

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO DE MECANISMO DE COLHEITA DE ENERGIA
BASEADO NO EFEITO PIEZELÉTRICO APLICADO À ALIMENTAÇÃO
DE UM NÓ SENSOR PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE PENEIRAS
VIBRATÓRIAS**

Paula Regina Takano

São Paulo
2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**DIMENSIONAMENTO DE MECANISMO DE COLHEITA DE ENERGIA
BASEADO NO EFEITO PIEZELÉTRICO APLICADO À ALIMENTAÇÃO
DE UM NÓ SENSOR PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE PENEIRAS
VIBRATÓRIAS**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Paula Regina Takano

Orientador: Edilson Hiroshi Tamai

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2017

Catálogo-na-publicação

Takano, Paula Regina Takano

Dimensionamento de mecanismo de colheita de energia baseado no efeito piezelétrico aplicado à alimentação de um nó sensor para manutenção preditiva de peneiras vibratórias / P. R. Takano – São Paulo, 2017.

83 p.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Colheita de energia 2. Piezelétrico I. Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o dimensionamento de um mecanismo gerador de energia a partir do efeito piezelétrico de materiais. Foi abordado o conceito de colheita de energia para alimentar um nó sensor destinado ao monitoramento das condições de operação de uma peneira vibratória. Novas oportunidades de aplicação têm surgido com o desenvolvimento da eletrônica, no qual dispositivos cada vez menores consomem cada vez menos energia. Foi desenvolvido um procedimento para dimensionar o sistema de colheita de energia e a potência obtida em função dos parâmetros das propriedades dos materiais e da vibração mecânica de entrada.

PALAVRAS CHAVE: colheita de energia, manutenção preditiva, peneira vibratória, comunicação sem fio, piezelétrico

ABSTRACT

The present work presents the design of a piezoelectric energy harvester. The energy harvested will be applied to monitor the conditions of a vibrating screen through a sensor node. There are new opportunities for applications of the concept of energy harvesting, due to the technological progress. Devices now have lower energy requirements because of its size and new manufacturing techniques. A procedure to design the energy harvester was developed and the power obtained according to the material properties and the mechanical vibration input.

KEYWORDS: energy harvesting, predictive maintenance, vibrating screen, wireless, piezoelectric

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo de beneficiamento na unidade de Germano (fonte: Freitas, 2014).....	2
Figura 2 – Avanços tecnológico desde 1990 (adaptado de Paradiso e Starner, 2005).....	8
Figura 3 – Variação da densidade de energia ao longo do tempo (fonte: Roundy, 2004).....	9
Figura 4 – Detalhe dos insertos intercambiáveis do contrapeso (fonte: Metso, 2008).....	11
Figura 5 – Mecanismo vibratório (adaptado de Metso)	11
Figura 6 – Ilustração de uma peneira vibratória (adaptado de blog Vibrating Screen Machine, 2017)	12
Figura 7 – Detalhes do mecanismo vibratório (fonte: Furlan, 20--)	12
Figura 8 – Casos reais de falha em peneiras vibratórias (Sousa e Prestes, 2012)	16
Figura 9 – Componentes principais de um nó sensor (fonte: Tavares, 2002).....	20
Figura 10 – Diagrama de um sistema com colheita de energia (adaptado de Texas Instrument, 20--)	24
Figura 11 – Modos de aproveitamento da energia de vibração (fonte: Yildiz, 2009) (a) piezelétrico; (b) eletromagnético; (c) eletrostático	25
Figura 12 – Modelo molecular simples do efeito piezelétrico direto (fonte: Handbook, 2013) (a) Molécula sem deformação; (b) Molécula sujeita a uma força; (c) Efeito de polarização na superfície do metal	26
Figura 13 – Efeito Seebeck (adaptado de Yildiz, 2014).....	28
Figura 14 – Célula fotovoltaica (adaptado de Gabay, 2012)	29
Figura 15 – Nó sensor LPR2400 (Lotus Mote) (fonte: MEMSIC, 20--)	37
Figura 16 – Modos 33 (a) e 31 (b) (fonte: Hehn & Manoli, 2015)	39
Figura 17 – Esquema do dispositivo de colheita de energia (fonte: Roundy e Wright, 2004)	39
Figura 18 – Esquema da composição da viga (adaptado de Roundy e Wright, 2004).....	40
Figura 19 – Representação do circuito elétrico equivalente do gerador piezelétrico (fonte: Roundy e Wright, 2004).....	40
Figura 20 – Representação do circuito do gerador piezelétrico com carga resistiva (adaptado de Roundy e Wright, 2004)	42
Figura 21 – Modelo de atuador piezelétrico da empresa Piezo Systems. Dimensões em parênteses em milímetros (fonte: Piezo Systems Inc., 2011).	45
Figura 22 – Fluxograma da planilha de cálculo	49
Figura 23 – Variação da potência em função de l_e/l_b	52
Figura 24 – Variação da potência em função de l_m/l_b	53
Figura 25 – Potência obtida para diferentes espessuras t_c e comprimentos de viga l_b	53
Figura 26 – Massa de prova para diferentes espessuras t_c e comprimento de viga l_b	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Total de horas paradas (fonte; Silva e Severino, 2015).....	4
Tabela 2 – Comparação entre o ZigBee e o Bluetooth (fonte: Costa e Mendes, 2006)	7
Tabela 3 – Falhas associadas ao acionamento do mecanismo vibratório (fonte: Souza e Prestes, 2012).....	14
Tabela 4 – Falhas associados à estrutura de uma peneira (fonte: Sousa e Preste, 2012).....	15
Tabela 5 – Benefícios da manutenção preditiva (fonte: Almeida, 2009?).....	18
Tabela 6 – Comparação entre um sistema convencional e um de baixíssimo consumo (fonte: Handbook, 2013)	20
Tabela 7 – Comparação entre as potências de consumo para vários microcontroladores com diferentes modos de operação (fonte Handbook, 2013)	22
Tabela 8 – Tabela comparativa entre a densidade de potência para diferentes métodos de colheita de energia	31
Tabela 9 – Propriedades da energia disponível para diferentes aplicações (fonte: Handbook, 2013)	33
Tabela 10 – Características de diferentes modos de aproveitamento (fonte: Roundy, 2004 e Jia, 2009)	34
Tabela 11 – Densidade de potência para diferentes fontes de energia (fonte: Roundy, 2004)	35
Tabela 12 – Valores típicos de alguns nós sensores presentes no mercado.....	36
Tabela 13 – Características do sistema a ser preenchidas pelo usuário.....	46
Tabela 14 – Características do material a ser preenchida pelo usuário	47
Tabela 15 – Características geométricas	48
Tabela 16 – Espessuras e part-number das folhas piezelétricas Inc (fonte: Piezo Systems Inc., 20--?).....	48
Tabela 17 – Tabela com os parâmetros referentes às características do sistema, material do piezelétrico, da viga e da massa de prova.....	50
Tabela 18 – Tabela com os parâmetros referentes às características geométricas	51
Tabela 19 – Valores de comprimento de viga e massa de prova para alimentação do LPR2400, com largura de 2 cm	55
Tabela 20 – Valores de comprimento de viga e massa de prova para alimentação do LPR2400, com largura de 3 cm	55
Tabela 21 – Valores de comprimento de viga e massa de prova para alimentação do LPR2400, com largura de 4 cm	55
Tabela 22 – Propriedades do material constituinte da viga (adaptado de Annamdas e Radhika, 2013).....	1
Tabela 23 - Propriedades do material piezelétrico (fonte: STEMiNC, 20--?)	1

