO IV) e um alto-falante de 12,7 cm (5"). O acelerômetro, montado com base no circuito integrado ADXL 203 (ANEXO IV), colado na massa é utilizado para manter a aceleração constante nas diversas condições de teste, compensando a não-planicidade da resposta em frequência do alto-falante. A medição da aceleração é importante ainda para determinação da energia vibracional fornecida ao gerador. O acelerômetro possui sensibilidade de 1 V/G e uma resolução de 1 mG. O sinal aplicado no alto-falante é obtido em um gerador de sinais Agilent modelo 33120A. A massa e o acelerômetro foram colados com adesivo instantâneo à base de cianocrilato.

A cerâmica piezoeétrica utilizada no unimorfo é classificada comercialmente como PZT-5A. Suas características mecânicas, juntamente com as da membrana metálica são resumidas na tabela 3.1 .

Tabela 3.1. Características do unimorfo utilizado na pesquisa

Material	Módulo de Young (Pa)	Espessura (m)	Densidade Kg/m ³	Diâmetro (m)	g ₃₃ (Vm/N)
Piezocerâmica	65x10 ⁹	0.25x10 ⁻³	7700	25x10 ⁻³	24.8x10 ⁻³
Latão	91x10 ⁹	0.25x10 ⁻³	8400	35x10 ⁻³	

3.2. Resultados Experimentais do Gerador Piezelétrico:

3.2.1. Determinação das frequências de ressonâncias:

As primeiras medidas foram realizadas para determinar a frequência de ressonância do buzzers, pois apesar do fabricante fornecer este dado, se buscava um modelo genérico, em que o projetista possa alterar características segundo a aplicação desejada.

A frequência de ressonância do unimorfo pode ser determinada pela equação 2.27 do capítulo 2:

$$F_{res} = \left(\frac{\xi}{D_{equiv}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{E_p^2 \cdot t_p^4 + E_{np}^2 \cdot t_{np}^4 + 2 \cdot E_p \cdot E_{np} \cdot t_p \cdot t_{np} \cdot (2 \cdot t_p^2 \cdot 2 \cdot t_{np}^2 + 3 \cdot t_p \cdot t_{np} \cdot)}{12 \cdot (E_p \cdot t_p + E_{np} \cdot t_{np}) \cdot (\rho_{equiv} t_p + \rho_{equiv} t_{np}) \cdot (1 - \nu^2)}}$$

Onde os sub-índices “p” e “np” se referem a piezocerâmica e à membrana metálica respectivamente.

Utilizando-se os dados da tabela 3.2 e as equações do capítulo 2:

$$\rho_{equiv} = \frac{\rho_p \cdot Volume_p + \rho_{np} \cdot Volume_{np}}{Volume_{equiv}} \quad \rho_{equiv} = 8,164 \text{ kg/m}^3$$

$$V_p = \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 \cdot t_p = 1,227 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \quad V_{np} = \pi \cdot \left(\frac{D_{np}}{2} \right)^2 \cdot t_{np} = 2,405 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$V_{equiv} = V_p + V_{np} = 3,632 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$D_{equiv} = \sqrt{\frac{D_p^2 \cdot t_p + D_{np}^2 \cdot t_{np}}{t_p + t_{np}}} = 30,414 \times 10^{-3} \text{ m}$$

A frequência de ressonância obtida através da equação 2.27 para o buzzer utilizado neste experimento: **F_{res}=2208 Hertz.**

Tabela 3.2. Características dimensionais de alguns unimorfos disponíveis no mercado.

Características	Dp (mm)	tp (mm)	Dnp (mm)	tnp(mm)	Metal
Espécimes					
Espécime 1	35	0.25	25	0.25	Latão
Espécime 2	27	0.25	20	0.25	Latão
Espécime 3	50	0.25	30	0.25	Latão
Espécime 4	15	0.20	11	0.25	Latão

Tabela 3.3. Comparação das freqüências de ressonâncias calculadas com a eq.2.27 com as especificações dos fabricantes.

Espécimes	Freqüência de Ressonância (Hz)		
	Eq. 2.27	Fabricante 1	Fabricante 2
Espécime 1:	2208	2600 ±500	2600±300
Espécime 2	3710	4200±500	4200±500
Espécime 3	1082	1300±500	---
Espécime 4	12020	12000±1000	---

Na tabela 3.3, se percebe uma aproximação muito boa, entre os valores calculados através da equação 2.27 e os valores especificados pelos fabricantes. Foram realizados diversos cálculos, alterando-se os valores da espessura e diâmetro, tanto da cerâmica, quanto do metal e as ressonâncias mecânicas encontradas permaneceram dentro do valor de tolerância do fabricante, validando a equação 2.27. As freqüências de ressonância também foram calculadas através dos softwares Mathcad e simuladas no ANSYS. Nestes casos, foram calculadas apenas as ressonâncias da membrana metálica isoladamente. A freqüência de ressonância no Mathcad foi encontrada utilizando a seguinte equação (Cobbold,1974):

$$f_{\text{res}} = \frac{2,56 \cdot t_{np}}{\pi \cdot \left(\frac{D_{np}}{2}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{E_{np}}{3 \cdot \rho_p \cdot (1 - \nu^2)}} \quad \text{Equação 2.35}$$

Onde t_{np} é a espessura do metal em metros, ρ_p é a densidade do material em Kg/m^3 , E_{np} é o módulo de Young em GPa, D é o diâmetro da membrana metálica e ν é o coeficiente de Poisson. Para a membrana de latão utilizada, especificada na

tabela 3.1, encontramos uma frequência de ressonância mecânica de 1380 Hz encontrada através da equação 2.35, contra 1376 Hz calculada pelo ANSYS, mostrada anteriormente na figura 2.8.

A ressonância elétrica foi obtida de três formas diferentes: através de medições, simulação com o ANSYS e da utilização das equações 2.33 e 2.34 no Mathcad.

No software ANSYS, a frequência encontrada nestes três métodos foi de 83 KHz. A medida da frequência de ressonância utilizando o método descrito pelo fabricante Morgan,2003, apresentou um valor de 81 KHz. Através das equações 2.33 e 2.34, a frequência de ressonância elétrica da piezocerâmica será:

$$f_{\text{res}} = \frac{n1}{\pi \cdot D} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot (1 - \nu^2)} \cdot Se_{11}} = 82,25 \times 10^3 \text{ Hz}$$

Sendo $Se_{11} = 14,2 \times 10^{-12}$ e $n1$ é uma constante função do modo de vibração, que para o modo 1 possui valor igual a 2,05 (Morgan,2003).

A frequência de ressonância elétrica também pode ser encontrada por:

$$f_{\text{res}} = \frac{N_p}{D_p} = \frac{2002}{25 \times 10^{-3}} = 80,08 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

Estes dados confirmam uma ressonância elétrica em torno de 80 KHz.

Como as frequências de ressonâncias, mecânica e elétrica estão muito distantes entre si, utilizando os dados da tabela 1.4, que descreve estratégias de projeto, a melhor abordagem neste caso parece ser a da potência versus massa acoplada, sendo esta a opção adotada no projeto.

3.2.2. Tensão Elétrica Gerada:

Conforme discutido no capítulo 2, a massa acoplada representa um importante fator na conversão de energia pelo piezogerador. Para exemplificar o seu efeito, nas medidas iniciais, realizadas sem a massa acoplada, as tensões geradas permaneceram na ordem de milivolts. Após a colagem das esferas, as tensões geradas foram elevadas para a ordem de volts, considerando-se as mesmas condições de carga na saída do gerador.

As experiências foram realizadas com três esferas de aço de massas diferentes: 16,35 g, 32,65 g e 44,86 g. A massa da piezocerâmica foi medida através

de uma balança eletrônica e seu valor é de 2,59 gramas. A tensão obtida na experiência com a massa de 16,35 g foi muito pequena e será desconsiderada. Nos testes de vibração, o *buzzer* é fixado nas bordas através de adesivo instantâneo a base de cianocrilato.

O primeiro teste realizado com o gerador consistiu em encontrar a frequência em que o gerador produzia a maior tensão elétrica com os terminais a vazio. Para isto, o gerador de funções foi programado para executar uma varredura de frequências entre 200 Hz e 850 Hz. A amplitude do sinal senoidal de aceleração foi mantida constante durante os ensaios ($1G$ ou $9,81 \text{ m/s}^2$). O valor inicial de 200 Hz foi escolhido por estar posicionado longe da frequência mecânica natural (300 Hz) do sistema massa-mola, obtida como resposta ao impulso com a massa de 44,86 g acoplada à cerâmica. A resposta do sistema a um degrau de força é mostrada na figura 3.4:

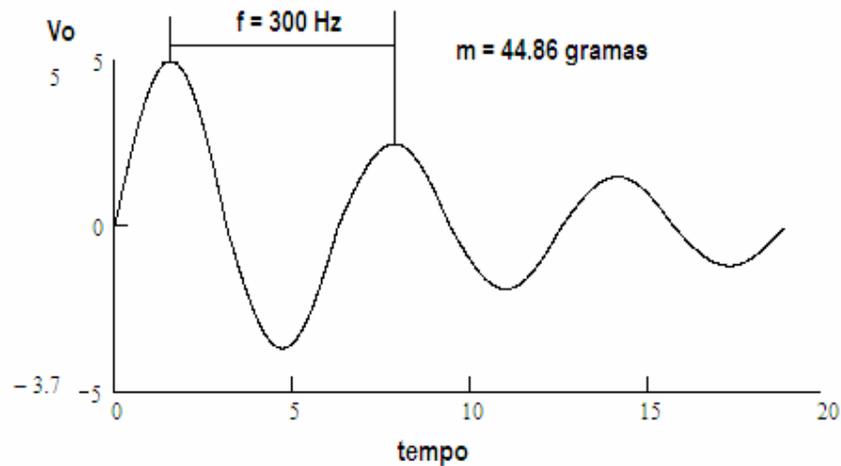


Figura 3.4. Medida da resposta do gerador a um degrau de força

Na resposta ao degrau de entrada observa-se que a os picos positivos possuem valores superiores aos picos negativos, conforme já havia sido relatado por (Keawboonchuay,2003). Observa-se ainda, a oscilação do sistema na frequência natural de 300 Hz após a aplicação do degrau de força. Também é importante ressaltar que, sob impacto, o microgerador se comporta como um sistema amortecido e apenas três a quatro dos primeiros períodos de oscilação possuem tensão suficiente para alimentar o circuito integrado e carregar a bateria. Durante a varredura da frequência de excitação com o gerador em aberto observa-se a elevação abrupta da tensão de saída a partir de 305 Hz, em consequência da aproximação da frequência do primeiro modo ressonância mecânica do sistema. O

ponto geração máxima ocorre em 330 Hz para a massa de 44,86 gramas. Esta frequência é um ligeiramente superior aos 300 Hz mostrados na figura 3.4. A massa de 32,65 gramas propiciou uma ressonância de 350 Hz, sendo seu valor apenas 6% superior ao valor que pode ser encontrado através da equação 2.26

Conforme foi discutido no capítulo 1, a condição de deflexão máxima é influenciada pela carga ligada aos terminais elétricos da cerâmica, uma vez que a circulação de corrente altera a rigidez do material. Assim, o desvio na frequência de ressonância deve-se à alteração na rigidez e da constante de mola do sistema em resposta à variação nas condições de contorno da constante S_{33} . Para massa de 32,65 g a ressonância medida no intervalo foi de 335 Hz, sendo mais próxima do valor de 330 Hz, provavelmente em função do seu menor efeito no sistema massa-mola.

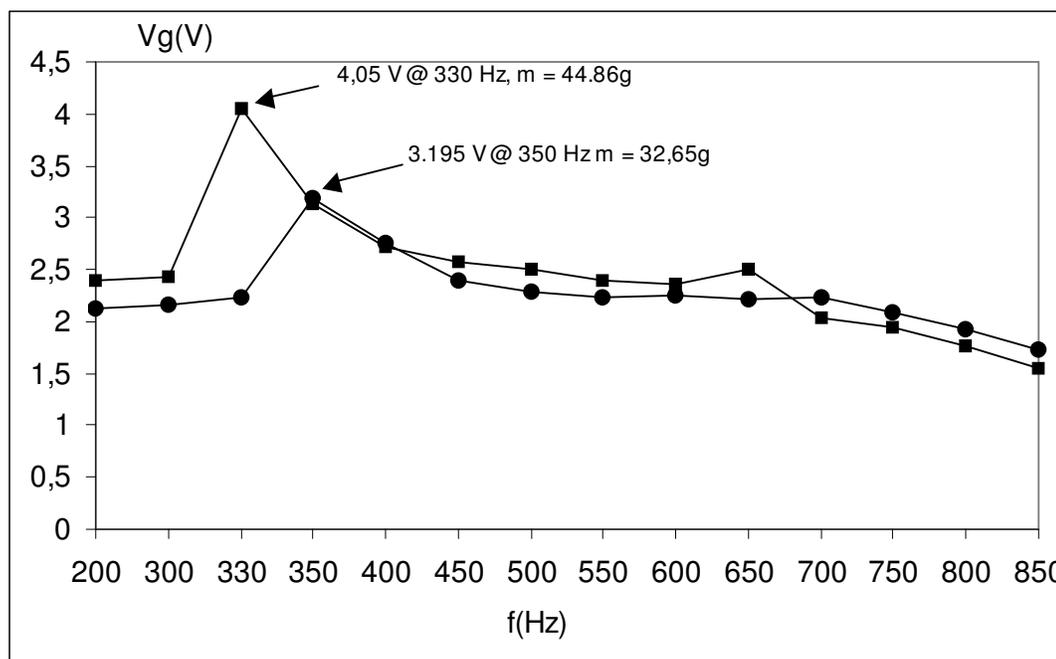


Figura 3.5. Tensão de circuito aberto em função da frequência

Como apresentado na tabela 1.4 do capítulo 1 e na equação 2.20 do capítulo 2, para uma dada aceleração, quanto maior a massa acoplada, maior será a geração de energia elétrica. Esta observação pode ser comprovada nos ensaios das 4.5 e 4.6. Comparando-se os valores para a tensão de saída em circuito aberto obtidos nos ensaios com os valores calculados com base na equação 2.20:

$$V_o = \frac{6 \cdot g_{31} \cdot M \cdot J \cdot (1+J)}{D \cdot t_a \cdot [1+J \cdot G^2 + 2 \cdot J \cdot (2+3 \cdot G+2 \cdot G^2)]}$$

A tabela 3.4 compara os valores medidos e teóricos, encontrados através da equação 2.20.

Tabela 3.4. Comparação de valores de tensão medida e gerada.

massa (gramas)	V_o medido (V)	V_o calculado (V)
32,65	4,05	4,05
44,86	3,195	3,00

Pode-se constatar uma boa aproximação entre os valores medidos vistos nas figuras 4.5 e 4.5 e os calculados, validando a equação 2.20.

3.2.3. Cálculo do Capacitor C_o e da Impedância Capacitiva:

A partir da frequência de ressonância medida (330 Hz), podemos calcular o valor da impedância C_o . Utilizando-se as especificações da cerâmica do unimorfo: $\epsilon_r = 3400$ e $D_p = 25 \times 10^{-3}$ e efetuando-se o cálculo da área:

$$\text{Área} = A = \pi \cdot \left(\frac{D_p}{2} \right)^2 = 491 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot$$

E substituindo os valores na equação 2.24, do capítulo 2, obtêm-se o seguinte valor para C_o :

$$C_o = \frac{8,85 \times 10^{-12} \cdot 1700 \cdot 491 \times 10^{-6}}{0,25 \times 10^{-3}} = 35 \text{ nF} \cdot$$

Este resultado pode ser comparado ao valor especificado pelo fabricante e ao resultado das medidas de bancada.

Segundo o fabricante (Morgan,2003), C_o tem valores da ordem de 35 nF.

O método experimental utilizado para medição de C_o consiste em(Morgan, 2003):

- Aplicar uma tensão conhecida sobre a cerâmica, variando-se a frequência de forma controlada, abaixo da ressonância,
- Medir a tensão direta sobre os terminais da cerâmica,
- Acrescentar um resistor em série com a piezocerâmica e medir sua corrente. Esta será a corrente do circuito.

d) Calcular a impedância através da equação $Z=(V_{cer}/(V_{resistor}/Resistor))$.
Os valores de V_{cer} e $V_{resistor}$ foram medidos na frequência de 100 Hz e o valor encontrado para Z foi 46.284 k Ω .

O esquema utilizado na medição é ilustrado na figura 3.6:

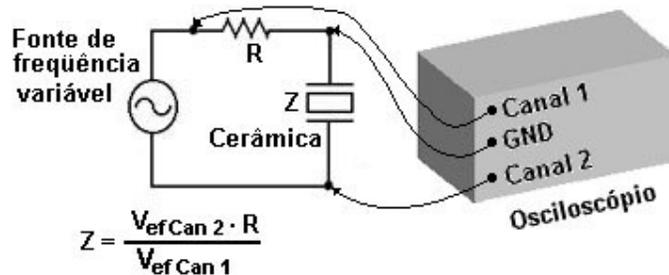


Figura 3.6. Esquema para medição da impedância capacitiva

e) A partir de Z , a C_o pode ser facilmente calculado por:

$$C_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \text{frequência} \cdot Z}$$

O valor de C_o encontrado nestas condições foi 34.39 nF. Este valor está muito próximo (98,2%) da especificação do fabricante e do valor obtido através da equação 2.27. Assim, adotamos um valor de 35 nF para C_o neste projeto.

E a reatância capacitiva resultante nestas condições:

$$ZC_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 330 \cdot 35 \times 10^{-9}} = 12,86 \text{ K}\Omega$$

Portanto, a carga a ser alimentada pelo gerador para que este opere em condições de máxima transferência de potência deve ser de 12,86 K Ω .

Como a maior tensão gerada foi obtida com a massa de 44,86 g, todos resultados subseqüentes referem-se a estas condições, salvo quando informado o contrário.

3.2.4. Estimativa da Potência Elétrica Gerada

Para uma carga de 12,86 k Ω a potência elétrica de saída pode ser calculada segundo a equação 2.24 (capítulo 2):

$$V_L = V_o \cdot \frac{Z_L}{(Z_L + ZC_o)} = 4,05 \cdot \frac{12,86 \times 10^3}{12,86 \times 10^3 + 12,86 \times 10^3} = 2.045 \text{ V}$$

E a potência elétrica de pico estimada será :

$$P_{\text{pico}} = \frac{VL^2}{ZL} = \frac{2,045^2}{12,86 \times 10^3} = 325,2 \times 10^{-6} \text{ W}$$

A potência RMS estimada será:

$$P_{\text{RMS}} = \frac{(VL/1,4142)^2}{12860} = 162,6 \times 10^{-6} \text{ W} . \text{ Este valor está muito próximo da potência}$$

medida (diferença de 1.9%) mostrado na figura 4.9.

3.2.5.Tensão de Saída

Para o projeto do circuito de condicionamento de energia para a carga de baterias, é preciso conhecer a tensão de saída do gerador. A figura 3.7 mostra o comportamento da tensão de saída em função da freqüência das vibrações mecânicas com uma carga de 12,86 kΩ ligada aos terminais do gerador.

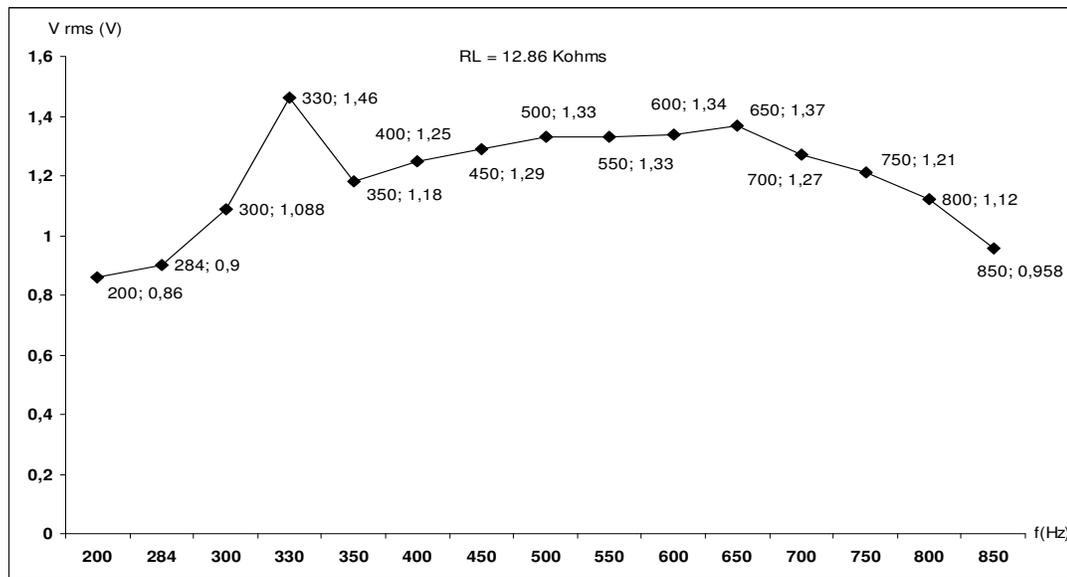


Figura 3.7. Tensão gerada versus freqüência aplicada

A figura mostra que a tensão máxima ocorre em 330 Hz, confirmando os dados obtidos com o gerador com os terminais em aberto (figura 3.5). Uma segunda ressonância, com menor intensidade pode ser observada em 650 Hz.

3.2.6. Potência Gerada

A partir dos valores obtidos nas medições de tensão (figura 4.8) e da resistência de carga (12,86 kΩ), foram calculados os valores da potência gerada como função da frequência, mostrados na figura 3.8:

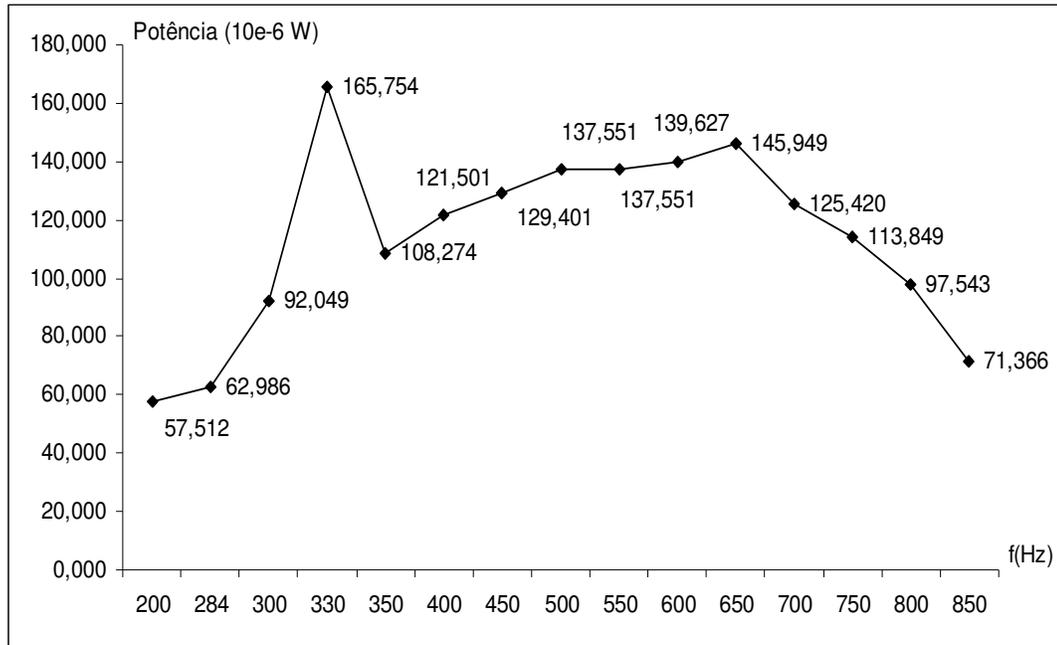


Figura 3.8. Potência Elétrica RMS Medida gerada versus frequência aplicada – Carga = 12,86 kΩ

Nesta figura, se percebe que a maior potência (165,754 μW), ocorre como esperado, na frequência de 330 Hz. Esta potência elétrica é 13.6% superior ao valor da potência gerada na segunda ressonância que possui valor de 145,949 μW.

3.2.7. Constante de Mola:

Conforme descrito no capítulo 2, conhecendo-se a aceleração do sistema se pode encontrar a velocidade e a deflexão da frequência de ressonância do sistema massa-mola e a constante de mola pode ser estimada pela equação 2.42:

$$K_{\text{mola}} = \frac{m \cdot v^2}{X^2} \cdot$$

Para a ressonância de 300 Hz, a qual é a ressonância natural da massa de 44,86 gramas (ver figura 3.4) , a velocidade será $5,20 \times 10^{-3}$ m/s e a deflexão será $2,76 \times 10^{-6}$ e constante de mola:

$$K_{\text{mola}} = 159 \times 10^3 \text{ N/m}$$

A constante de mola através da equação 2.26, para frequência de 300 Hz será:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{mola}}}{\text{massa} + \frac{m_p}{3}}} \rightarrow K_{\text{mola}} = 159,8 \times 10^3 \text{ N/m}.$$

Mostrando uma boa aproximação da equação 2.42

3.2.8. Cálculo da Massa Acoplada:

Segundo o fabricante (Morgan,2003) a máxima deflexão que poderá suportar o unimorfo será 127 μm , e a força máxima de 3,34 N. Com estes dados podemos estimar a maior massa a ser acoplada, a tensão gerada e a frequência de ressonância esperada. A massa máxima será:

$$\text{massa}_{\text{máxima}} = \frac{3.34\text{N}}{\text{aceleração}} \quad \text{Equação 3.1}$$

se $a = 9,81 \text{ m/s}^2$, então **massa_{máxima} = 340 gramas**. Esta massa provocará em repouso a deflexão máxima e ao ser vibrada este limite seria excedido (ver figura 3.11). Então se deve especificar uma massa limite para cada amplitude de vibração. Como exemplo, se a aceleração for de 1G = 9,81 m/s^2 a massa limite será 340 gramas / 2 = 170 gramas.

A figura 3.9 mostra um gráfico da massa limite em função da aceleração:

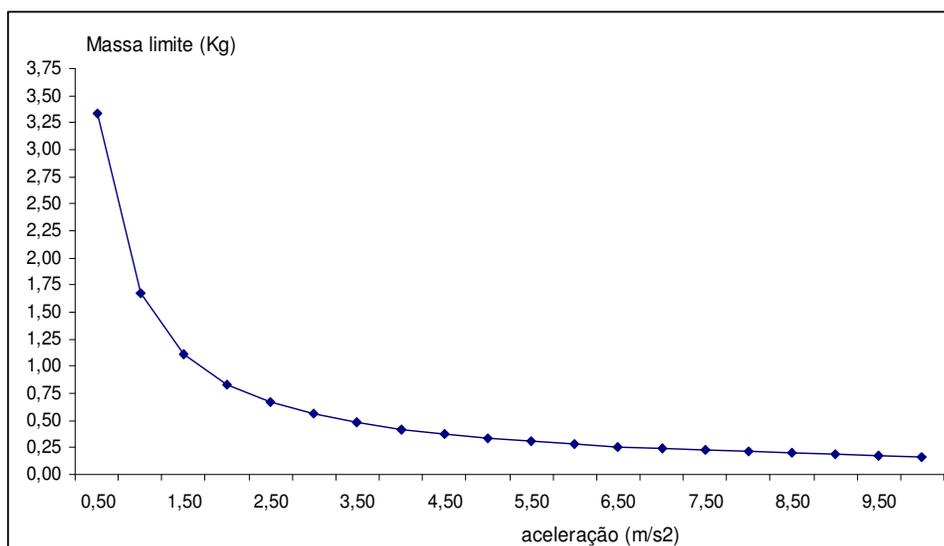


Figura 3.9. Massa Limite versus aceleração

Esta figura mostra valores teóricos, pois segundo a aplicação do microgerador, acoplar, por exemplo, uma massa de 3,6 kg seria muito difícil. Entretanto nos fornece dados importantes para a estimativa da massa máxima, segundo a aceleração que estiver submetido o gerador.

A tensão elétrica máxima estimada através equação 2.20 do capítulo 2 será:

$$V_o = \frac{6 \cdot g_{31} \cdot M \cdot J \cdot (1+J)}{D \cdot t_a \cdot [1+J \cdot G^2 + 2 \cdot J \cdot (2+3 \cdot G+2 \cdot G^2)]} = 15,5 \text{ V}$$

Se for considerada a massa limite de 170 gramas para aceleração = 1G, a frequência de ressonância estimada através da equação 2.26 do capítulo 2 seria:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K_{\text{mola}}}{\text{massa} + \frac{m_p}{3}}} = 149 \text{ Hz}$$

3.2.9. Eficiência do Gerador

Para o calculo da eficiência, são necessários os valores da energia elétrica gerada e da energia mecânica vibracional fornecida ao gerador. A energia cinética é determinada a partir da função da velocidade instantânea da massa.

A deflexão instantânea no centro do buzzer é função da frequência aplicada, e pode ser calculada segundo a equação 2.39:

$$X = \int v \cdot dt = \frac{a_{\text{máximo}}}{\omega^2} \cdot \text{sen}(\omega t), \text{ Cujas amplitudes são plotadas em função da}$$

Ofreqüência na figura 3.10:

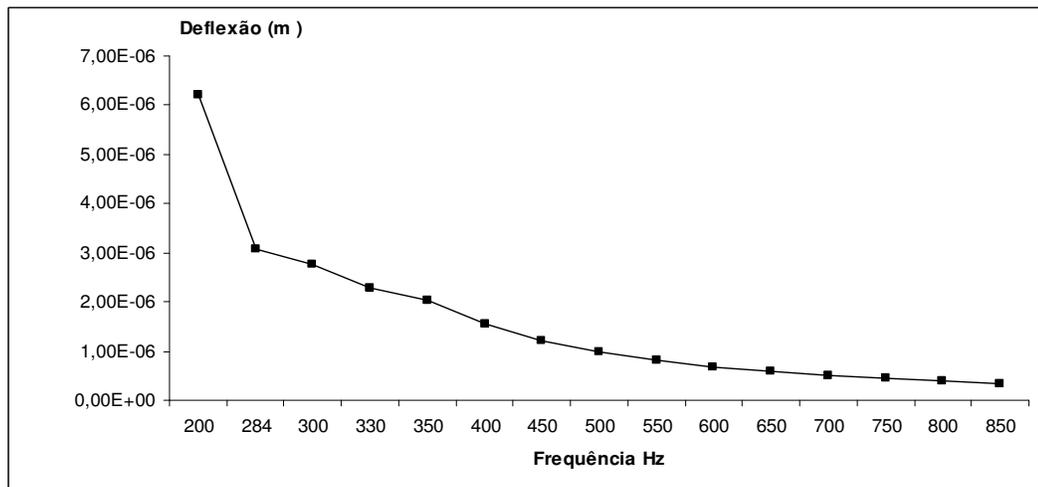


Figura 3.10. Deflexão versus frequência

Como a aceleração foi mantida constante, para baixas frequências a deflexão é maior e diminuindo com o aumento da frequência. A medida que a frequência diminui, a energia cinética injetada ao gerador aumenta, pois aumenta a velocidade (equação 2.39 e figura 3.12), como função da aceleração ter sido mantida constante.

Observe que com o acoplamento da massa, gerador é pré-tensionado. Esta deflexão estática, promove um deslocamento no eixo de vibração da cerâmica conforme pode ser visto na figura 3.11:

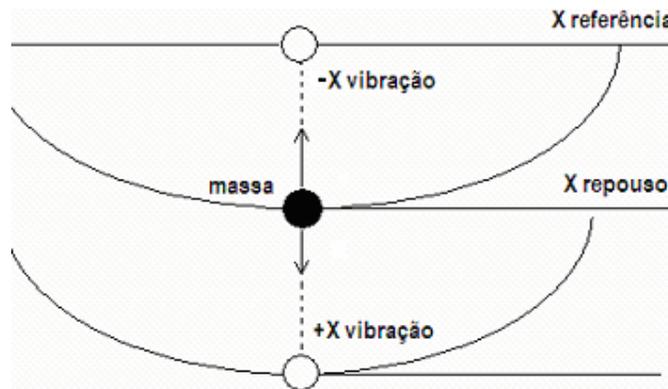


Figura 3.11. Movimento teórico da massa e deflexão do PZT

O efeito do pré-tensionamento estático é o deslocamento do ponto médio das deflexões, mostrado na figura 3.11 como X_{repouso} . Embora o deslocamento no eixo de vibração não influencie significativamente a energia gerada pelo sistema, este efeito deve ser levado em conta na definição dos limites de potência mecânica aos quais o dispositivo é submetido. A deflexão estática foi simulada no ANSYS, obtendo-se $X_{\text{repouso}} = 15 \mu\text{m}$ para eletrodos em curto-circuito e $14 \mu\text{m}$ para os eletrodos em aberto.

A energia fornecida ao gerador pode ser calculada com base em sua componente cinética. Com a velocidade obtida através da equação 2.39:

$$v = \int a \cdot dt = \frac{a_{\text{máximo}}}{\omega} \cdot -\cos(\omega t)$$

Podem ser determinados os valores para cada frequência de entrada. O comportamento das amplitudes de velocidades atingidas pela massa acoplada ao gerador são mostradas na figura 3.12.

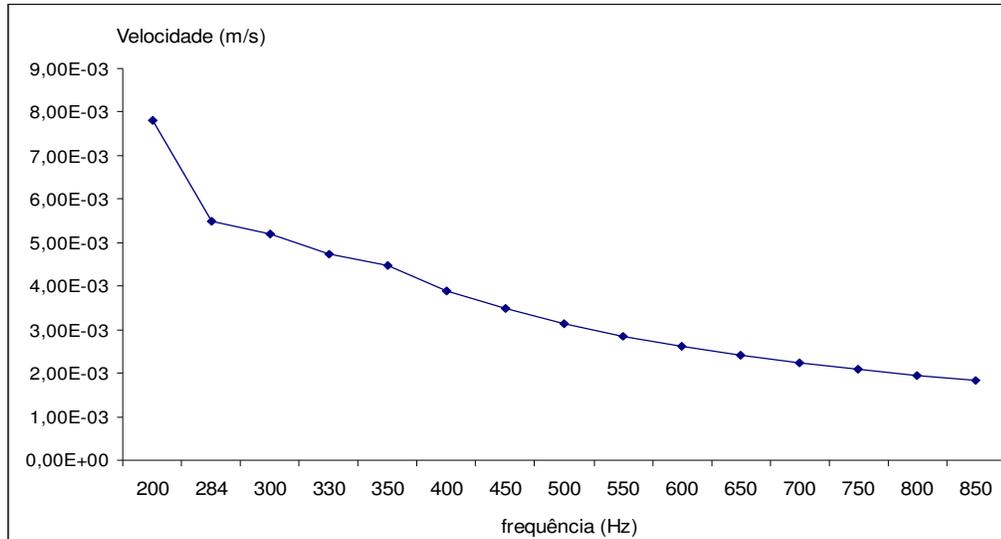


Figura 3.12. Velocidade do sistema versus frequência aplicada.