LISTA DE SÍMBOLOS

$\{S\}$	Vetor de dimensão 6 da deformação
$\{T\}$	Vetor de tensão
$\{D\}$	Vetor de dimensão 3 do deslocamento elétrico
$\{E\}$	Vetor do campo elétrico
$[S^E]$	Matriz 6 x 6 de constantes de flexibilidade do material
$[d]$	Matriz 3 x 6 dos coeficientes de deformação piezelétricos
d_{31}	Coefficiente de deformação piezelétrico
$[\epsilon^T]$	Matriz 3 x 3 da constante dielétrica
L_m	Massa de inércia
R_b	Amortecimento mecânico
C_k	Rigidez mecânica
σ_{in}	Tensão devido às vibrações da peneira
n	Relação de voltas na espira do transformador
C_b	Capacitância do material piezelétrico
m	Massa de prova
ϵ_0	Permissividade do vácuo
ω_n	Frequência natural
c_p	Módulo de elasticidade do material piezelétrico
t_c	Espessura do material piezelétrico
t_{sh}	Espessura da viga
w	Largura da viga
l_b	Comprimento da viga
l_m	Comprimento da massa de prova
l_e	Comprimento do material piezelétrico
w_m	Largura da massa de prova
h_m	Altura da massa de prova
I	Momento de inércia da viga
c_{sh}	Módulo de elasticidade ou módulo de Young da viga
K	Constante dielétrica
k_{31}	Coefficiente de acoplamento

i	Corrente
V	Tensão
a	Coeficiente de configuração das camadas piezelétricas
b_m	Coeficiente do sistema
k	Rigidez do sistema
ζ	Fator de amortecimento
A_{in}	Aceleração vibratória
g	Aceleração da gravidade

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento do problema.....	2
1.2. Justificativa.....	4
1.3. Contextualização	5
1.3.1. Comunicação sem fio.....	6
1.3.2. Microeletrônica.....	7
1.3.3. Baterias	7
1.4. Objetivos	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1. Peneira vibratória.....	10
2.2. Manutenção	16
2.2.1. Manutenção corretiva	17
2.2.2. Manutenção preventiva.....	17
2.2.3. Manutenção preditiva	18
2.2.4. Parâmetros.....	19
2.3. Nó sensor.....	19
2.3.1. Unidade de sensoriamento	21
2.3.2. Unidade de processamento.....	22
2.3.3. Unidade de transmissão/recepção.....	23
2.3.4. Unidade de energia	23
2.4. Colheita de energia	23
2.5. Seleção do modo de colheita	31
3. REQUISITOS DO SISTEMA.....	36
4. MODELAGEM	38
4.1. Modelagem do gerador piezelétrico	38
4.2. Modelagem do gerador piezelétrico com carga resistiva.....	42
4.3. Restrições	44

5. METODOLOGIA.....	46
5.1. Parâmetros adotados	48
6. RESULTADOS	52
7. CONCLUSÃO.....	57
8. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	Erro! Indicador não definido.
9. LISTA DE REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

Um novo desafio que se tem mostrado cada vez mais importante nos processos industriais é a busca por soluções sustentáveis e eficientes. O desenvolvimento sustentável pode ser entendido como aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das gerações futuras.

Em um contexto no qual há uma crescente ênfase na finitude dos recursos naturais, é importante que haja uma preocupação em relação ao uso consciente deles. Com enfoque nos recursos associados à energia, uma maneira de garantir a sustentabilidade de uma solução é assegurar que os processos aproveitem da melhor maneira essa energia disponível.

Uma estratégia de abordagem para o desenvolvimento de soluções sustentáveis está relacionada à redução do consumo por parte dos consumidores. Novas tecnologias e novos protocolos têm reduzido de maneira significativa a energia consumida. Uma outra estratégia para as soluções sustentáveis está no aproveitamento da energia que é normalmente desperdiçada.