Assim, a energia cinética fornecida ao gerador:

$$W_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} \cdot \text{massa} \cdot \text{velocidade}^2$$

A energia elétrica, por sua vez pode ser obtida:

$$W_{\text{elétrica}} = \text{Potência Elétrica Medida} \cdot \frac{\text{Período}}{2}$$

Onde o período = 1/frequência

A figura 3.13 mostra as energias na entrada e na saída do gerador no intervalo de frequências dos ensaios:

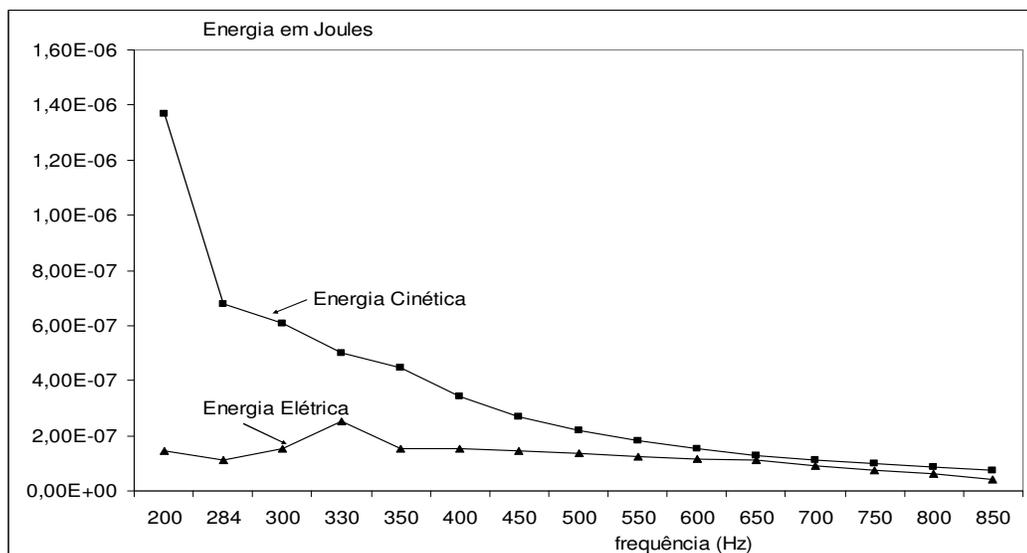


Figura 3.13. Energias em função da frequência

Finalmente, a eficiência pode ser calculada conforme sua definição:

$$\eta = \frac{\text{Energia Elétrica na Saída}}{\text{Energia Mecânica Aplicada}} \cdot 100\% = \frac{\text{Potência} \cdot T/2}{\text{Energia Cinética}} \cdot 100\% .$$

O comportamento da eficiência do gerador no intervalo de frequência pode ser observado na figura 3.14:

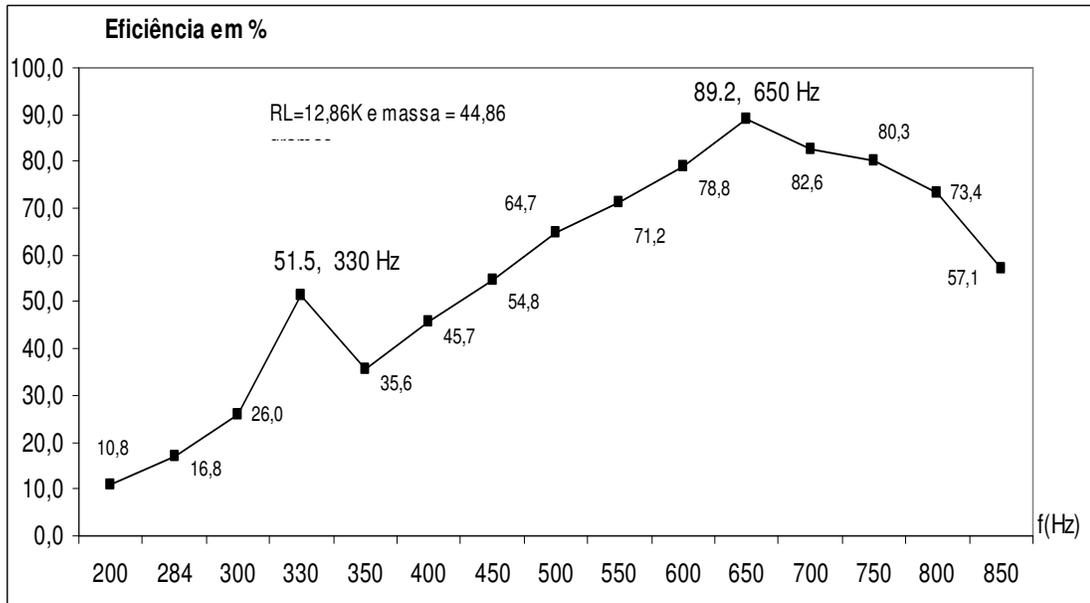


Figura 3.14. Eficiência versus frequência

Este gráfico foi obtido com a massa de 44,86 gramas e a resistência de carga com valor de 12,86 kΩ.

Em 330 Hz, aparece a primeira ressonância do micro-gerador e em 650 Hz aparece uma segunda ressonância. A frequência de 330 Hz, é uma ressonância mecânica. Nesta segunda ressonância se encontra a maior eficiência do microgerador. Este fato pode ser compreendido analisando a curva da impedância da *buzzer* (sem a massa acoplada). Nesta curva aparece a primeira ressonância elétrica em 1230 Hz e uma anti-ressonância em 1310 Hz. Na ressonância se encontra a menor impedância do gerador.

Com a inserção da massa ao gerador, esta ressonância foi deslocada para 650 Hz. Então mesmo que a amplitude da tensão gerada seja maior em 330 Hz, a maior eficiência vai ser encontrada em 650 Hz, na qual se encontra a menor impedância em comparação a 330 Hz, fornecendo à carga uma corrente maior. Este fato se pode perceber na figura 3.7 que a diferença de tensão gerada entre estas duas

freqüências é pequena (90 milivolts), enquanto a impedância apresentou grande variação: de 12,21 k Ω (330 Hz) até 2,39k Ω (650 Hz) (figura 3.15).

Outra constatação foi que a *buzzer* opera melhor na segunda ressonância em comparação com a primeira, pois como já foi descrito anteriormente, e segundo o fabricante, a *buzzer* opera eficientemente em 2500 Hz que é a segunda ressonância. Então, com a massa acoplada estas freqüências (primeira e segunda ressonâncias) foram deslocadas para 330 Hz e 650 Hz respectivamente. As medidas comprovaram que acoplando a massa de 44,86 gramas, a segunda ressonância (650 Hz) manteve a relação de maior geração. A curva de impedância versus frequência é mostrada na figura 3.15.

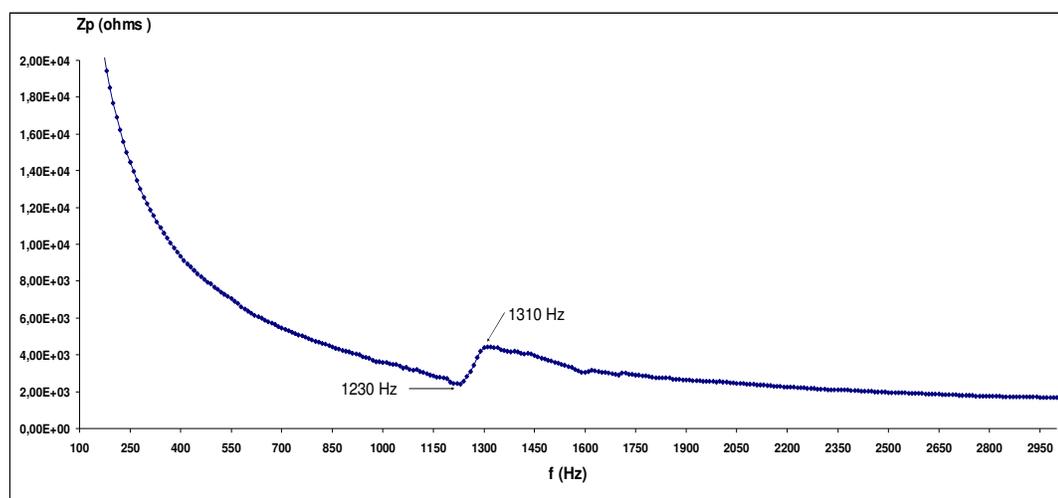


Figura 3.15. Impedância da *buzzer* como função da frequência.

Para se conseguir uma eficiência maior, se necessitaria que a membrana metálica possuísse uma rigidez maior, de tal forma que a ressonância do conjunto massa-mola passasse de 650 Hz para 1230 Hz (ressonância elétrica medida). Também se poderia diminuir a massa, porém isto causaria uma diminuição da amplitude da tensão gerada. Com as equações apresentadas no capítulo 2 se pode facilmente encontrar as ressonâncias envolvidas através das variáveis envolvidas como, diâmetro da cerâmica e da membrana metálica, tipo de membrana: latão, aço, etc, densidade, espessura.

A eficiência encontrada é comparada a referenciais mostrados na tabela 3.4. Sobre o valor máximo da eficiência encontrada e a tabela 3.4 se deve fazer os seguintes comentários:

a) A frequência de ressonância elétrica da *buzzer* encontrada foi de 80 KHz. Esta foi encontrada e confirmada por três maneiras diferentes. Através de equações que descrevem o modelo, através do software ANSYS e através de medidas com o osciloscópio. A frequência de ressonância mecânica da *buzzer* encontrada foi de 2200 Hz. Como esta frequência não são de ordem semelhantes, o *buzzer* não possui o melhor rendimento,

b) O acoplamento mecânico da *buzzer* com a massa também possuía problemas em função da espessura e material do adesivo prejudicando a eficiência,

c) O próprio *buzzer* possui uma baixa qualidade acoplamento mecânico, muito inferior às cerâmicas utilizadas em atuadores. O fator de acoplamento medido, segundo método fornecido pelo fabricante Morgan-Matroc foi de 0,44, contra valores esperados para PZT 5A da ordem de 0,6. O fator de qualidade medido, segundo método do mesmo fabricante, foi de 15,7, contra 60 do manual da empresa Morgan-Matroc. Assim sendo, os resultados obtidos podem ser considerados bons.

d) Os trabalhos citados na Tabela 3.5, foram realizados com materiais preparados pelos autores e não materiais encontrados no mercado que é a base desta pesquisa, que visa quantificar a energia que pode fornecer uma *buzzer*. Apenas o autor Horowitz utilizou um ressonador Helmholtz que pode ser facilmente encontrado.

Em termos absolutos a potência elétrica $165,754 \mu W_{RMS}$ é compatível com os valores informados por Staner, 1984 e outros pesquisadores referidos na bibliografia. Em termos de eficiência, conforme a opção de trabalho, está muito bem situado em relação às referências citadas na bibliografia e que podem ser vistas a seguir na Tabela 3.5:

Tabela 3.5. Valores de Eficiência para geradores piezelétricos

Referência	Tecnologia	Eficiência em %
Este trabalho	Buzzer	52 - 89
Golfarb	Pilha de PZT	53,1
Horowitz	Ressonador Helmholtz	37
Funasaka	Cantilever de LiNbO ₃	90,9
Roundy	Cantilever PZT	50,1
Ottman	Cantilever	70
Babarowsky	Diafragma	79,1

3.2.10. Efeito do aumento da frequência no gerador:

Com o aumento da frequência a tensão gerada cai, pois o modelo apresentado no capítulo 2 (figura 2.8) é para baixa frequência e também porque vai se afastando muito da ressonância criada pelo sistema massa-mola. Para a compreensão do efeito do aumento da frequência na tensão gerada, deve-se buscar o modelo completo do gerador, o qual é apresentado na figura 3.16.

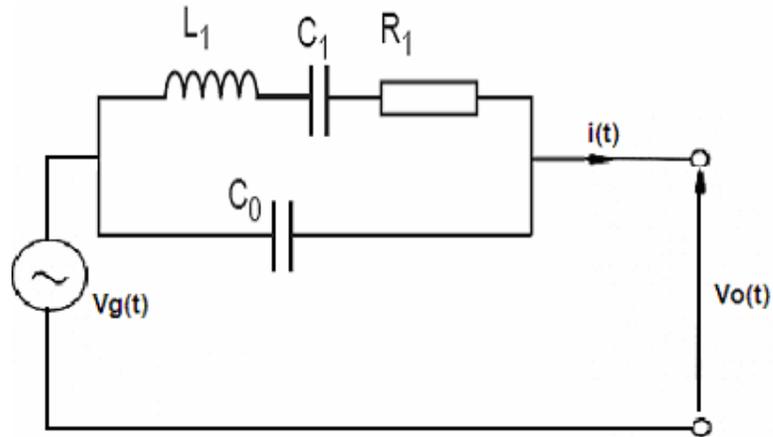


Figura 3.16. Modelo elétrico completo do PZT

Com o aumento da frequência as impedâncias reativa e capacitiva de L_1 e C_1 respectivamente, começam a influenciar na tensão disponível na saída ($V_o(t)$), diminuindo-a.

CIRCUITO CONTROLADOR DA CARGA DA BATERIA

4.1. Introdução:

No capítulo 1 foi definida uma estrutura conversora para se iniciar os estudos, segundo as diretrizes:

- a) Retificação de onda completa,
- b) Menor consumo possível.
- c) Como o sistema é auto-alimentado, as tensões de alimentação e referência são variáveis. Isto implica em estruturas não convencionais de controle,
- d) Possuir o mínimo de componentes externos e otimizar a razão Área/Eficiência,
- e) Operação em baixas tensões, da ordem de 1,2V.
- f) Quando as baterias estão carregadas, sua tensão é aproximadamente 20% (Geocities,2005) superior à nominal, então para baterias de 1,5V, a tensão de carga deve atingir 1.8V. O circuito integrado deve estar apto a operar com valores de tensão desta ordem.

A primeira topologia de condicionador de energia avaliada é mostrada na figura 4.1 e foi proposta por (Richards,2004). O funcionamento do circuito foi estudado e seus blocos foram projetados para fabricação em tecnologia CMOS 0,5 μm projetada e totalmente simulada.

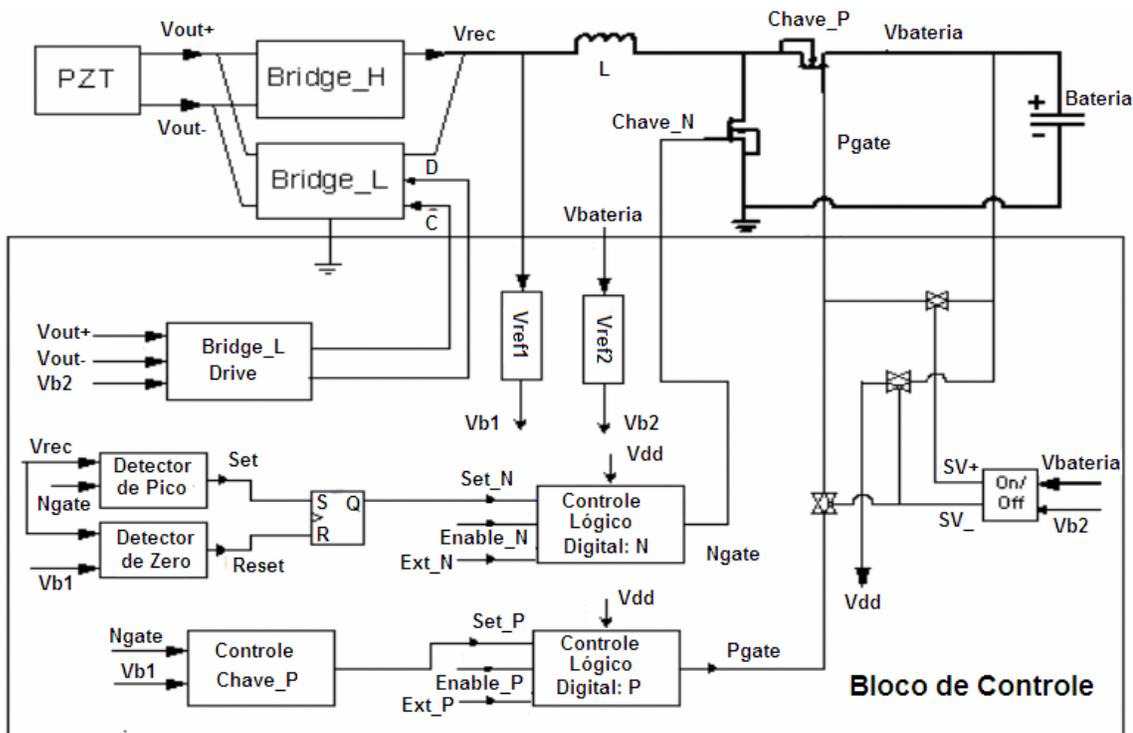


Figura 4.1. Topologia estudada inicialmente

O funcionamento deste circuito pode ser compreendido a partir das formas de onda da figura 4.2. A tensão V_{pzt} representa a saída do PZT antes da retificação. A corrente I_{ind} flui através do indutor externo e é controlada pelo chaveamento dos sinais N_{gate} e P_{gate} nos respectivos gates.

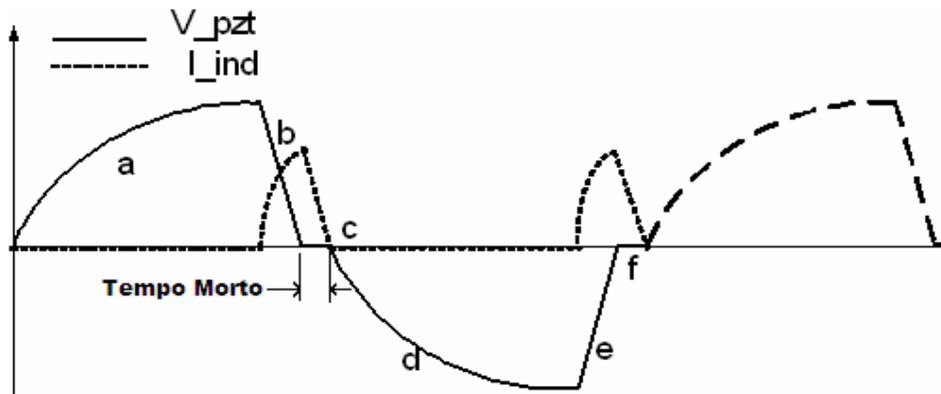


Figura 4.2. Formas de onda do PZT e indutor da figura 4.1.

Quando a tensão V_{REC} (“fase a”) chega ao seu valor de pico, o pulso de N_{gate} é gerado, ligando a Chave_N, que força V_{ds} ao potencial de 0 V. A corrente I_{ind} passa a fluir através do indutor e V_{rec} (a tensão retificada) começa a cair (“fase b”). Assim, quando V_{rec} passa pelo zero, I_{ind} alcança seu valor de pico, a Chave_N é desligada e a Chave_P é ligada, constituindo um caminho de descarga do indutor

através da bateria, que é carregada no período indicado na figura como “fase c”. Quando o zero da é detectado, a Chave_P é desligada e um novo ciclo pode é iniciado.

O processador carrega a bateria através de duas pontes: uma chamada Bridge_L e outra a Bridge_H. Enquanto a tensão da bateria for inferior a 1,2 V, a bateria é carregada através dos diodos de corpo (fonte-substrato, figura 4.3) dos transistores MOS da Bridge_H, operando de forma passiva. Quando $V_{bateria}$ atingir 1,2V, as pontes Bridge:H e Bridge_L (que é uma ponte ativa) passam a operar de forma conjunta. Os transistores MOS são comandados pelo detectores de pico e zero do circuito de controle. A ponte Bridge_H opera na condição de autochaveamento, onde o próprio sinal de entrada comuta os transistores MOS desta ponte.