Nessa segunda linha, um conceito que tem ganhado interesse nos últimos anos é o conceito de colheita de energia. A colheita de energia, do inglês *energy harvesting*, é o processo pelo qual a energia que é normalmente descartada é captada e destinada a alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo, da ordem de $1 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ a $100 \text{ mW}/\text{cm}^3$ (Handbook, 2013).

Aplicações que antes eram inviáveis devido à baixa vida útil das baterias e a dificuldade de acesso para recarga ou substituição da mesma se beneficiam com o desenvolvimento de mecanismos de colheita de energia. Dispositivos médicos implantáveis são um exemplo de aplicação favorecida. As redes de sensores sem fio (RSSF), do inglês *WSN – Wireless Sensor Network*, utilizada para monitoramento ambiental, para automação predial ou industrial ou para o acompanhamento das condições de operação de uma máquina são outro exemplo de aplicação.

Frente a essas novas aplicações, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um mecanismo de colheita de energia destinado a alimentar um dispositivo de monitoramento das condições de operação de uma peneira vibratória.

1.1. Enquadramento do problema

A peneira vibratória é uma máquina cuja função primordial é o peneiramento. O peneiramento, por sua vez, é definido como o processo de separação de uma população de partículas em duas frações, uma passante e uma não passante, mediante apresentação a um gabarito de abertura pré-determinada (Iizuka, 2006).

As indústrias de mineração, petroquímica e alimentícias são as principais áreas de atuação de uma peneira vibratória. Na indústria da mineração, ela possui destacada importância no processo de beneficiamento mineral.

O tratamento ou beneficiamento é um processo essencialmente mecânico, no qual se busca modificar a granulometria, a concentração relativa e/ou forma dos minerais sem que haja modificações químicas. Ele é o processo responsável pela classificação inicial do minério.

Das etapas do beneficiamento, o peneiramento é uma delas. A figura 1 apresenta o fluxograma esquemático do processo de beneficiamento do minério de ferro na unidade de Germano da empresa Samarco, em Minas Gerais.

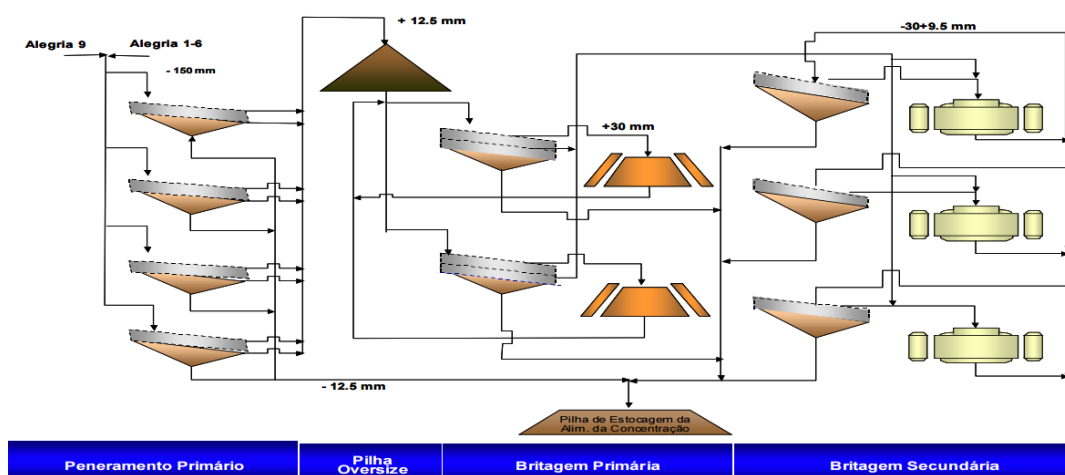


Figura 1 – Fluxograma do processo de beneficiamento na unidade de Germano (fonte: Freitas, 2014)

A figura 1 apresenta de uma maneira simples onde que as peneiras vibratórias se encontram em um processo de beneficiamento mineral. Da figura, pode-se observar que o peneiramento primário dispõe de quatro linhas de peneiramento, cada uma composta por um alimentador de correia, duas peneiras vibratórias em série e correias transportadoras.

Dessa etapa, são gerados dois produtos: o material não passante, retido pelas malhas, denominado *oversize*, e o material passante, *undersize*. O material *undersize* é transportado para a pilha de estocagem. O produto *oversize* é descarregado na pilha de regularização, o qual será posteriormente transportado para o processo de britagem para que se atinja a granulometria desejada

A etapa de britagem, que pode ser dividido em britagem primária e britagem secundária, por sua vez, conta com duas peneiras vibratórias no circuito primário e três no circuito secundário.

Assim, a quantidade total de peneiras utilizadas no processo de beneficiamento mineral da unidade de Germano é de treze máquinas (oito no peneiramento primário e cinco nos processos de britagem). Cada peneira possui uma capacidade nominal de 1.600 toneladas/hora. Uma parada não prevista ou desnecessária para manutenção da peneira compromete de forma significativa o processo produtivo da unidade.

Segundo Meyers e Yeknik (2001), em um artigo publicado pela empresa de rolamentos SKF, a perda de produtividade devido a essa pausa pode atingir valores de até US\$ 15.000 a hora parada. Dependendo do tipo de falha, a peneira pode ficar parada de 1 a 48 horas parada.