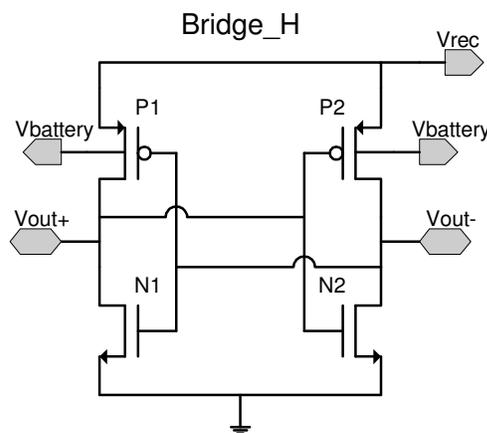


Figura 4.3. Ponte Bridge_H

Embora tenhamos projetado o circuito para a tecnologia 0,5 μm , sua simulação mostrou que a forma de onda produzida pelo gerador não era compatível com a operação do circuito, que exige que a tensão gerada possua um “tempo morto”, necessário para que produza num dos terminais do indutor um potencial de zero volts e ele possa descarregar sua energia na bateria. O microgerador utilizado nesta dissertação, não produz este “tempo morto”, impedindo que o indutor se descarregue provocando um funcionamento deficiente do conversor. A figura 4.4 mostra a forma de onda retificada do microgerador.

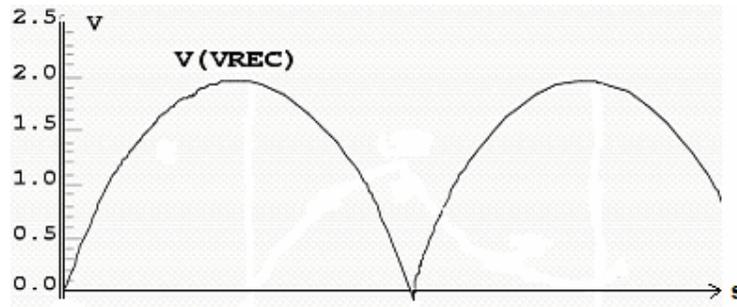


Figura 4.4. forma de onda retificada do microgerador

A partir desta constatação decidiu-se reformular o projeto do circuito integrado, aproveitando-se os circuitos da ponte passiva com transistores MOSFET e o detector de tensão (bloco On/Off da figura 4.1). O resultado desta reavaliação foi uma significativa simplificação do circuito com a manutenção de suas funções: a) carregar a bateria de forma passiva enquanto ela não atinge um valor mínimo de tensão e b) controlar a carga a partir deste patamar, mantendo uma tensão máxima igual a 2 V.

Em comparação à ponte retificadora com diodos, a ponte com transistores MOS possui quedas de tensão bastante inferiores durante a condução. Na primeira, as quedas são da ordem de 1,2 V, enquanto no segundo caso temos quedas de 0,2 Vdc, podendo ainda ser reduzidas com o aumento da dimensão dos transistores (W/L).

O novo circuito de controle foi projetado com as seguintes especificações:

- a) Operação em tensões iguais ou inferiores a 1,2Vdc,
- b) Baixo consumo, permitindo o máximo aproveitamento de energia. Os atuais geradores piezelétricos possuem potências bastante reduzidas,
- c) Frequência de trabalho de 1 HZ até 650 Hz,
- d) Tensões de entrada com até 6 V de pico,
- e) Boa relação eficiência/(área de silício),

A seguir, são descritos os blocos construtivos do circuito integrado, assim como seu funcionamento.

4.2. Topologia e Funcionamento:

4.2.1. Bloco Principal

A Figura 4.5 mostra em diagrama de blocos, a estrutura final do sistema desenvolvido neste trabalho, incluindo o circuito de controle. O sistema é composto de: gerador piezelétrico, ponte retificadora, lógica para o controle de carga, chave MOSFET e um resistor externo, sendo os dois últimos, responsáveis pelo controle da tensão máxima aplicada à bateria.

No processo de carga, a bateria é considerada inicialmente descarregada. A bateria é carregada diretamente através da ponte retificadora até atingir a tensão máxima de 2 Vdc. A partir deste limite o comparador começa a atuar gerando o sinal de controle On/Off para o transistor Q. Ao ser ligado, o transistor curto-circuita momentaneamente os terminais de saída, reduzindo o nível médio da tensão de carga, mantendo-o em 2 Vdc. A redução no número de blocos resultante da simplificação do circuito redundou na obtenção de um baixo consumo de potência pelo circuito integrado. A eficiência de carga poderia ser melhorada com a adoção de estruturas mais complexas de controle, empregando por exemplo, a estratégia de MPPT (Maximum Power Point Tracking). Como este projeto atingiu uma eficiência comparável a outros resultados publicados (Kasyap,2000, Shenk, 1997 e Horowitz,2002), decidiu-se pela a estrutura apresentada na figura 4.5:

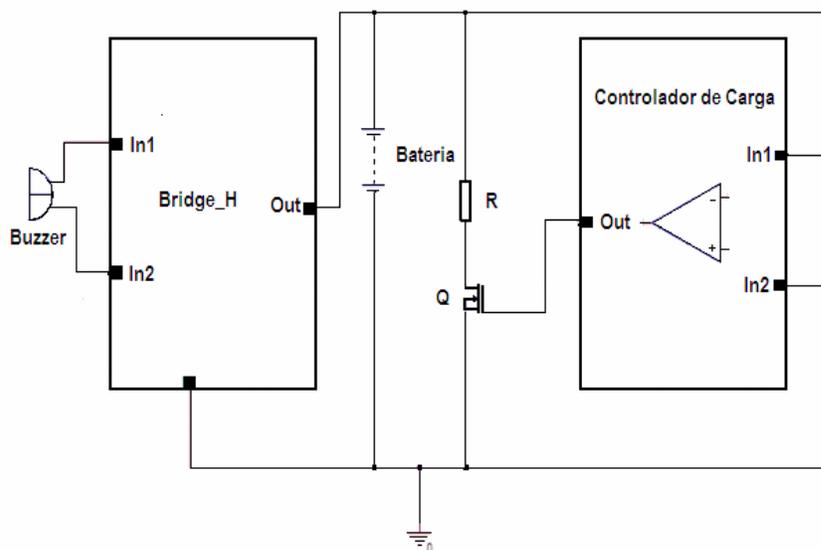


Figura 4.5. Bloco geral do Circuito Controlador de Carga.

4.2.2. Retificação

O diagrama esquemático da ponte retificadora (Bridge_H) é o mesmo mostrado na Figura 4.3. A ponte é composta de quatro transistores :dois NMOS e dois PMOS. Na ponte retificadora tradicional com quatro diodos, no caminho entre os terminais de entrada e a saída, a corrente passa por dois diodos constituindo uma queda de tensão típica entre 1,2 e 1,4V. A ponte implementada com transistores MOS (Bridge_H) supera esta desvantagem pois apesar do transistor entrar em operação apenas em tensões superiores à sua tensão limiar (V_{th}), uma vez ligado, a queda de tensão é ôhmica e depende da resistência do canal.

Nesta estrutura, o limite mínimo da tensão gerada pelo PZT (valor de pico) para que a ponte opere corretamente é de 0,9 e tensões inferiores a estas conduzem a ponte ao seu bloqueio (figura 5.2). Isto é porque este bloco é chamado Bridge_H, uma ponte que trabalha bem somente para a alta tensão (neste caso 0,9 V).

A figura 4.6 mostra o caminho da corrente durante a operação da ponte da figura 4.3. A análise desta figura mostra que a tensão V_{rec} na saída da ponte será a retificação completa do sinal do gerador

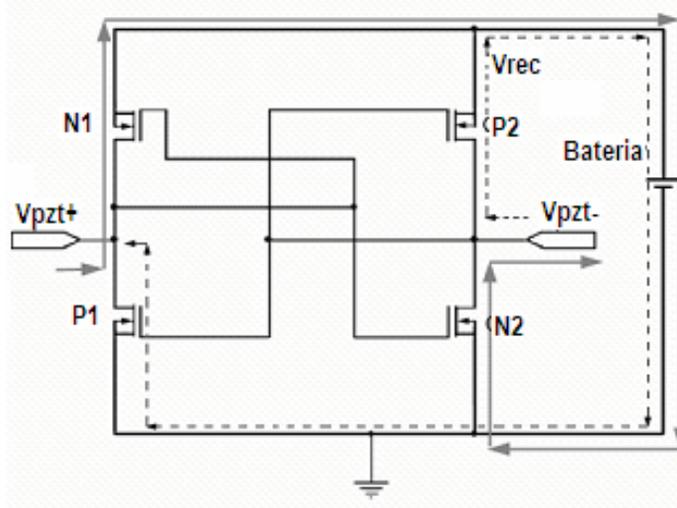


Figura 4.6. Caminho da corrente da ponte Bridge_H

Após a análise experimental do comportamento da ponte, adotou-se uma geometria de canal com $W=100\mu\text{m}$ e $L=0.6\mu\text{m}$ para os transistores. No layout final do chip, foram incluídas duas pontes idênticas, permitindo sua ligação em paralelo ou de forma independente. Teoricamente, a redução das perdas por condução pode ser obtida através do aumento na largura de canal dos transistores. Entretanto, esse aumento acarreta outros problemas: (1) Potência associada à carga e descarga da

capacitância de gate é proporcional à área do canal ($W \times L$); (2) a fuga de corrente pelas capacitâncias parasitas de dreno e de fonte também é proporcional a W ; (3) Redução na relação: (eficiência/área no silício). Esta relação é importantíssima quando se considera a viabilidade comercial do circuito integrado. Na avaliação da área dos transistores da ponte foram realizadas diversas simulações, desde $W = 12.000\mu\text{m}$ até o valor final de $W = 100\mu\text{m}$, sendo este último o que mostrou a melhor relação. As simulações mostraram que estes valores de W permitem correntes de até $500\mu\text{A}$, com quedas de tensão de aproximadamente 70 mV .

O problema da operação em baixas tensões foi resolvido com a adoção de uma ponte capaz de operar em níveis inferiores a Bridge_H . A ponte Bridge_L é mostrada na Figura 4.7. Trata-se de uma ponte ativa, com a operação dos transistores controlada pelos sinais: C e D. Estes sinais são complementares e são gerados pelo bloco Bridge_L drive (figura 4.8). Esta ponte é ativada somente quando a bateria atinge um valor mínimo de $1,2\text{ V}$. A ponte Bridge_L consiste em quatro transistores NMOS que permitem a retificação de sinais com amplitudes a partir de poucos milivolts que a ϵ é a perda causada pela tensão entre dreno-source dos dois transistores NMOS em série por semiciclo, desde os pulsos C ou D atinjam o valor de tensão retido pela bateria.

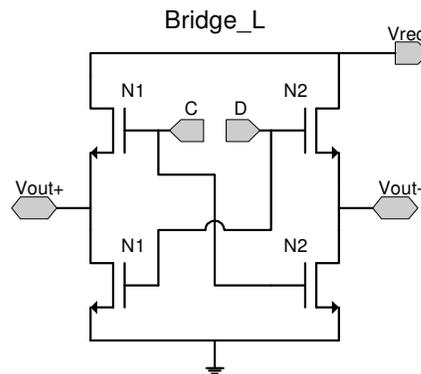


Figura 4.7. Bridge_L .

A tensão máxima que esta ponte fornece à carga é $1,1\text{ V}$, entretanto, uma vez que as pontes passem a operar em paralelo, a retificação acima deste valor é realizada pela Bridge_H . A figura 4.8 mostra que os sinais C e D são gerados no bloco de controle chamado Bridge_L Drive. a partir da comparação das tensões de saída do PZT: $V_{\text{out}+}$ e $V_{\text{out}-}$. O circuito é constituído por um comparador e dois inversores.

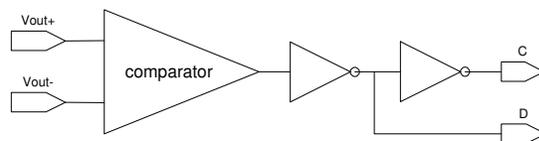


Figura 4.8. Bridge_L Drive

As simulações de operação conjunta das pontes Bridge_H e Bridge_L, mostraram que o incremento na eficiência não compensa o aumento da área requerida em silício. Assim, optou-se pela utilização de ponte Bridge_L passiva, ou seja sem o circuito de controle. Mais uma vez o incremento não se mostrou significativo. Para um incremento de aproximadamente 10% na eficiência foram utilizados mais quatro transistores de $W=100\mu\text{m}$ e $L=0.6\mu\text{m}$. A solução final foi manter a retificação com apenas uma ponte Bridge_H.

4.2.3. Bloco Controlador de Carga:

A figura 4.9 exibe em detalhe, o circuito interno do bloco Controlador de carga. A saída do comparador (VD) assume nível alto quando a saída (VA) do divisor de tensão formado pelos transistores Nin e Pin, excede a tensão de threshold de Ns e quando a tensão de saída (VB) do segundo divisor de tensão, formado por Pc e Nc assume uma tensão maior do $(V_{\text{bateria}} - V_{\text{th,p}})$, desligando o transistor Ps. Ambos divisores de tensão são dimensionados para chavear o inversor de saída (C) quando a tensão da bateria ultrapassa 2 V. Neste ponto, $VA=0,90\text{V}$ e $VB=0.76\text{V}$. O próximo estágio (P0 e N0) tem a função de aumentar a capacidade de corrente de saída a ponto de acionar a chave analógica, que possui transistores com $W=100\mu\text{m}$.

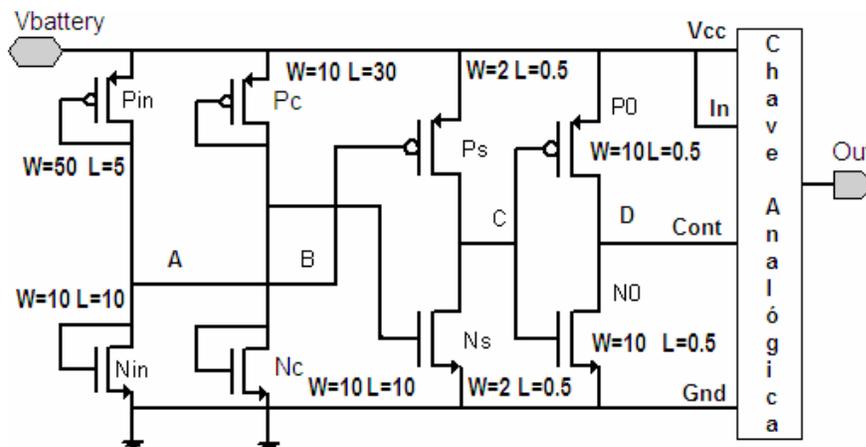


Figura 4.9. Bloco do Controlador de Carga

A figura 4.10 mostra o diagrama da chave analógica o que é um sub-bloco do controlador de carga.

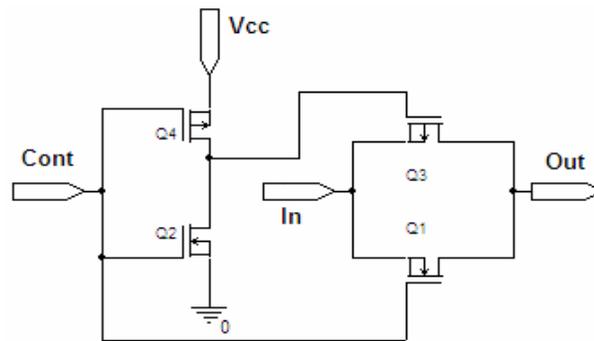


Figura 4.10. Diagrama da Chave Analógica

A função da chave analógica é comutar o transistor Q que realiza o controle de carga da bateria. Ela foi projetada com transistores de dimensões de $W=100\mu\text{m}$ e $L=0,6\mu\text{m}$, que permitem até mesmo o acionamento transistores externos, pois o projeto do layout dispõe de um pino de saída para esta chave analógica (figura 5.6). Com isto, se pode controlar a corrente de bateria superior ao previsto nas simulações realizadas, pois a maior dissipação de potência será no resistor e transistor externos.

O SISTEMA PARA APROVEITAMENTO DE ENERGIA: SIMULAÇÃO E TESTES.

O circuito final do condicionador de energia foi simulado com base nos resultados dos ensaios com o gerador piezelétrico (capítulo 3). As simulações elétricas foram efetuadas no software ELDO, ferramenta que compõe o ambiente de projeto de circuitos integrados da Mentor Graphics. O projeto foi enviado para fabricação em na tecnologia AMIS 0,5 μ m através do programa universitário de pesquisa da MOSIS e conseqüentemente todos os gráficos apresentados se referem somente à simulações.

A Figura 5.1 mostra a curva de carga de uma capacitância de 500 μ F representando a bateria. Podemos observar na figura, o ponto exato da entrada em atividade do circuito regulador de carga ($V_{controle}$) e da resposta tensão de carga da bateria ($V_{bateria}$), atingindo a estabilidade.

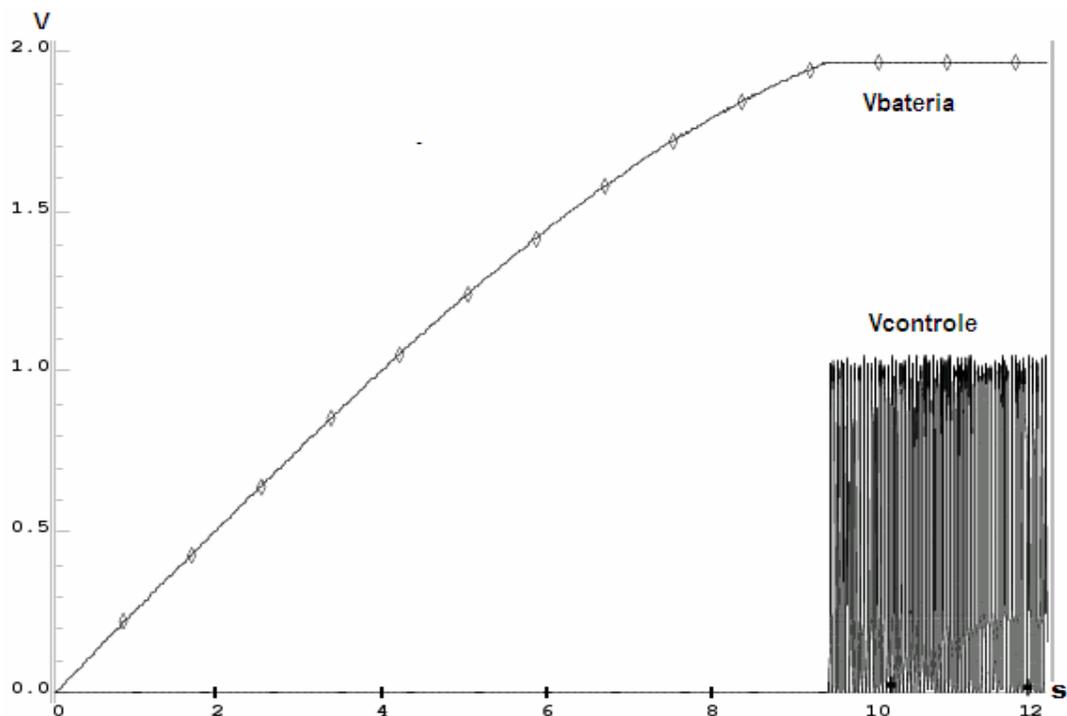


Figura 5.1. Formas de onda simuladas da carga da bateria

As simulações realizadas para diversas capacitâncias, desde nanofarads até 50.000 μF , com o objetivo de analisar do comportamento do rendimento do sistema com relação à carga, Verificando-se que a influência é muito pequena.