Em um estudo de caso desenvolvido por Silva e Severino (2015), foi levantado o total de horas paradas da operação da peneira em uma empresa de mineração produtora de FerroNióbio. Os resultados estão apresentados na tabela 1, com a quantidade de paradas e o impacto em horas no mês de fevereiro de acordo com a ocorrência

Tabela 1 – Total de horas paradas (fonte; Silva e Severino, 2015)

Relação de Motivos	Qtde de paradas	Impacto (h)
Manutenção corretiva	42	45:45:00
Fator externo	25	7:42:00
Falhas de processo	6	3:57:00
Decisão administrativa	1	00:27:00
Total		81:51:00

Da tabela 1, entende-se por manutenção corretiva qualquer intervenção não programada como motor queimado, quebra de eixo, reparação de furo em tubulações, etc. Os fatores externos são ocorrências fora do controle ou previsão, tais como interrupções no fornecimento de energia ou no fornecimento de minério. As falhas de processo são ocorrências inerentes ao próprio processo como entupimentos de tubulações ou descontrole de níveis de caixas. E por fim as decisões administrativas, que são decisões por parte da direção.

Segundo a tabela 1, contabilizado apenas as ocorrências devido a paradas inesperadas e que necessitaram de algum tipo de manutenção corretiva, totalizou mais de 45 horas de tempo parado. Esse valor representa mais da metade das horas em que a máquina ficou inoperante.

Uma maneira de aumentar a produtividade da unidade de Germano está associada à redução do tempo de máquina parado e a prevenção de falhas inesperadas. Sendo um dos principais indicadores de desempenho no setor referente à disponibilidade das máquinas, a disponibilidade e a confiabilidade não só da peneira como de qualquer outra máquina presente em uma planta de mineração são essenciais.

1.2. Justificativa

Com o objetivo de aumentar não só a disponibilidade da peneira, mas também a confiabilidade do processo, o conhecimento das condições reais de operação serve de subsídio para se programar previamente uma parada para manutenção.

A manutenção que acompanha parâmetros chave para o conhecimento em tempo real das condições de uma máquina é denominada manutenção preditiva. Essa gerência tem sido uma estratégia adotada para redução de custos e aumento de produtividade na indústria de maneira geral.

No cenário brasileiro, no entanto, não é essa a estratégia a mais utilizada, o que acarreta não só em custos mais elevados associados à manutenção e menor disponibilidade da máquina, mas também em uma maior exposição a acidentes dos profissionais responsáveis. A maior exposição dos profissionais deve-se à frequência de montagens e desmontagens, característica da chamada manutenção preventiva, e à pressão em colocar a peneira de volta em operação o mais breve possível, quando há alguma falha.

Segundo relatório técnico realizado em parceria entre a Confederação Nacional dos Trabalhadores da Indústria (CNTI) e a Fundacentro, um levantamento dos acidentes anuais registrados na região do Quadrilátero Ferrífero entre os anos de 2004 e 2008, mostra que os profissionais responsáveis pela manutenção de máquinas é a segunda categoria com mais acidentes registrados, atrás somente da categoria de mineiros (Salim, Emídio e Rocha, 2013).

1.3. Contextualização

Apresentadas o cenário de como a manutenção é feita e as melhorias que a adoção de uma gerência preditiva pode trazer para uma planta de mineração, o modo de como o acompanhamento é feito conclui a introdução do trabalho.

Dado o elevado número de acidentes e a perda de produtividade gerada pelo tempo parado, monitorar as condições reais da peneira vibratória durante sua operação remotamente é a solução que mais contribui para reduzir a exposição dos profissionais a acidentes. Módulos de sensoriamento e processamento de dados independentes de cabeamento e que consigam se comunicar entre si é o método de monitoramento estudado.

O desenvolvimento de tecnologias em paralelo foi fundamental para a concepção de um módulo destinado ao acompanhamento das condições reais de

operação alimentado por um mecanismo de colheita de energia. O grande diferencial desse tipo de alimentação frente aos tradicionais, pilhas e baterias por exemplo, está na autonomia que o próprio dispositivo ganha. Não há necessidade de substituições ou recargas, característica indispensável para os dispositivos que se encontram em locais de difícil acesso, como no caso da peneira vibratória.

As mais importantes áreas que contribuíram para as novas aplicações de mecanismos de colheita de energia são as áreas de microeletrônica e de comunicação sem fio.

1.3.1. Comunicação sem fio

A padronização de protocolos de comunicação sem fio trouxe vários benefícios para a indústria de maneira geral. O uso de tecnologias sem fio (*wireless*) se difundiu em grande proporção nos ambientes industriais em aplicações como o monitoramento remoto de máquinas. Essa solução se torna mais relevante para os casos em que tal monitoramento é inviável por meio de cabos, como nos ambientes de refinarias de petróleo e mineradoras (Silva, 2006)

Dentre os vários protocolos presentes no mercado, o 802.15.4 (Zigbee) se destaca por apresentar como principais características a adoção de uma padronização de comunicação sem fio para dispositivos de baixo consumo e baixa complexidade aliado a uma pequena capacidade de consumo de energia.

Algumas características importantes que influenciam no consumo de energia são o seu alcance, a taxa de transmissão e a frequência de operação das redes. Considerando o funcionamento de um dispositivo que capte, processe e transmita os dados de um determinado fenômeno, a maior fonte de consumo de energia está associada justamente à transmissão de dados. Assim, a seleção de um protocolo adequado é essencial para reduzir o consumo de energia do dispositivo.

A tabela 2 apresenta um comparativo entre algumas características do ZigBee (802.15.4) e do Bluetooth (802.15.1), o protocolo que uma pessoa leiga tem maior proximidade. Alguns dados como o consumo de bateria estimado e a corrente de transmissão/*stand-by* de corrente foram comparados.

Tabela 2 – Comparação entre o ZigBee e o Bluetooth (fonte: Costa e Mendes, 2006)

Característica	ZigBee	Bluetooth
Taxa de transferência	250 Kbps	1 Mbps – 3 Mbps
Corrente de Transmissão	30 mA	40 mA
Corrente de <i>Stand-by</i>	3 μ A	200 μ A
Consumo de bateria	Anos	Dias
Complexidade	Simples	Alta
Alcance da rede	1-100 m	1-100 m

Observa-se da tabela 2, que o Zigbee apresenta uma menor complexidade, o que reflete em uma menor corrente seja de transmissão seja de repouso (*stand-by*) e uma vida da bateria mais prolongada

1.3.2. Microeletrônica

Os grandes avanços tecnológicos não foram restritos apenas à área de comunicação sem fio. Na microeletrônica, a redução contínua das dimensões, o aumento da área dos chips e o aumento da eficiência de empacotamento são os grandes avanços que o segmento presenciou. Com esses fatores, as menores dimensões do circuito acarretaram em um menor consumo de potência (Swart, 2013?).

A redução dos tamanhos dos circuitos eletrônicos devido a novas tecnologias como CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semionductor*) e novos processos de fabricação como o VLSI (*Very Large Scale Integration*), possibilitou uma grande redução das dimensões e, por consequência, do consumo de energia (Swart, 2013?).

1.3.3. Baterias

Embora expressivos os avanços na microeletrônica, o desenvolvimento das fontes de energia e baterias não acompanhou essa taxa. Paradiso e Starner (2005)

apresentam uma comparação entre os avanços de diversas tecnologias desde 1990, na figura 2.

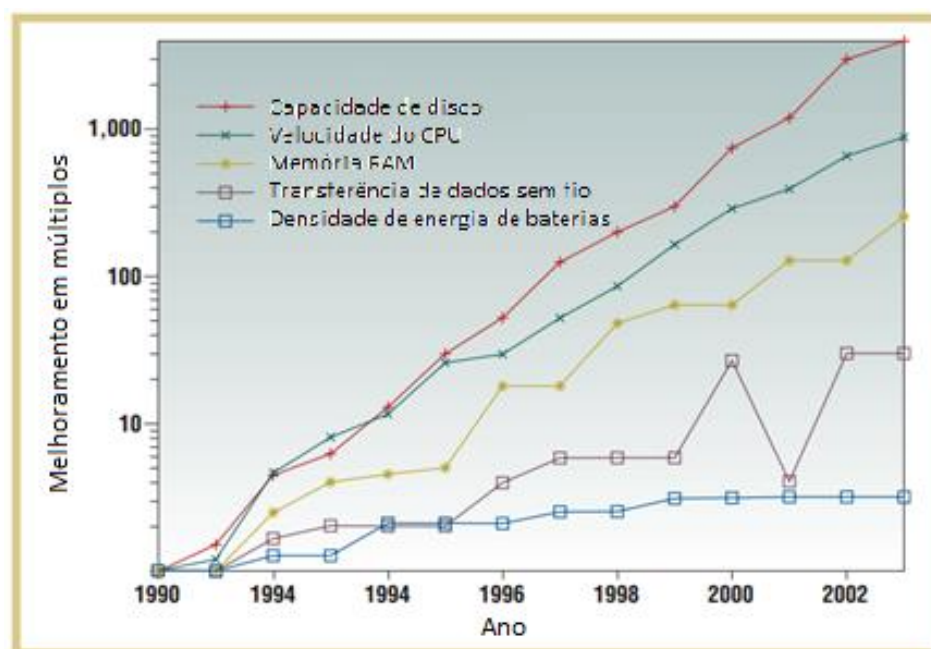


Figura 2 – Avanços tecnológico desde 1990 (adaptado de Paradiso e Starner, 2005)

Verifica-se um grande melhoramento na capacidade de armazenamento de disco e da velocidade de processamento, por exemplo, em 1.200 e 800 vezes, respectivamente, quando comparado com 1990, enquanto que o avanço da densidade de energia em baterias aumentou apenas 3 vezes.

Surge, com isso, uma contradição. Enquanto os componentes eletrônicos se tornam cada vez menores e cada vez mais complexos, as baterias permanecem praticamente constante, com as suas dimensões e limitações de carga inerente a elas. Uma solução que tem sido adotada para aumentar a vida útil de um dispositivo eletrônico é reduzir o consumo dos componentes. Com essa medida, o consumo de energia é mais lento e a bateria tem sua vida aumentada.

A colheita de energia é uma alternativa para a alimentação de dispositivos de baixo consumo. Na figura 3, Roundy (2004) apresenta um gráfico comparativo entre a densidade de energia e o tempo em anos de para diferentes fontes. Para as fontes de

colheita de energia, a densidade permanece constante enquanto que para as baterias de lítio e alcalinas, há uma fuga de corrente.