Até que a bateria atinja a tensão projetada para a atuação do controle, a carga ocorre exclusivamente através da ponte retificadora e a corrente produzida pelo microgerador é totalmente entregue à bateria, pois os transistores da ponte retificadora estão em série com a bateria, ocasionando apenas perda de tensão e não de corrente.

A figura 5.2, apresenta, respectivamente, as formas de onda na saída e na entrada da ponte retificadora Bridge_H.

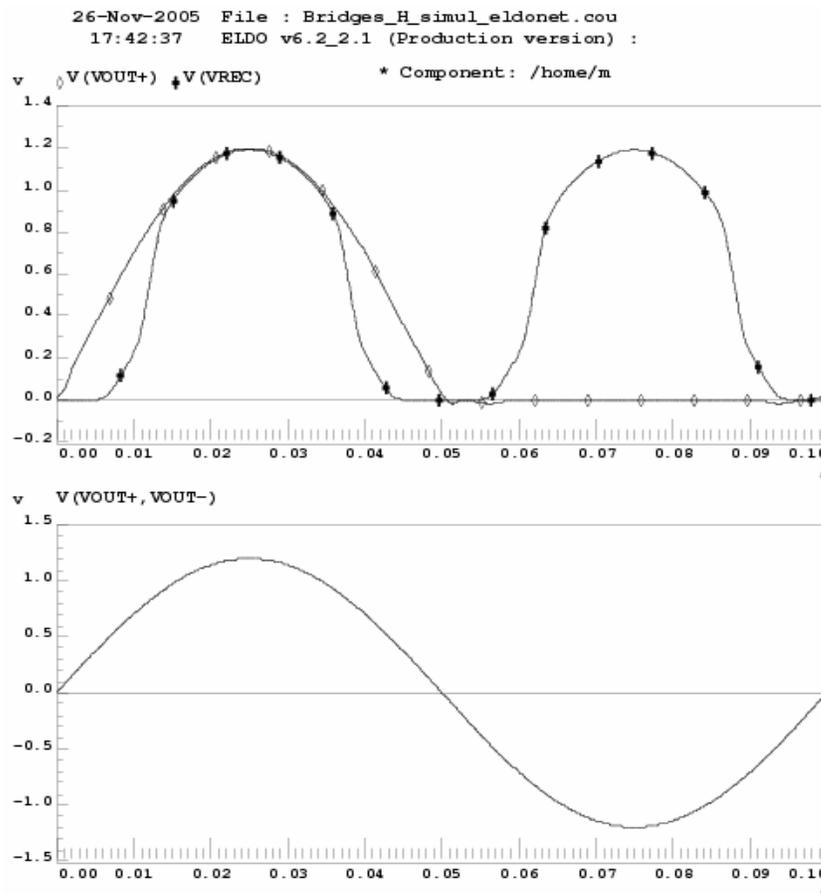


Figura 5.2. Formas de onda simuladas da ponte retificadora Bridge_H.

O sinal Vout representa a onda do gerador piezelétrico, e Vrec é tensão retificada pela ponte. No primeiro gráfico, um semiciclo positivo do sinal de entrada é sobreposto à saída retificada para evidenciar o efeito do retificador. A partir da figura pode-se perceber claramente a superioridade da ponte retificadora com transistores

MOS em relação aos diodos. Além de iniciar a condução em uma tensão até 35,7% menor (considerando-se quedas de 1,4V numa ponte com diodos), as quedas de tensão nos canais dos transistores são da ordem de 70 mV para a potência analisada, ou seja entrega praticamente toda a tensão de entrada para a carga.

A figura 5.3 mostra o detalhe da atividade de chaveamento no controlador de carga.

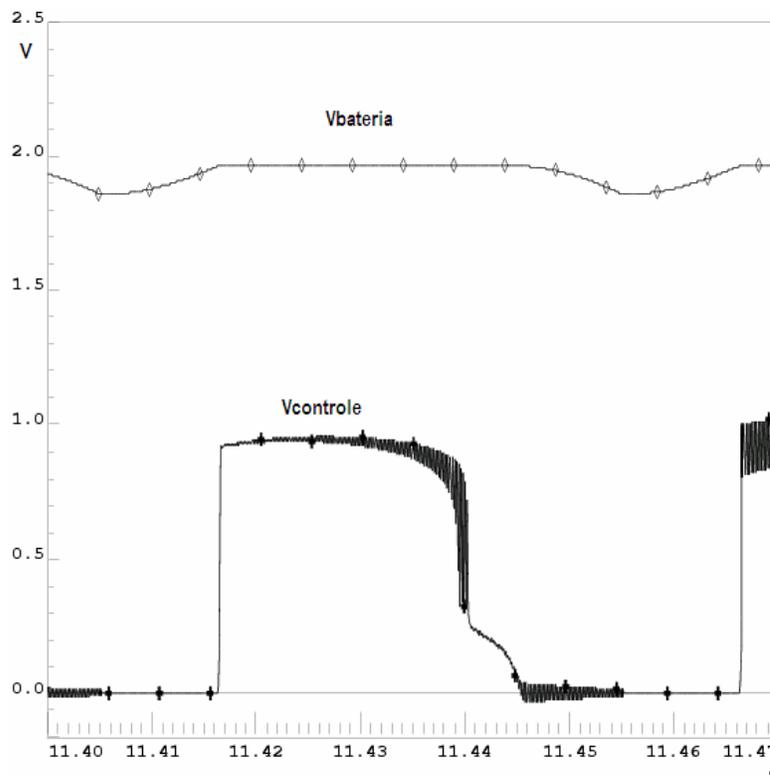
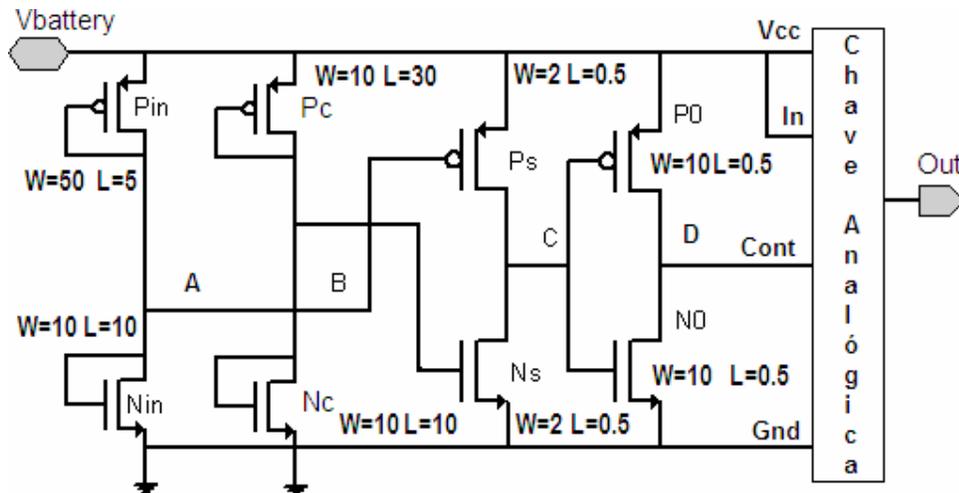


Figura 5.3. Simulação da atividade de chaveamento no controlador de carga

Quando a tensão da bateria atinge o limiar projetado, o sinal Vcontrole troca de estado, de zero para um ligando o transistor Q, desviando temporariamente a corrente fornecida à bateria e provocando a queda momentânea da tensão. Quando a tensão cai abaixo de 2 V, o transistor é desligado e a corrente de saída da ponte volta a carregar a bateria. O resultado, melhor observado na figura 5.1, é a manutenção do nível médio de tensão em torno de 2 V.

A figura 5.4 mostra as formas de onda das tensões de saída nos quatro estágios do comparador. Observe que a saída do comparador (VD) vai para assume nível alto quando a saída (VA) do divisor de tensão formado pelos transistores Nin e Pin excede a tensão de threshold do transistor Ns e quando a tensão de saída do

segundo divisor de tensão (VB), formado por Pc e Nc assume uma tensão maior do que a diferença ($V_{bateria}-V_{th,p}$), através do desligamento de Ps. Ambos divisores de tensão (A e B) são dimensionados para chavear o inversor de saída (C) quando a tensão da bateria ultrapassa 2 V, e neste ponto $V_A=0,90V$ e $V_B=0,76V$. O último estágio (P0 e N0), além de inverter o sinal, proporciona uma maior corrente de saída.



a)

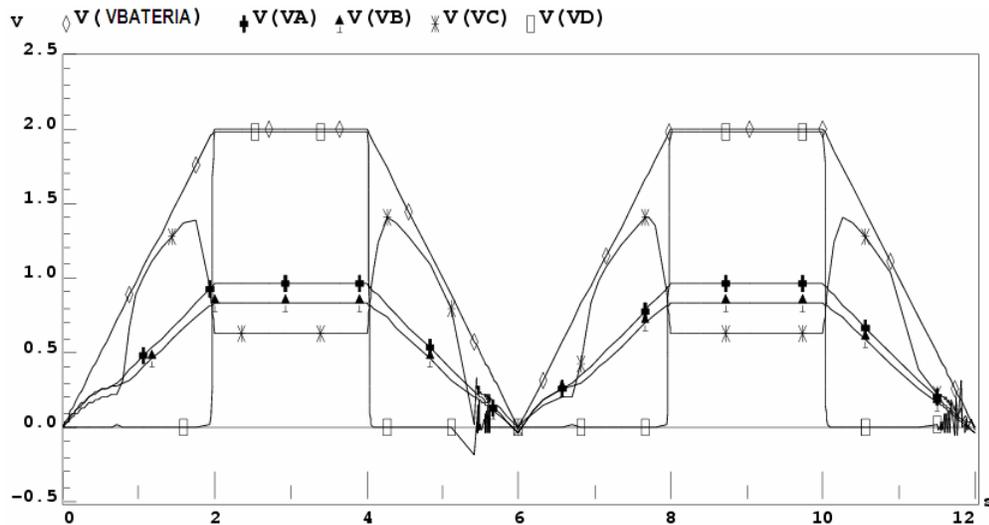


Figura 5.4. Simulações: a) Comparador do controle de carga, b) Sinais de saída dos quatro estágios do comparador.

Para o layout do circuito integrado foram estudadas várias técnicas desenho para circuitos analógicos como: a interdigitação de canais (*fingers*), utilização de

transistores *dummy* e geometria centróide comum (Razavi,2001, Camenzid,2005). Uma síntese das técnicas de layout (Prior,2004) para circuitos analógicos foi incluída no Anexo II.

Deste conjunto, utilizamos somente a técnica de fingers, pois:

- a) A principal componente de perda neste caso decorre da condução no canal, por isto, buscou-se uma otimização da largura (W) considerando-se a demanda de área a o decremento das perdas. Foram projetados e simulados os blocos com vários tamanhos de transistores desde $W=12000\mu\text{m}$ e $L=0,6\mu\text{m}$ até o valor otimizado de $W=100\mu\text{m}$ e $L=0,6\mu\text{m}$. Obtendo-se com esta técnica uma redução de área de aproximadamente 15%,
- b) O circuito não requer grande precisão e nem sensibilidade,
- c) Não existem blocos de entradas diferenciais sujeitos a gradientes de temperaturas.

O circuito integrado funcionou adequadamente para diferentes condições de entrada :

- a) Potência de entrada até $1000\mu\text{W}$
- b) Tensão de entrada de 1.6 V até 6 V
- c) Freqüência de operação de 1 Hz até 650 HZ.

A eficiência estimada para o sistema completo, incluindo o gerador, circuito integrado e bateria é de 55%. Este valor pode ser considerado excelente quando comparado a outras implementações relatadas na literatura, especialmente se levarmos em conta as limitações e o custo do gerador utilizado. Os valores comparados são mostrados na tabela 5.1:

Tabela 5.1. Comparação de valores de eficiência do sistema completo.

Autor	Eficiência Máxima em %
Este trabalho	55
Ottman	70
Shenk	17.6
Ottman	74 – 88 *
Horowitz	37
Kasyap	20

Com o sistema de microgeração desta pesquisa (piezogerador + circuito integrado), se vislumbram diversas aplicações, como redes de sensores remotas, monitoramento remoto de animais e florestas, prover energia para equipamentos portáteis, como mp3 por exemplo. As pesquisas bibliográficas e temas de congressos internacionais mostram uma crescente procura da comunidade internacional por geração de energia alternativa. Como exemplo, para carregar uma bateria de 900 mA-h com 1,2 V, se necessitaria de 3,5 horas de vibrações contínuas com frequência de 650 Hz. Já sob impacto de um tênis com o solo, para se carregar a mesma bateria com 20% de carga, se necessitaria construir um microgerador com duas *buzzers* em paralelo em cada tênis durante uma caminhada de 2,6 horas a um passo por segundo, considerando-se 4 ciclos úteis por impacto (ver figura 3.4) e uma frequência de ressonância da *buzzer* de 60 Hz.

A simulação final do circuito foi realizada com a inclusão dos parâmetros extraídos do layout, para a consideração dos efeitos das conexões. O circuito funcionou perfeitamente, com uma perda inferior a 50 mV por condução sob a condição de corrente nominal de 250 uA. O layout final ocupa uma área total de 1500 x 1500 μm^2 e foi enviado para a fabricação no processo CMOS AMI 0,5 μm , podendo ser observado na Figura 5.5.

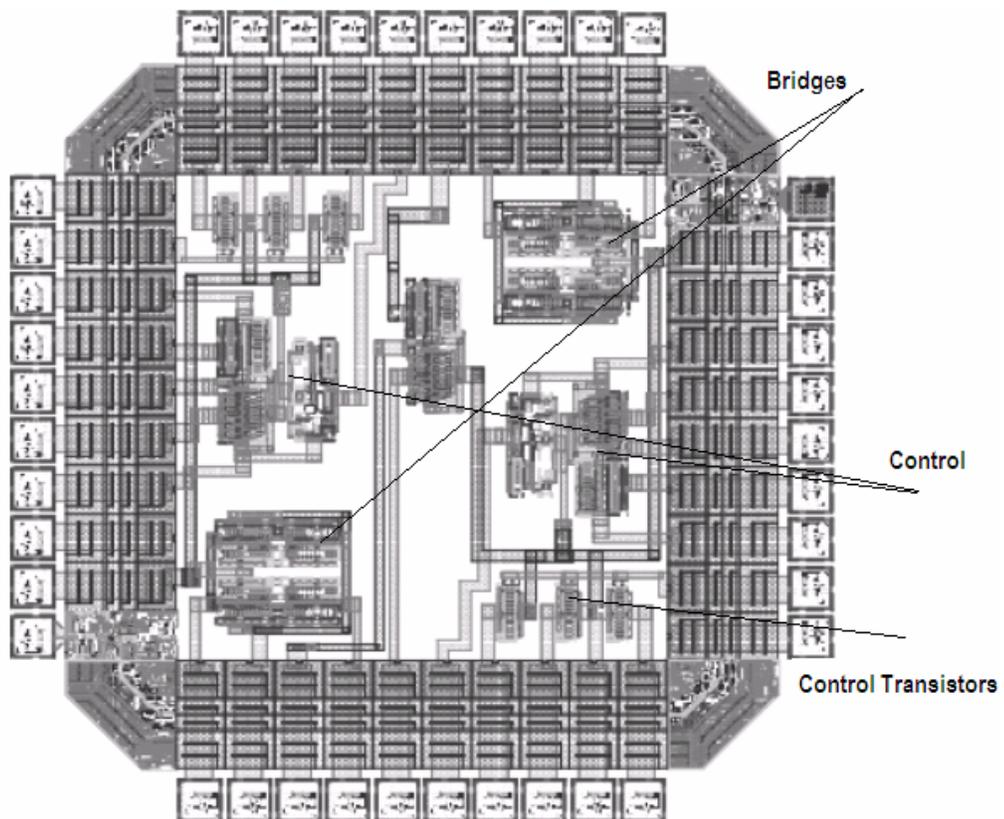


Figura 5.5. Layout final para produção do controlador de carga

O diagrama de ligações ou *Bonding Diagram* do CI, mostrado na Figura 5.6, ilustra como são feitas as ligações do padframe⁴ até a pinagem do encapsulamento. Neste projeto o digrama seguiu o padrão sugerido pelo MOSIS para uma pinagem em encapsulamento cerâmico do tipo DIP40.

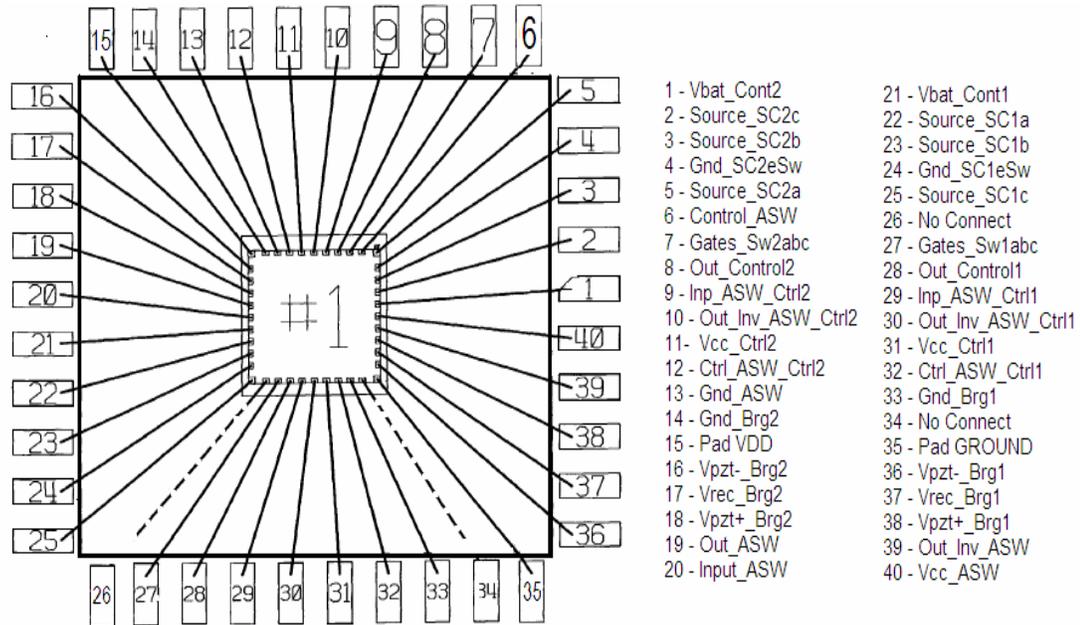


Figura 5.6. Diagrama das ligações

⁴ Padframe: Blocos que ligam o semiconductor interno ao pinos externos acessíveis ao projetista.

CONCLUSÕES, CONTRIBUIÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. Conclusões

Uma importante constatação é que as pesquisas bibliográficas e temas de congressos internacionais mostram uma crescente procura da comunidade internacional por geração de energia alternativa, validando o mérito desta pesquisa.

Esta pesquisa caracterizou a microgeração de energia elétrica com base em transdutores piezelétricos de baixo custo. Também se pode obter diversas conclusões sobre aplicações, ressonância, massa acoplada, entre outras, como exposto a seguir.

Com o sistema de microgeração desta pesquisa, se vislumbram diversas aplicações, como redes de sensores remotas, monitoramento remoto de animais e florestas, prover energia para equipamentos portáteis, como mp3 por exemplo.

Com o microgerador buzzer para carregar uma bateria de 900 mA-h com 1,2 V, se necessitaria de 3,5 horas de vibrações contínuas com frequência de 650 Hz. Já sob impacto de um tênis com o solo, para se carregar a mesma bateria com 20% de carga, se necessitaria construir um microgerador com duas *buzzers* em paralelo em cada tênis durante uma caminhada de 2,6 horas a um passo por segundo, considerando-se 4 ciclos úteis por impacto (ver figura 3.4) e uma frequência de ressonância da *buzzer* de 60 Hz, segundo simulações realizadas.

Além disso, para aumentar o tempo de utilização de um aparelho eletrônico portátil, se necessitaria desenvolver um buzzer com maior capacidade de potência, pois as pesquisas de consumo de alguns mp3, por exemplo, apontaram que o gerador necessitaria produzir 10×10^{-3} W para aumentar em aproximadamente 20% o tempo de utilização de um mp3.

Com relação à frequência de ressonância, se verificou que a menor seria de 149 Hz para a massa limite de 170 gramas, sob uma aceleração de 1G. Isto implica

que trabalhar com frequências inferiores a estas não redundará em uma melhor eficiência.

Uma importante conclusão é que o valor da aceleração do sistema tem papel fundamental na tensão gerada, pois ela propicia a deflexão e por sua vez a tensão gerada. Além disso limita a massa máxima a ser acoplada, conforme equação 3.1,

Também se pode afirmar que os modelos e equações apresentados possuem uma ótima precisão.

6.2 Contribuições:

- 1) Desenvolvimento de um novo tipo de gerador piezelétrico baseado em transdutor comercial de baixo custo;
- 2) Investigação das características de geração e aplicações;
- 3) Consolidação de uma metodologia de investigação de geradores piezelétricos, sistematizando os processos de projeto, construção e medição de parâmetros, estabelecendo uma base de informações para o desenvolvimento de tecnologia nacional nesta área.

6.3. Sugestões para continuidade do trabalho

Devido à originalidade da idéia apresentada e enorme interesse no assunto da comunidade internacional, este trabalho pode servir como base para investigações que proponham projeto e aperfeiçoamento das características de geradores piezelétricos. Pode-se sugerir para estudos posteriores:

- 1) Construção e investigação de geradores semelhantes com frequências, formas e a amplitudes variáveis e com maior capacidade de potência gerada,
- 2) Implementar um controle com técnicas que maximizem o fluxo de potência para a bateria,
- 3) Desenvolver um software que, através de uma interface simples, se possa projetar o gerador piezelétrico através de variáveis como dimensões, parâmetros e propriedades do sistema,
- 4) Um modelo que possa prever a tensão gerada em função de impactos e também de um sistema de força harmônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. and SMITS, A. Energy Harvesting. **Journal of Fluids and Structures**, v. 15, pp.1-13, 2001.

AMIRTHARAJAH, R.; CHANDRAKASAN, A. P. Self-powered Signal Processing Using Vibration-based Power Generation. **IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS**, v. 33, n. 5, pp. 687-695, 2005.

BABOROWSKY, J.; MURALT, P.; SCHIMMITT, D. Study of PZT Coated Membrane Structures for Micromachined Ultrasonic Transducers. **IEEE ULTRASSONIC SYMPOSIUM. Proceedings ...** New York: 2001, p. 7803-7177.

BARBI, I. **Projetos de Fontes Chaveadas**.. Florianópolis: Ed. UFSC, 1990. p. 1-50.

BATERIA RECARREGÁVEIS. Disponível em :
<http://geocities.yahoo.com.br/alexrobotica/eletronic_robotica_baterias.html>.
Acessado em 28 de novembro de 2005.

BATERIA E SUA CARGA. Disponível em
<<http://www.national.com/appinfo/power/files/f7.pdf>>. Acessado em 28 de novembro de 2005.

CAMENZID, H. **Analog Desing Chips**. February 2005. Livro virtual. Disponível em :
<www.designinganalogchips.com>. Acessado em setembro de 2005.

COBBOLD,R. C. **Transducers for biomedical measurements : Pressure transducers**. 1 st. ed. New York: A Wiley-Interscience Publication,1974.p. 214-217.

EGGBORN, T. **Analytical models to predict power harvesting with piezoelectric materials**. 2003, f. 190. Dissertação (Mestrado em Mecânica) - Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

ELDO User's Manual. Disponível em <<http://www.mentor.com>>. Condição a contrato com a empresa Mentor Graphics©. Acesso em junho de 2005.

HAUSLER, E. and STEIN, L. Implantable Physiological Power Supply with PVDF Film. **Proceedings ... Ferroelectronics**, v. 60, pp. 277-282, 1984.

HOFMANN K., OTTMAN, G H.; BHATT, A. C. e LESIEUTRE, G. A. Adaptive Piezoelectric Microgeração Circuit for Wireless, Remote Power Supply. **IEEE Transactions on Power Eletronics**. v 17, No. 5, pp.1-8, 2002

HOROWITZ, S.; ANURAG, K.; FEI, L.; DAVID. **Technology Development for Self-Powered Sensors**. Interdisciplinary Microsystems Group. University of Florida Gainesville, FL. 1st Flow Control Conference. 24 - 26 2002 / St. Louis, MO.

IC Station User's Manual. Disponível em <<http://www.mentor.com>>. Condicionado a contrato com a empresa Mentor Graphics©. Acesso em setembro de 2005.

KASYAP, A; LIM, J. S.; JOHNSON,D e CATTAFESTA, I. Energy Reclamation from a Vibrating Piezoceramic Composite Beam.**Proceedings ... 9nth International Congress on Sound and Vibration, ICSV9**. USA.

KEAWBOONCLINAY, C. and ENGEL, T. G.. Electrical Power Generation Characteristics of Piezoelectric Generator Under Quasi-Static and Dynamic Stress Conditions. **IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectric and Frequency Control**. v.1. 50: KO., 2003.

KYMISSIS, J., KENDALL, C. J.; PARADISO, J.; GERSHENFELD, N. Parasitic Power Harvesting in shoes. **Proceedings ... Presented at the second IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON WEARABLE COMPUTING**. Draft 2.0, 1999.

KRIKKE, J. **Sunrise for Microgeração Products**. Published by the IEEE CS and IEEE ComSoc.1536-1268/05 © 2005 IEEE.

LI, X.; SHIH, W. Y.; AKSAY, I. A. e SHIH,, W. **Electromechanical Behavior of PZT-Brass Unimorphs**. *J. Am. Ceram. Soc.*, **82** [7] 1733–40 1999.

MENINGER, S.; MUR-MIRANDA, J. O.; AMIRTHARAJAH,R.; CHANDRAKASAN. Vibration-to-Electric Energy Conversion . **IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems**,.v. 9, NO. 1, 2001.

MORGAN. Piezoceramics – New York: manual, 2004. 100p.

NASH, W.A. **Resistência dos Materiais**. 2. ed. São Paulo : Editora McGraw-Hill, 1982. (Coleção Schaun)

OTIS, B, ROUNDY, S.; P.; CHEE Y, H. ; RABAEY. J. M., WRIGHT, P. **A 1.9GHz RF Transmit Beacon using Environmentally Scavenged Energy**. Department of Electrical Engineering and Computer Sciences . University of California, Berkeley. 2108 Allston Way, Suite 200, Berkeley, CA 94704, 2005.

OTTMAN, G. K.; HOFMANN, H e LESIEU, G. A. Optimized Piezoelectric Microgeração Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode. **Proceedings ... 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Cairns Convention Centre, Queensland, Australia, pp. 1-14, 2002.

PARADISO, J. and STANER, T. **Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics**. Journal Microgeração and Conservation. Published by the IEEE CS and IEEE ComSoc, 2005.

PHILIPOSE, M.; JING, B.; RAJAN, K. S. Battery-Free Wireless Identification and Sensing. **Proceedings ... Published by the IEEE CS and IEEE ComSoc**. 1536-1268/05, 2005.

PI CERAMIC . Piezo Ceramic Actuators. New York : manual. 2003. 100p.

PRIOR. C. A. **Projeto de um circuito integrado amplificador de instrumentação para sinais cardíacos**. f. 196, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFSM, 2004.

PULPÁN, P. e ERHART, J. **Parameters of PZT unimorphs**. Dept. of Physics and International Center for Piezoelectric Research, Tech. University of Liberec, Czech Republic. Pesquisa realizada para a empresa fabricante de cerâmicas pizelétricas.

RAZAVI, B. **Design of a Analog CMOS Integrated Circuit**. New York :Editora Mac-Graw Hill, pp. 631-660, 2001.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Física**. 3. ed. .Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Editora S/A,1980, v.2.

RICHARDS, C. D. **Power processor for microgeração**. Documento interno.2005.

ROUNDY, S.; LELAND, J.B.; CARLETON, B.O. Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers **Proceedings ...IEEE CS and IEEE ComSoc** . 1536-1268, 2005.

STANER, T.; PARADISO, J. **A Human Generated Power for Mobile Electronics**. GVU Center, College of Computing Responsive Environments Group, Media Laboratory Georgia Tech MIT Atlanta, GA 30332-0280 Cambridge, MA 02139.

SASHIDA, T. **An Introduction to Ultrasonic Motors**. New York : Editora da Universidade de Oxford, 1993. p. 169-171.

SHENK, N. S. **Uma demonstração do uso de geração de energia elétrica em um sapato**. f. 150, 1997.Tese (Mestrado em engenharia elétrica) - Massachusetts Technology Institute, 1997.

UMEDA, M.; NAKAMURA, K. e UEHA, S. **Energy Storage Characteristics of a Piezogenerator Using Impact Vibration**. Japan Journal of Applied Physics, Vol. 36, Part 1, No. 5b, , pp.3146-3151, 1997.

XELGA User's Manual. Disponível em <<http://www.mentor.com>>. Condicionado a contrato com a empresa Mentor Graphics©. Acesso em junho de 2005.

XU, C.N.; AKYAMA, M. and WATANABE, T. Electrical Power Generation Characteristics of PZT Piezoelectric Ceramics. **IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectric and Frequency Control**. v. 45, no. 4, 1998.

ARQUIVO DE TECNOLOGIA MOSIS AMI 0.5 μM

MOSIS WAFER ACCEPTANCE TESTS

RUN: T55W	VENDOR: AMIS
TECHNOLOGY: SCN05	FEATURE SIZE: 0.5 microns
Run type: SKD	

INTRODUCTION: This report contains the lot average results obtained by MOSIS from measurements of MOSIS test structures on each wafer of this fabrication lot. SPICE parameters obtained from similar measurements on a selected wafer are also attached.

COMMENTS: American Microsystems, Inc. C5

TRANSISTOR PARAMETERS W/L N-CHANNEL P-CHANNEL UNITS

MINIMUM	3.0/0.6			
Vth	0.76	-0.94	volts	
SHORT	20.0/0.6			
Idss	455	-241	uA/um	
Vth	0.64	-0.93	volts	
Vpt	10.0	-10.0	volts	
WIDE	20.0/0.6			
Ids0	< 2.5	< 2.5	pA/um	
LARGE	50/50			
Vth	0.66	-0.98	volts	
Vjtkd	10.9	-11.7	volts	
Ijlk	<50.0	<50.0	pA	
Gamma	0.50	0.58	V ^{0.5}	
K' (Uo*Cox/2)	55.1	-18.1	uA/V ²	
Low-field Mobility	456.37	149.91	cm ² /V*s	

COMMENTS: Poly bias varies with design technology. To account for mask bias use the appropriate value for the parameter XL in your SPICE model card.

Design Technology	XL (um)	XW (um)
SCMOS_SUBM (lambda=0.30)	0.10	0.00
SCMOS (lambda=0.35)	0.00	0.20

* Temperature_parameters=Default

```
.MODEL CMOSN NMOS ( LEVEL = 49
+VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 1.43E-8
+XJ = 1.5E-7 NCH = 1.7E17 VTH0 = 0.6303151
+K1 = 0.8765969 K2 = -0.1018785 K3 = 19.988822
+K3B = -8.983631 W0 = 1.033257E-8 NLX = 1E-9
+DVT0W = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0
+DVT0 = 2.5916137 DVT1 = 0.3391566 DVT2 = -0.085587
+U0 = 479.6594887 UA = 2.759469E-13 UB = 2.164735E-18
+UC = 1.785692E-12 VSAT = 1.706024E5 A0 = 0.5798418
+AGS = 0.1288043 B0 = 2.520402E-6 B1 = 5E-6
+KETA = -1.055547E-3 A1 = 6.225749E-5 A2 = 0.3545961
+RDSW = 1.369046E3 PRWG = 0.0176778 PRWB = 2.640281E-3
+WR = 1 WINT = 3.014448E-7 LINT = 6.520393E-8
+XL = 1E-7 XW = 0 DWG = -3.518854E-8
+DWB = 7.563316E-9 VOFF = 0 NFACTOR = 0.7824561
+CIT = 0 CDSC = 2.4E-4 CDSCD = 0
+CDSCB = 0 ETA0 = 2.621104E-3 ETAB = -1.898627E-4
+DSUB = 0.0877129 PCLM = 2.5356331 PDIBLC1 = 0.7553676
+PDIBLC2 = 2.527471E-3 PDIBLCB = -0.0163578 DROUT = 0.8885756
+PSCBE1 = 6.284063E8 PSCBE2 = 2.023284E-4 PVAG = 0
+DELTA = 0.01 RSH = 82.5 MOBMOD = 1
+PRT = 0 UTE = -1.5 KT1 = -0.11
+KT1L = 0 KT2 = 0.022 UA1 = 4.31E-9
+UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11 AT = 3.3E4
+WL = 0 WLN = 1 WW = 0
+WWN = 1 WWL = 0 LL = 0
+LLN = 1 LW = 0 LWN = 1
+LWL = 0 CAPMOD = 2 XPART = 0.5
+CGDO = 1.94E-10 CGSO = 1.94E-10 CGBO = 1E-9
+CJ = 4.280521E-4 PB = 0.9091219 MJ = 0.4320612
+CJSW = 3.22743E-10 PBSW = 0.8 MJSW = 0.19697
+CJSWG = 1.64E-10 PBSWG = 0.8 MJSWG = 0.19697
+CF = 0 PVTH0 = 0.0198578 PRDSW = 282.031812
+PK2 = -0.0288524 WKETA = -0.0186673 LKETA = 2.003417E-3 )
*
```

```
.MODEL CMOSP PMOS ( LEVEL = 49
+VERSION = 3.1 TNOM = 27 TOX = 1.43E-8
+XJ = 1.5E-7 NCH = 1.7E17 VTH0 = -0.9923456
+K1 = 0.5478003 K2 = 6.511928E-3 K3 = 8.8377775
+K3B = -0.706942 W0 = 1E-8 NLX = 4.916031E-8
+DVT0W = 0 DVT1W = 0 DVT2W = 0
+DVT0 = 2.5182627 DVT1 = 0.4981405 DVT2 = -0.0827408
+U0 = 228.0354153 UA = 3.345404E-9 UB = 1E-21
+UC = -5.48516E-11 VSAT = 1.999272E5 A0 = 0.9129016
+AGS = 0.1657657 B0 = 8.848141E-7 B1 = 5E-6
+KETA = -2.127483E-3 A1 = 1.656656E-3 A2 = 0.3000034
+RDSW = 3E3 PRWG = -0.0311863 PRWB = -0.0123864
+WR = 1 WINT = 2.842249E-7 LINT = 9.199665E-8
+XL = 1E-7 XW = 0 DWG = -2.552566E-8
+DWB = 1.640097E-8 VOFF = -0.0815033 NFACTOR = 0.7595592
+CIT = 0 CDSC = 2.4E-4 CDSCD = 0
+CDSCB = 0 ETA0 = 7.251498E-3 ETAB = -0.0303572
+DSUB = 0.6319667 PCLM = 2.1085402 PDIBLC1 = 0.093114
+PDIBLC2 = 4.511646E-3 PDIBLCB = -0.0541214 DROUT = 0.2882496
```

+PSCBE1 = 5.846364E9 PSCBE2 = 5.518255E-10 PVAG = 0.1054384
+DELTA = 0.01 RSH = 104.6 MOBMOD = 1
+PRT = 0 UTE = -1.5 KT1 = -0.11
+KT1L = 0 KT2 = 0.022 UA1 = 4.31E-9
+UB1 = -7.61E-18 UC1 = -5.6E-11 AT = 3.3E4
+WL = 0 WLN = 1 WW = 0
+WWN = 1 WWL = 0 LL = 0
+LLN = 1 LW = 0 LWN = 1
+LWL = 0 CAPMOD = 2 XPART = 0.5
+CGDO = 2.57E-10 CGSO = 2.57E-10 CGBO = 1E-9
+CJ = 7.180962E-4 PB = 0.9594491 MJ = 0.4971122
+CJSW = 2.997035E-10 PBSW = 0.99 MJSW = 0.3319629
+CJSWG = 6.4E-11 PBSWG = 0.99 MJSWG = 0.3319629
+CF = 0 PVTH0 = 5.98016E-3 PRDSW = 14.8598424
+PK2 = 3.73981E-3 WKETA = 5.112411E-3 LKETA = 4.477046E-3)
*

TÉCNICAS DE LAYOUT

Técnicas de layout para Projeto Analógico:

1. Os dispositivos a serem casados devem ser do mesmo tipo: Não se pode esperar o casamento de transistores do tipo NMOS com transistores do tipo PMOS.
2. Não utilize transistores de tamanho mínimo: Para reduzir a influência de efeitos locais aleatórios, os transistores casados devem ser projetados com dimensões maiores que a mínima resolução possível da tecnologia de fabricação.
3. Transistores casados devem ter a mesma polarização: Em particular, para alcançar correntes idênticas, não é suficiente que os dispositivos a serem casados tenham a mesma tensão gate-fonte. Eles devem ter também a mesma tensão fonte-substrato VSB e a mesma tensão dreno-fonte VDS.
4. Para casamento de tensão, mantenha V_{gst} pequeno: A tensão de offset de um par de transistores casados contém um termo dependente da transcondutância do dispositivo diretamente proporcional a V_{gst} . Portanto, pequenos valores de V_{gst} proporcionam um melhor casamento de tensão. Reduzindo o V_{gst} abaixo de 0,1V acarreta pouco benefício adicional, pois as variações da tensão de limiar começam a dominar a equação do offset. A maioria dos projetistas diminui o V_{gst} utilizando relações W/L grandes, pois isto ainda aumenta a área ativa dos transistores.
5. Para casamento de corrente, mantenha V_{gst} grande: A equação do descasamento de corrente contém um termo dependente da tensão de limiar. Este termo é inversamente proporcional a V_{gst} , portanto grandes valores de V_{gst} minimizam seu impacto sobre o casamento de corrente. Circuitos que dependem de casamento de corrente devem manter um V_{gst} nominal de, ao menos, 0,3V. Transistores casados moderadamente devem manter um V_{gst} nominal de, ao menos 0,5V. Já os transistores com casamento preciso devem usar o maior valor possível de V_{gst} permitido pela configuração do circuito, porém nunca devem usar menos de 0,5V.
6. Considere o uso de transistores NMOS ao invés de PMOS: Dispositivos que necessitam de um implante de ajuste para compensar o threshold possuem um descasamento maior na tensão de limiar devido a diferentes dopagens que ocorrem na superfície. Esta é a principal razão para o descasamento significativamente maior dos dispositivos PMOS em relação aos NMOS.