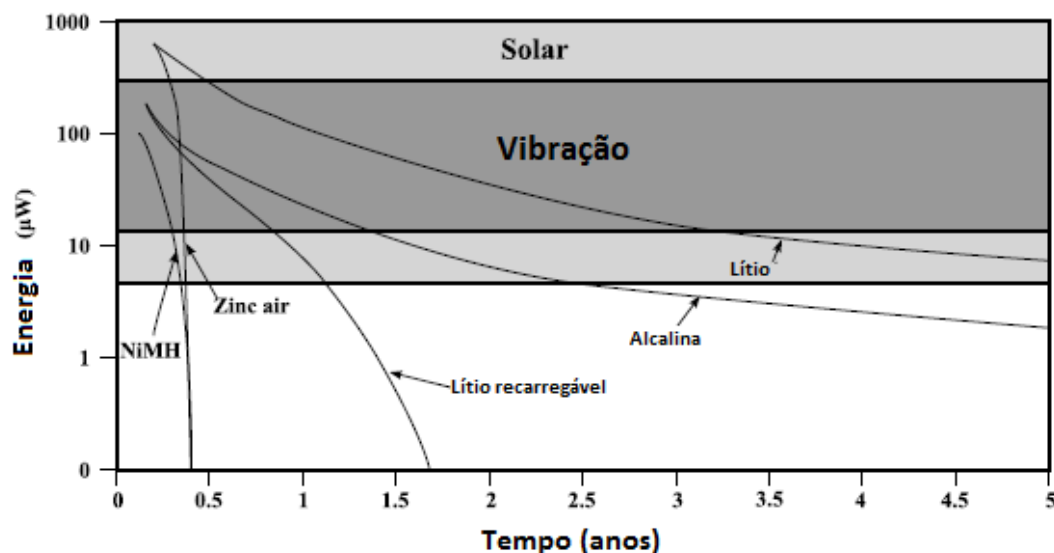


Figura 3 – Variação da densidade de energia ao longo do tempo (fonte: Roundy, 2004)

1.4. Objetivos

Diante do grande número de acidentes e de uma prática preditiva da manutenção não difundida no cenário da indústria brasileira, este trabalho propõe o estudo de um mecanismo de colheita de energia para dispositivos de baixo consumo com objetivo de monitorar as condições reais de uma peneira vibratória. Busca-se uma alternativa que atenda aos requisitos de um sistema de monitoramento e que a análise dos dados coletados possa ser feita a distância.

Inicialmente será apresentado o estado da arte, com os principais conceitos e definições pertinentes para esse trabalho. Em seguida, um levantamento dos modos de aproveitamento de energia e a seleção do modo. Para a função de monitoramento das condições de operação, serão apresentados alguns nós sensores disponíveis no mercado e as exigências de cada sistema. Para o nó sensor eleito, será feita a modelagem do mecanismo de colheita e posterior dimensionamento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão apresentadas as definições mais relevantes para o trabalho, com ênfase nas características e possíveis falhas de uma peneira vibratória, as principais gerências de manutenção e os principais componentes de um dispositivo de monitoramento.

Será feita uma apresentação dos mecanismos de colheita de energia desenvolvidos e em seguida, a seleção do modo mais promissor a ser empregado no mecanismo de colheita.

2.1. Peneira vibratória

A peneira vibratória é uma máquina utilizada para a classificação de partículas em uma fração passante (*undersize*) e uma não passante (*oversize*).

O movimento vibratório da peneira é gerado por um mecanismo de vibração robusto, composto por dois sistemas de massas desbalanceadas localizados um em cada lado do mancal. A conexão entre os dois sistemas é feita por um eixo cardã e o acionamento do conjunto é feito por um motor elétrico acoplado por correias ao eixo. As massas desbalanceadas podem ser ajustáveis, como ilustrado na figura 4, com amplitudes entre 1,5 a 6,0 mm. A frequência situa-se na faixa de 700 a 1000 rpm, o que corresponde a 12 e 16 Hz. (Steyn, 1995 e Iizuka, 2006).

Segundo a fabricante de máquinas vibratórias, Mavi, a faixa de aceleração vibratória recomendada para a oscilação de uma peneira é de 3,5 a 6,5 vezes a aceleração da gravidade. Para a frequência de vibração, normalmente são utilizadas as frequências de 1.750 rpm para peneiras leves, 1.150 rpm para peneiras médias e 875 rpm para peneiras pesadas. (Mavi, 20--).

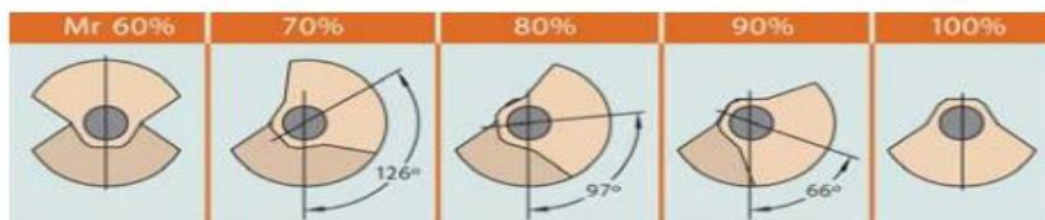


Figura 4 – Detalhe dos inserts intercambiáveis do contrapeso (fonte: Metso, 2008)

O mecanismo vibratório detalhado na figura 5 é composto por dois eixos paralelos, superdimensionados, sincronizados por uma caixa de engrenagens. Os eixos estão apoiados em rolamentos de rolos cilíndricos autocompensadores, que conferem alta durabilidade. Os contrapesos, localizados nas extremidades, são ajustáveis com inserts de aço ou chumbo.