Regras relacionadas ao projeto físico:

1. Use segmentos de mesmo formato e mesmo tamanho: Transistores de diferentes comprimentos e larguras casam muito mal. Mesmo dispositivos com casamento mínimo devem possuir comprimentos de canal (L) idênticos. A maioria dos transistores casados possui larguras de canal (W) relativamente grandes e geralmente são divididos em seções, ou segmentos. Cada um destes segmentos deve possuir o mesmo comprimento e largura que os demais. Não tente casar transistores de diferentes larguras e comprimentos de canal, pois os fatores de correção de W e L, dW e dL , variam substancialmente de lote para lote.

2. Use grandes áreas de gate ativas: A área ativa de um transistor MOS é igual ao produto do comprimento de canal pela largura de canal ($W \times L$). Assumindo que todas as outras considerações de casamento foram respeitadas, o offset residual devido a flutuações aleatórias é inversamente proporcional à raiz quadrada da área do dispositivo. Casamento moderado geralmente requer áreas ativas de algumas centenas de micra quadradas, enquanto que o casamento preciso requer milhares de micra quadrados.

3. Oriente os transistores na mesma direção: Transistores que não são paralelos uns aos outros se tornam vulneráveis a variações da mobilidade causadas pela tensão mecânica e pela implantação de íons inclinada, o que pode causar variações grandes nas suas transcondutâncias. Este efeito é tão severo que mesmo os transistores com casamento mínimo devem ser posicionados em paralelo. Transistores casados, especialmente aqueles que não são autoalinhados, devem ter quiralidades iguais. Esta condição deve ser obedecida para assegurar que cada transistor contenha um número igual de segmentos orientados em cada direção. Outro fato importante a ser considerado é que o fluxo de corrente dos transistores casados deve ser paralelo (idealmente na mesma direção). Isto evita o descasamento causado por processos de fabricação anisotrópicos ou mesmo pela anisotropia do substrato de silício.

4. Posicione os transistores próximos uns dos outros: Transistores MOS são vulneráveis a gradientes de temperatura, tensão mecânica e espessura do óxido. Mesmo os dispositivos com casamento mínimo devem residir o mais próximo possível dos demais. Transistores com casamento moderado ou preciso devem ser posicionados um imediatamente após o outro para facilitar o layout em centróide comum. Para transistores localizados dentro de poços, um poço comum deve ser usado se seus terminais de substrato forem comuns e se não houver possibilidade de interferência.

5. Mantenha o layout dos transistores casados o mais compacto possível: Transistores MOS naturalmente proporcionam layouts compridos, o que os torna extremamente vulneráveis aos gradientes. Layouts em centróide comum não podem eliminar completamente esta vulnerabilidade, portanto o projetista deve tentar criar o arranjo mais compacto possível. Isto geralmente requer que cada dispositivo seja dividido em segmentos.

6. Onde prático, use layouts em centróide comum: Transistores com casamento moderado ou preciso necessitam de alguma forma de layout em centróide comum. Isto pode ser alcançado através da divisão de cada transistor em um número par de segmentos e pela disposição destes segmentos em arranjos interdigitados. Pares de transistores casados devem ser desenhados como pares cruzados para tirar vantagem da simetria superior deste arranjo.

7. Coloque segmentos dummies nas extremidades dos arranjos de transistores: Um arranjo de transistores deve incluir dummy gates nas suas extremidades. Estes dummies não precisam ter a mesma largura dos gates ativos, porém o espaçamento entre os dummies e os gates ativos deve ser igual ao espaçamento entre os próprios gates ativos. As áreas de difusão devem se estender ao menos em alguns microns abaixo dos dummies para prevenir que suas laterais descansem sobre bicos de pato. Os dummies devem ser conectados preferencialmente a potenciais que previnam a formação de canal sob eles. Isto é mais facilmente alcançado com a conexão ao potencial do substrato logo abaixo deles.

8. Posicione os transistores em área de baixo gradiente de tensão mecânica: Os gradientes de tensão mecânica alcançam um valor mínimo no centro do chip. Qualquer localização entre o centro e metade do caminho até as bordas cairá neste mínimo. Quando possível, transistores com casamento preciso devem residir dentro desta área de baixa tensão mecânica. Transistores com casamento mínimo ou preciso devem residir a, no mínimo,

250mm de distância das bordas do chip. A tensão mecânica atinge um máximo nos cantos dos chips, portanto evite o posicionamento de qualquer transistor casado nestas proximidades. Transistores do tipo PMOS podem experimentar uma dependência um pouco menor quando orientados ao longo das direções. Este efeito não é suficientemente pronunciado para justificar o posicionamento de transistores com casamento mínimo ou moderado na diagonal, mas transistores com casamento preciso podem se beneficiar desta orientação não convencional. Transistores do tipo NMOS devem sempre ser orientados na horizontal ou na vertical.

9. Posicione os transistores longe de dispositivos de potência: Para o propósito de discussão, qualquer dispositivo que dissipa mais de 50mW deve ser considerado um dispositivo de potência, e qualquer dispositivo que dissipa mais de 250mW deve ser considerado um dispositivo de grande potência. Transistores com casamento preciso devem residir em um eixo de simetria com dispositivos de grande potência. Transistores com casamento moderado ou preciso devem estar posicionados a não menos de 250 a 500mm de distância do dispositivo de potência mais próximo. Dispositivos com casamento mínimo podem ser colocados próximos de dispositivos de potência, porém somente se eles estiverem na forma de layout em centróide comum. Porém, é conveniente lembrar que, apesar de uma linha de metal não gerar muito calor, ela pode conduzir o calor gerado em outros lugares.

10. Transistores casados devem estar à mesma temperatura: Os dispositivos a serem casados devem ser posicionados simetricamente em relação a uma fonte de calor de maneira a serem aquecidos igualmente, como ilustrado na fig. 5.6.

11. Não coloque contatos sobre regiões de gate ativo: Quando for possível, estenda o poli de gate além da difusão e posicione os contatos de gate sobre o óxido de campo. Quando isto não for possível, minimize o número e o tamanho dos contatos e coloque-os na mesma posição em todos os transistores.

12. Não passe linhas de metal sobre as regiões de gate ativo: Quando possível, evite o roteamento de metal sobre as regiões de gate ativo de transistores com casamento preciso. Estas linhas podem ser roteadas sobre transistores com casamento moderado, porém linhas dummies devem ser adicionadas de modo que cada seção do arranjo de dispositivos casados seja cruzado no mesma posição ao longo do seu canal por uma linha de mesmo comprimento.

13. Mantenha todas as junções de difusão profunda longe das áreas ativas de gate: O espaçamento mínimo entre o limite de um poço e um transistor com casamento preciso deve ser igual a duas vezes a profundidade do poço. Transistores com casamento mínimo ou moderado devem apenas obedecer às regras simples de layout.

14. Posicione os transistores casados precisamente sobre os eixos de simetria do bloco: Arranjos de transistores com casamento preciso devem ser posicionados de modo que o eixo de simetria do arranjo esteja alinhado com um dos dois eixos de simetria da lâmina. Se o projeto contiver um grande número de transistores casados, então reserve os melhores locais para os dispositivos mais críticos.

15. Conecte os segmentos de gate usando linhas de metal: Os segmentos de gate de transistores com casamento moderado ou preciso devem ser ligados através de linhas de metal, e não com polisilício. Transistores com casamento mínimo podem usar estruturas de poli para simplificar as conexões.

16. O efeito de contatos e conexões dos dispositivos deve ser considerado: O mesmo número de contatos deve ser usado em cada dispositivo e na mesma posição. Se for

necessário o uso de vias, idealmente o mesmo número de vias deve ser usado na conexão de cada dispositivo. Contatos múltiplos devem ser utilizados para combater o efeito da variabilidade da resistência. As linhas de metal conectadas aos dispositivos devem ser do mesmo tipo, e as resistências parasitas (e capacitâncias, para operação ac) destas linhas devem, idealmente, também ser casadas.

17. Use dispositivos com óxido fino ao invés de óxido grosso: Alguns processos oferecem múltiplas espessuras para o óxido de gate. Os transistores com óxido mais fino geralmente exibem melhores características de casamento que aqueles que utilizam óxido grosso.

TERMOS E SÍMBOLOS UTILIZADOS

Energy Scaveging ou Microgeração: “coletagem de energia”. Termo utilizado para identificar a busca de captação de energia em condições de baixa disponibilidade.

PZT : Compostos cerâmicos derivados do $PbZrO_3$ e $PbTiO_3$ (Zirconato de chumbo e Titanato de chumbo), conhecidos comercialmente como PZT. A maioria dos materiais piezelétricos sintéticos comercializados atualmente possuem em sua composição $(Pb, La)(Zr, Ti)O_3$.

PAD : Bloco eletrônico que interliga externamente o circuito integrado com o semicondutor interno ao mesmo.

Padframe : Conjunto de todos os pads do projeto de um circuito integrado.

Permissividade: Ou constante dielétrica relativa, é a medida de polarização do material. A medida da permissividade é expressa por um tensor que indica o eixo em que o cristal está sendo operado.

PVDF : Fluoride de polyvinydine

μW : Microwatts. Medida de de potência elétrica de unidade 10^{-6} .

mg : Miligramas. Medida de peso de unidade 10^{-3} .

mm : Milímetro. Medida métrica de unidade 10^{-3} .

kg : Kilograma. Medida de peso de unidade 10^3 gramas

Unimorfo : Composto cerâmico PZT de apenas um material.

Bimorfo: Composto cerâmico PZT de dois materiais.

RMS: Valor eficaz de um determinado sinal.

F_n : Freqüência de ressonância natural

k_{eff} : Coeficiente de Acoplamento Piezelétrico: É a medida de quantidade de energia total transformada na ressonância e usada para quantificar a atividade do dispositivo na ressonância. Os parâmetros de ressonância de um circuito elétrico equivalente são usualmente utilizados para determinar k_{eff} (Morgan,2003). Com as freqüências de máxima amplitude e mínima amplitude, pode-se determinar de forma aproximada o valor

de k_{eff} , usando a seguinte equação : $k_{eff} \cong \sqrt{\frac{f_{máx}^2 - f_{mín}^2}{f_{máx}^2}}$

Região de sub-threshold: ponto de operação de transistores MOS, em que o transistor recebe uma carga suficiente apenas para ser polarizado, implicando com isso mesmos consumo de potência.

Ni-Cad : Bateria recarregável composta por Níquel e Cádmiio

NiMH : Bateria recarregável composta por hidreto metálico e níquel. Possuem um melhor desempenho em comparação às baterias de Ni-Cad.

Células de Combustível: No princípio, uma célula combustível opera-se como uma bateria. Ao contrário de uma bateria, uma célula combustível não funciona não requer recarregar. Produzirá a energia na forma de eletricidade e de calor por tanto tempo quanto o combustível é fornecido. Uma célula combustível consiste em dois eletrodos impressados em torno de um eletrólito. O oxigênio passa sobre um excesso do eletrodo de hidrogênio e o outro, gerando a eletricidade, a água e calor. O combustível do hidrogênio é alimentado no "ânodo" da célula combustível. O oxigênio (ou ar) se incorpora à célula combustível através do cátodo. Incentivado por um catalizador, o átomo de hidrogênio racha em um proton e em um elétron, que fazem trajetos diferentes ao cátodo. O do proton passa através do eletrólito. Os elétrons críam uma corrente separada que pode ser utilizada antes que retornem ao cátodo, para será reunido com o hidrogênio e o oxigênio em uma molécula da água. Um sistema da célula combustível que incluem um "fuel reformer" pode utilizar o hidrogênio de uma célula de combustível de hidrocarboneto - do gás natural ao metanol, e mesmo à gasolina. Desde que a célula combustível é química não combustão, as emissões deste tipo de um sistema seriam ainda muito menores do que emissões dos processos mais limpos da combustão do combustível.

ARQUIVO DE EXTRAÇÃO DO LAYOUT FINAL

```

* .CONNECT statemets
*
.CONNECT GROUND 0
* ELDO NCHetList generated by 'mentor' on Fri Nov 25 2005 at 09:29:52
*
* Globals.
*
.global GROUND
*
* comPCHoNCHeNCHt PCHathNCHame : /home/mentor/work/teste/Bridges_H
*
.subckt BRIDGES_H VBATTERY VREC TERRA VOUT+ VOUT-

    MX1 VOUT- VOUT+ VREC VBATTERY PCH L=0.6u W=110u M=1
    MX2 VOUT+ VOUT- VREC VBATTERY PCH L=0.6u W=110u M=1
    MX3 VOUT- VOUT+ TERRA TERRA NCH L=0.6u W=110u M=1
    MX4 VOUT+ VOUT- TERRA TERRA NCH L=0.6u W=110u M=1
.ends BRIDGES_H
*
* component Pathname : /home/mentor/work/teste/inversor
*
.subckt INVERSOR VOUT VALIM VIN VSS

    MX1 VOUT VIN VALIM VALIM PCH L=0.5u W=100u M=1
    MX2 VOUT VIN VSS VSS NCH L=0.5u W=50u M=1
.ends INVERSOR
*
* component Pathname : /home/meteor/work/teste/analog_sw
*
.subckt ANALOG_SW OUT C IN VALIM VSS

    MY1 IN C OUT VSS NCH L=0.5u W=100u M=1
    MY2 OUT N$1233 IN IN PCH L=0.5u W=100u M=1
    X_INVERSOR1 N$1233 VALIM C VSS INVERSOR
.ends ANALOG_SW
*
* comPCHoNCHeNCHt Pathname : /home/mentor/work/teste/Off_em_2V
*
.subckt OFF_EM_2V VCONTROL VALIM VSS

    X_ANALOG_SW1 VCONTROL B VALIM VALIM VSS ANALOG_SW
    MT3 B A VALIM VALIM PCH L=0.5u W=10u M=1
    MT6 B A VSS VSS NCH L=0.5u W=10u M=1
    MT2 CX CX VSS VSS NCH L=10u W=10u M=1
    MT11 N$1173 N$1173 VSS VSS NCH L=10u W=10u M=1
    MT4 A CX VALIM VALIM PCH L=0.5u W=2u M=1
    MT5 A N$1173 VSS VSS NCH L=0.5u W=2u M=1

```

```

MT1 CX CX VALIM VALIM PCH L=30u W=10u M=1
MT7 N$1173 N$1173 VALIM VALIM PCH L=5u W=50u M=1
.ends OFF_EM_2V
**
.subckt Pad_Frame_meu Vpzt+ _Brg2 Vpzt- _Brg2 Vrec_ Brg2 GROUND
+Vpzt+ _Brg1 Vpzt- _Brg1 Vrec_ Brg1 GROUND
*
*
m0 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m1 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m2 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m3 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m4 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m5 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m6 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m7 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m8 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m9 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m10 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m11 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m12 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m13 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m14 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m15 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m16 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m17 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m18 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m19 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m20 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m21 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m27 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m28 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m29 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m30 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m31 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m32 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m33 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m34 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m35 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m36 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m37 Vrec_ Brg2 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m38 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m39 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m40 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m41 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m42 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m43 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m44 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m45 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m46 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m47 Vrec_ Brg2 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m48 VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 Vrec_ Brg2 Vrec_ Brg2 PCH l=0.6u w=10u
m227 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m228 GROUND VPZT- _Brg2 VPZT+ _Brg2 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m229 VPZT+ _Brg2 VPZT- _Brg2 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u

```


m371 GROUND VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m372 VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m373 GROUND VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m374 VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m375 GROUND VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m376 VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m377 GROUND VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m378 VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m379 GROUND VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m380 VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m381 GROUND VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m382 VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m383 GROUND VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m384 VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m385 GROUND VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m386 VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m387 GROUND VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m388 VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m389 GROUND VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u
m390 VPZT+_Brg1 VPZT-_Brg1 GROUND GROUND NCH l=0.6u w=10u
m391 GROUND VPZT-_Brg1 VPZT+_Brg1 GROUND NCH l=0.6u w=10u

*

*

* lumped capacitances:

cp1 Source_SC1c GROUND 149.089f
cp2 GROUND GROUND 8.88986p
cp3 Vbat_Cont1 GROUND 210.347f
cp4 Out_ASW GROUND 225.343f
cp5 Vpzt+_Brg2 GROUND 330.844f
cp6 Vpzt+_Brg2 GROUND 4.3548f
cp7 6 GROUND 95.1477f
cp8 Vrec_Brg2 GROUND 340.713f
cp9 Vrec_Brg2 Vpzt+_Brg2 12.9468f
cp10 Vpzt-_Brg2 GROUND 329.89f
cp11 Vpzt-_Brg2 GROUND 6.0909f
cp12 Vpzt-_Brg2 Vpzt+_Brg2 33.7452f
cp13 Vpzt-_Brg2 Vrec_Brg2 4.2108f
cp14 9 GROUND 95.1477f
cp15 Gates_Sw1abc GROUND 159.963f
cp16 Gates_Sw1abc Source_SC1c
2.1054f
cp17 Gates_Sw1abc GROUND 12.551f
cp18 Out_Control1 GROUND 200.786f
cp19 Out_Control1 GROUND 1.4875f
cp20 Inp_ASW_Ctrl1 GROUND 195.554f
cp21 Inp_ASW_Ctrl1 GROUND 2.3625f
cp22 Ctrl_ASW_Ctrl2 GROUND 201.217f
cp23 Ctrl_ASW_Ctrl2 GROUND 6.4443f
cp24 Out_Inv_ASW_Ctrl1 GROUND
203.883f
cp25 Out_Inv_ASW_Ctrl1 GROUND
2.3625f
cp26 Out_Inv_ASW_Ctrl1 Out_Control1
5.3769f
cp27 Out_Inv_ASW_Ctrl1 Inp_ASW_Ctrl1
3.7176f
cp28 Vcc_Ctrl2 GROUND 158.12f
cp29 Vcc_Ctrl2 Ctrl_ASW_Ctrl2 2.1054f
cp30 Vcc_Ctrl1 GROUND 158.289f
cp31 Vcc_Ctrl1 GROUND 4.1171f
cp32 Out_Inv_ASW_Ctrl2 GROUND
203.739f
cp33 Out_Inv_ASW_Ctrl2 Ctrl_ASW_Ctrl2
8.9703f
cp34 Ctrl_ASW_Ctrl1 GROUND 201.362f
cp35 Ctrl_ASW_Ctrl1 GROUND 9.2254f
cp36 Ctrl_ASW_Ctrl1 Out_Control1
2.1054f
cp37 Ctrl_ASW_Ctrl1 Inp_ASW_Ctrl1
2.8038f
cp38 Ctrl_ASW_Ctrl1 Out_Inv_ASW_Ctrl1
8.9703f
cp39 Ctrl_ASW_Ctrl1 Vcc_Ctrl1 2.1054f
cp40 Inp_ASW_Ctrl2 GROUND 195.41f
cp41 Inp_ASW_Ctrl2 Ctrl_ASW_Ctrl2
2.8038f
cp42 Inp_ASW_Ctrl2 Out_Inv_ASW_Ctrl2
3.7176f
cp43 20 GROUND 95.1477f
cp44 Out_Control2 GROUND 200.678f
cp45 Out_Control2 Ctrl_ASW_Ctrl2
2.1054f
cp46 Out_Control2 Out_Inv_ASW_Ctrl2
5.3769f
cp47 Gates_Swabc GROUND 159.461f
cp48 Gates_Swabc GROUND 12.551f
cp49 23 GROUND 203.795f
cp50 23 Source_SC1c 22.8218f
cp51 23 GROUND 91.3755f
cp52 23 Vbat_Cont1 22.7689f
cp53 23 Out_ASW 22.9807f
cp54 23 Vpzt+_Brg2 22.6453f
cp55 23 6 22.4159f
cp56 23 Vrec_Brg2 22.8748f
cp57 23 Vpzt-_Brg2 22.7159f
cp58 23 9 22.4159f
cp59 23 Gates_Sw1abc 23.2278f
cp60 23 Out_Control1 22.7159f
cp61 23 Inp_ASW_Ctrl1 22.8924f
cp62 23 Out_Inv_ASW_Ctrl1 22.8924f
cp63 23 Vcc_Ctrl1 23.016f
cp64 23 Ctrl_ASW_Ctrl1 22.8924f
cp65 23 20 22.4159f
cp66 Control_ASW GROUND 217.583f
cp67 Control_ASW GROUND 11.0709f
cp68 Control_ASW Out_ASW 2.8038f
cp69 Vpzt-_Brg1 GROUND 330.65f
cp70 Vpzt-_Brg1 GROUND 6.0909f
cp71 Vrec_Brg1 GROUND 341.7f
cp72 Vrec_Brg1 Vpzt-_Brg1 4.2108f
cp73 Outinv_ASW GROUND 255.676f
cp74 Outinv_ASW Out_ASW 3.7176f
cp75 Outinv_ASW Control_ASW 8.9703f
cp76 Vpzt+_Brg1 GROUND 331.504f
cp77 Vpzt+_Brg1 GROUND 4.3548f
cp78 Vpzt+_Brg1 Vpzt-_Brg1 33.7452f
cp79 Vpzt+_Brg1 Vrec_Brg1 12.9468f
cp80 Vpzt+_Brg1 Outinv_ASW 0.8359f
cp81 Vcc_ASW GROUND 199.178f
cp82 Vcc_ASW Control_ASW 2.1054f
cp83 Vbat_Cont2 GROUND 211.182f
cp84 Vbat_Cont2 Control_ASW 3.1363f
cp85 Source_SC2a GROUND 150.001f
cp86 Source_SC2a Gates_Swabc 2.1054f
cp87 Source_SC2a Control_ASW 1.6123f
cp88 32 GROUND 146.66f
cp89 32 Source_SC1c 11.625f
cp90 32 GROUND 46.5f
cp91 32 Vbat_Cont1 11.625f
cp92 32 Out_ASW 11.625f
cp93 32 Vpzt+_Brg2 11.625f

cp94 32 6 11.625f
cp95 32 Vrec_Brg2 11.625f
cp96 32 Vpzt-_Brg2 11.625f
cp97 32 9 11.625f
cp98 32 Gates_Sw1abc 11.625f
cp99 32 Out_Control1 11.625f
cp100 32 Inp_ASW_Ctrl1 11.625f
cp101 32 Out_Inv_ASW_Ctrl1 11.625f
cp102 32 Vcc_Ctrl1 11.625f
cp103 32 Ctrl_ASW_Ctrl1 11.625f
cp104 32 20 11.625f
cp105 32 23 145.295f
cp106 33 GROUND 81.8742f
cp107 33 Source_SC1c 5.1f
cp108 33 GROUND 20.4f
cp109 33 Vbat_Cont1 5.1f
cp110 33 Out_ASW 5.1f
cp111 33 Vpzt+_Brg2 5.1f
cp112 33 6 5.1f
cp113 33 Vrec_Brg2 5.1f
cp114 33 Vpzt-_Brg2 5.1f
cp115 33 9 5.1f
cp116 33 Gates_Sw1abc 5.1f
cp117 33 Out_Control1 5.1f
cp118 33 Inp_ASW_Ctrl1 5.1f
cp119 33 Out_Inv_ASW_Ctrl1 5.1f
cp120 33 Vcc_Ctrl1 5.1f
cp121 33 Ctrl_ASW_Ctrl1 5.1f
cp122 33 20 5.1f
cp123 33 23 31.535f
cp124 34 GROUND 63.2558f
cp125 34 GROUND 89.1561f
cp126 34 Ctrl_ASW_Ctrl2 17.7924f
cp127 34 Vcc_Ctrl2 17.916f
cp128 34 Out_Inv_ASW_Ctrl2 17.7924f
cp129 34 Inp_ASW_Ctrl2 17.7924f
cp130 34 Out_Control2 17.6159f
cp131 34 Gates_Swabc 18.1278f
cp132 34 Control_ASW 18.163f
cp133 34 Vpzt-_Brg1 17.6159f
cp134 34 Vrec_Brg1 17.7748f
cp135 34 Outinv_ASW 18.0042f
cp136 34 Vpzt+_Brg1 17.5453f
cp137 34 Vcc_ASW 17.563f
cp138 34 Vbat_Cont2 17.6688f
cp139 34 Source_SC2a 17.7218f
cp140 35 GROUND 273.498f
cp141 35 GROUND 83.625f
cp142 35 Ctrl_ASW_Ctrl2 16.725f
cp143 35 Vcc_Ctrl2 16.725f
cp144 35 Out_Inv_ASW_Ctrl2 16.725f
cp145 35 Inp_ASW_Ctrl2 16.725f
cp146 35 Out_Control2 16.725f
cp147 35 Gates_Swabc 16.725f
cp148 35 Control_ASW 16.725f
cp149 35 Vpzt-_Brg1 16.725f
cp150 35 Vrec_Brg1 16.725f
cp151 35 Outinv_ASW 16.725f
cp152 35 Vpzt+_Brg1 16.725f
cp153 35 Vcc_ASW 16.725f
cp154 35 Vbat_Cont2 16.725f
cp155 35 Source_SC2a 16.725f
cp156 35 34 38.3385f
cp157 36 GROUND 94.2672f
cp158 36 GROUND 25.5f
cp159 36 Ctrl_ASW_Ctrl2 5.1f
cp160 36 Vcc_Ctrl2 5.1f
cp161 36 Out_Inv_ASW_Ctrl2 5.1f
cp162 36 Inp_ASW_Ctrl2 5.1f
cp163 36 Out_Control2 5.1f
cp164 36 Gates_Swabc 5.1f
cp165 36 Control_ASW 5.1f
cp166 36 Vpzt-_Brg1 5.1f
cp167 36 Vrec_Brg1 5.1f
cp168 36 Outinv_ASW 5.1f
cp169 36 Vpzt+_Brg1 5.1f
cp170 36 Vcc_ASW 5.1f
cp171 36 Vbat_Cont2 5.1f
cp172 36 Source_SC2a 5.1f
cp173 36 35 140.594f
cp174 37 GROUND 5.13216f
cp175 37 35 22.698f
cp176 38 GROUND 52.7371f
cp177 38 Vbat_Cont1 1.6983f
cp178 39 GROUND 52.7371f
cp179 39 Vbat_Cont2 1.6983f
cp180 40 37 19.5264f
cp181 41 GROUND 86.8525f
cp182 41 Control_ASW 2.1054f
cp183 41 Outinv_ASW 5.3769f
cp184 42 GROUND 25.8946f
cp185 42 38 0.1581f
cp186 43 GROUND 14.1949f
cp187 43 Ctrl_ASW_Ctrl2 1.2216f
cp188 43 39 0.273f
cp189 44 GROUND 14.1949f
cp190 44 Ctrl_ASW_Ctrl1 1.2216f
cp191 44 38 0.273f
cp192 45 GROUND 25.8946f
cp193 45 39 0.1581f
cp194 46 GROUND 2.05124f
cp195 46 34 1.18168f
cp196 46 35 0.295164f
cp197 47 GROUND 2.05124f
cp198 47 34 1.18168f
cp199 47 35 0.295164f
cp200 48 GROUND 2.04282f
cp201 48 23 0.240732f
cp202 48 32 1.23147f
cp203 49 GROUND 2.04282f

cp204 49 23 0.240732f
cp205 49 32 1.23147f
cp206 447 GROUND 308.581f
cp207 448 GROUND 308.581f
cp208 449 GROUND 173.62f
cp209 450 GROUND 226.086f
cp210 451 GROUND 6.83802f
cp211 452 GROUND 23.078f
cp212 453 GROUND 13.676f
cp213 454 GROUND 23.078f
cp214 455 GROUND 13.676f
cp215 456 GROUND 23.4868f
cp216 457 GROUND 6.83802f
cp217 458 GROUND 6.83802f
cp218 459 GROUND 23.078f
cp219 460 GROUND 13.676f
cp220 461 GROUND 23.078f
cp221 462 GROUND 13.676f
cp222 463 GROUND 23.4868f
cp223 464 GROUND 6.83802f
cp224 465 GROUND 172.52f
cp225 466 GROUND 102.611f
cp226 467 GROUND 308.581f
cp227 468 GROUND 308.581f
cp228 469 GROUND 164.76f
cp229 470 GROUND 395.132f
cp230 471 GROUND 10.3086f
cp231 472 GROUND 30.6414f
cp232 473 GROUND 15.3918f
cp233 474 GROUND 30.6414f
cp234 475 GROUND 16.0272f
cp235 476 GROUND 30.6414f
cp236 477 GROUND 10.3086f
cp237 478 GROUND 10.3086f
cp238 479 GROUND 30.6414f
cp239 480 GROUND 15.3918f
cp240 481 GROUND 30.6414f
cp241 482 GROUND 16.0272f
cp242 483 GROUND 30.6414f
cp243 484 GROUND 10.3086f

```

.ends Pad_Frame_meu
**
* MAIN CELL: component pathname : /home/mentor/work/Teste2/cont_2V
*
  X_BRIDGES_H1 VREC VREC N$24 VPZT+ VPZT- BRIDGES_H
  X_BRIDGES_H2 N$37969 N$37969 GROUND N$38983 N$39390 BRIDGES_H
  MZ4 N$35121 VCONT GROUND GROUND NCH L=0.6u W=110u M=11
  MZ5 N$35528 VCONT GROUND GROUND NCH L=0.6u W=110u M=11
  X_OFF_EM_2V1 N$42043 N$41636 GROUND OFF_EM_2V
  X_Pad_Frame_meu Vp+ Vp- Vrec2 GROUND Vp+ Vp- Vrec1 GROUND
Pad_Frame_meu
R3 N$37356 N$35528 250
RBRIDGE GROUND N$24 0.1
RCONTR N$41636 N$37356 0.1
R2 N$37356 N$35121 250
RCBAT VBAT N$37356 0.1
C1 N$37356 GROUND 500u
RVREC VREC VBAT 0.1
V1 VPZT+ VPZT- DC 0V AC 1 0 SIN ( 0 2.8V 10 0 0 )
R1 N$42043 VCONT 400K
R4 VCONT GROUND 400K
V2 Vp+ Vp- DC 0V AC 1 0 SIN ( 0 2.4V 10 0 0 )
R5 Vrec2 GROUND 400K
R6 Vrec1 GROUND 400K
*
* eldo include file.**
.end

Arquivo de Plotagem :

Component: /home/mentor/work/Teste2/cont_2V Viewpoint: eldonet
*
.INCLUDE /home/mentor/work/Esquem_extract/cont_2V_eldonet.spi
*.INCLUDE /home/mentor/work/teste/Pad_Frame_meu
***

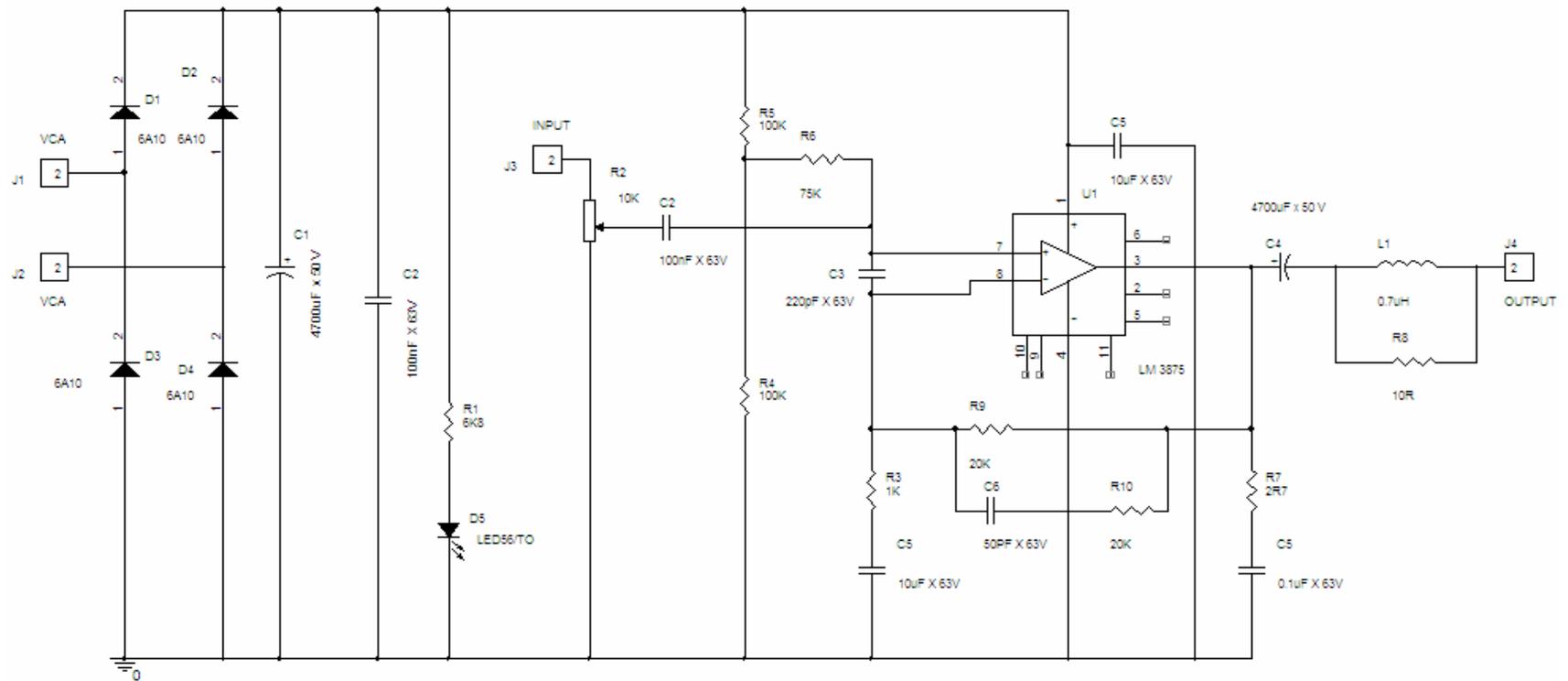
.LIB /home/mentor/ADK/technology/accusim/ami05.mod
.PLOT TRAN V(VPZT+,VPZT-)
.PLOT TRAN V(VBAT) V(VCONT)
*.PLOT TRAN ISUB(X_BRIDGES_H1.VOUT+) I(C1.POS)
.PLOT TRAN V(VP+,VP-)
.PLOT TRAN V(Vrec2)
.PLOT TRAN V(Vrec1)
.PLOT TRAN V(Vrec)
.OPTION NOASCII
.OPTION MODWL
.OPTION SPICEDC
.OPTION AEX
.OPTION ENGNOT
.TRAN 0 20
.INCLUDE /home/mentor/work/Esquem_extract/sim.measure

```

ANEXO V- SEÇÃO 3

PROJETO DO *SHAKER*

a) Esquema Elétrico do Amplificador de Áudio:



c) Diagrama de Blocos do Acelerômetro:

O acelerômetro utilizado possui duas saídas analógicas, Xout e Yout. A sensibilidade típica do dispositivo é de 1V/G e a resolução é de 1mG.