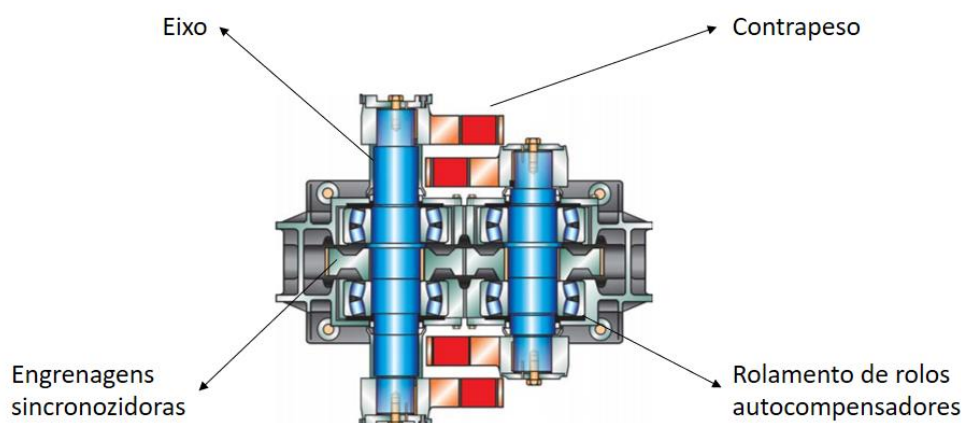


Figura 5 – Mecanismo vibratório (adaptado de Metso)

Além do mecanismo vibratório, a estrutura da peneira é composta por chapas laterais, bicas de entrada, de alimentação e de saída, telas e quadros de apoio para as telas. Toda a estrutura submetida à vibração é apoiada sobre molas e amortecedores. Para as peneiras da fabricante Furlan, sua estrutura é em aço carbono e montada sobre molas de aço especial. A fixação dos decks ao corpo é feita por meio de parafusos.

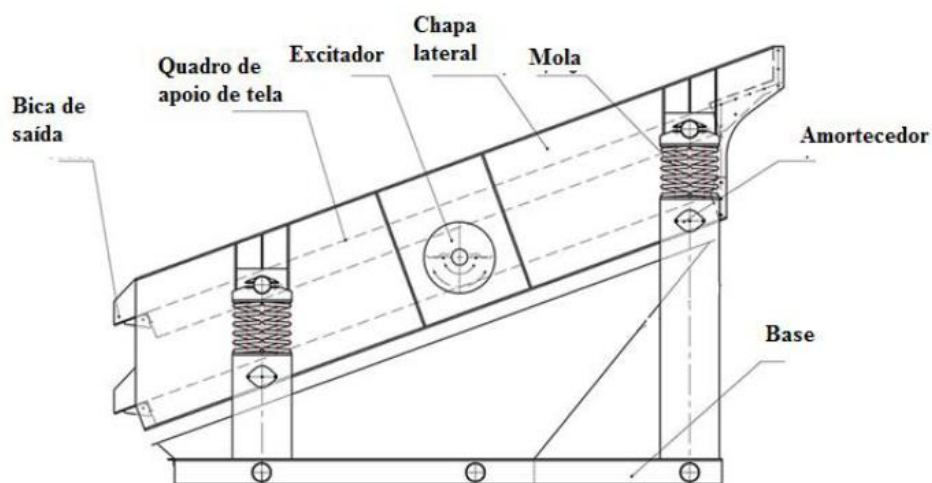


Figura 6 – Ilustração de uma peneira vibratória (adaptado de blog Vibrating Screen Machine, 2017)

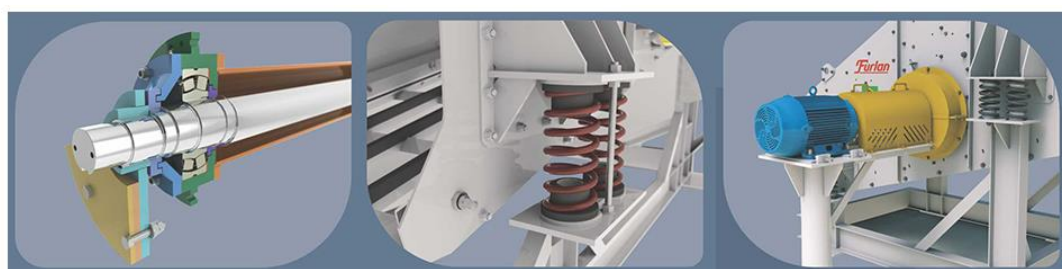


Figura 7 – Detalhes do mecanismo vibratório (fonte: Furlan, 20--)

A figura 7 apresenta detalhes do mecanismo vibratório. A primeira refere-se ao eixo com as massas ajustáveis em sua extremidade, no meio tem-se o detalhe da estrutura apoiada sobre molas e por fim, a direita, o motor vibratório.

Por serem máquinas sujeitas a elevadas cargas e altas vibrações, as falhas mecânicas são inevitáveis. A alta vibração e as características abrasivas dos minérios causam desgaste e elevadas tensões em sua estrutura. As acelerações não devem ultrapassar o valor de 6 vezes a aceleração da gravidade, o que corresponde a aproximadamente 60 m/s^2 (Michaud, 2016). A seguir são apresentados alguns termos técnicos associados aos principais motivos para as falhas inesperadas.

- *Bottoming out*. Ocorre quando há acúmulo de material na parte inferior da peneira e isso interfere nos movimentos dos quadros de apoio das telas. Os quadros se colidem com o material e acarreta em movimentos

desregulares e possíveis distorções das telas, prejudicando na estrutura da peneira

- Sobrecarregamento. Ocorre quando material em excesso é depositado na peneira, levando à compressão da suspensão dos quadros. Assim como no caso de *bottoming out*, o movimento é interferido e pode causar danos à estrutura.
- Contaminação. Devido a poeira e sujeira abrasivas do ambiente de mineração
- Desgaste da lubrificação. Pode ocorrer devido a contaminação ou perda de lubrificante pela vedação da caixa de rolamentos.

Além das falhas causadas pelo material, elas podem ser ocasionadas pelo módulo de acionamento ou na própria estrutura. Sousa e Prestes (2012) apresentam em uma tabela de maneira resumida os possíveis modos de falha de uma peneira. A tabela 3 está associada a falhas devido o acionamento do mecanismo vibratório e a tabela 4, a falhas na estrutura.

Tabela 3 – Falhas associadas ao acionamento do mecanismo vibratório (fonte: Souza e Prestes, 2012)

Compon entes	Função	Efeito/falha funcional	Modo de falha/causa
Motor	Gerar movimento para o mecanismo vibratório	Não gerar movimento	Falta de energia/queda de tensão
			Falha de comando elétrico/PLC
		Parada indevida	Rolamento travado
			Super aquecimento
			Falta de energia/queda de tensão
			Falta de comando elétrico/PLC
Cardã	Transmitir movimento do motor para o mecanismo	Não transmitir o movimento do motor	Quebra dos parafusos dos cardãs
			Quebra dos internos
Polias	Reduzir e transmitir a rotação	Não reduz e transmite rotação	Quebra da polia
		Não reduz e transmite rotação adequadamente	Desgaste dos canais
Correias	Transmitir movimento/torque entre polias	Não transmitir movimento/torque	Rompimento da correia

Tabela 4 – Falhas associados à estrutura de uma peneira (fonte: Sousa e Preste, 2012)

Componentes	Função	Efeito/falha funcional	Modo de falha/causa
Chapas laterais	Transmitir movimento vibratório para todo o conjunto	Não transmitir movimento conforme configuração	Trincas
			Fissuras
		Parada indevida	Rompimento da chapa
			Deformação excessiva por erro de setup de contrapesos
			Sobrecarga na alimentação
Vigas	Travar e sustentar a estrutura da peneira	Não travar a estrutura	Fixação inadequada
			Quebra das vigas e fixadores
			Sobrecarga na alimentação
Quadros	Fixar telas de peneiramento	Não fixar as telas	Quebra dos quadros
			Trincas e fissuras dos quadros
			Sobrecarga na alimentação
Fixadores	Fixar todos os componentes estruturais	Não fixar componentes	Soltura de parafusos e fixadores

A figura 8 a seguir apresenta fotos reais de falhas em peneiras vibratórias. Essas falhas são típicas nas estruturas e modificam o padrão de vibração da peneira. Caso houvesse um monitoramento do padrão de vibração dessa peneira, as falhas poderiam ser detectadas e prevenidas devidamente.

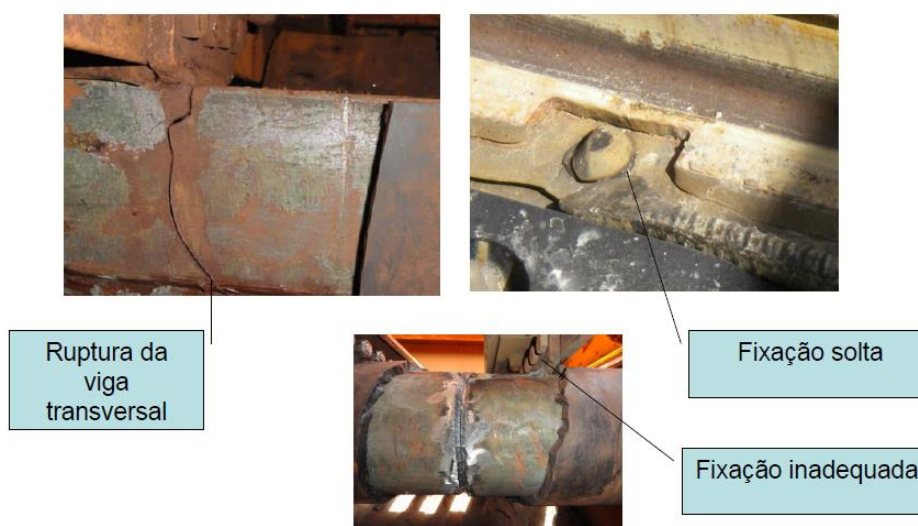


Figura 8 – Casos reais de falha em peneiras vibratórias (Sousa e Prestes, 2012)

2.2. Manutenção

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 5462/1994), a manutenção é definida como “a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a ‘manter’ ou ‘recolocar’ um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

A manutenção em plantas industriais representa uma parcela considerável dos custos operacionais. Em indústrias mais pesadas, como o caso de siderúrgicas, papel e celulose e petróleo, essa parcela pode chegar a 30 % do custo de operação. Em termos numéricos, os valores podem chegar a 200 bilhões de dólares por ano, destinados à manutenção dos maquinários.

A classificação quanto à manutenção pode ser feita baseada na maneira de como é realizada a intervenção. As estratégias, em geral, podem ser divididas em três

categorias: a manutenção corretiva, a manutenção preventiva e a manutenção preditiva.

2.2.1. Manutenção corretiva

Entende-se por manutenção corretiva aquela em que a intervenção ocorre quando há uma falha no equipamento que inviabilize total ou parcialmente seu funcionamento. Ela é mais simples das gerências abordadas.

Segundo Almeida (2000), esse tipo de gerência, apesar de simples, pode requerer altos custos. Esses custos estão associados à ociosidade da máquina parada durante seu concerto, à necessidade de estoque de peças sobressalentes, ao trabalho extra relativo à manutenção da máquina, entre outros.

Como resultado, há uma baixa confiabilidade de produção. Cabe ressaltar ainda, que os índices de acidentes são altos nesse tipo de gerência, uma vez que o trabalho ocorre sob pressão de tempo e de necessidade em colocar a máquina em condições operativas o mais breve possível.

2.2.2. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é a intervenção programada em intervalos de tempo pré-definidos. Os reparos e recondicionamentos da máquina são planejados a partir de estatísticas típicas para o tipo de máquina gerenciada. Essa é a gerência de manutenção mais praticada na indústria, oscilando entre 30 e 40% (Xavier, 2012).

A desvantagem dessa abordagem está em basear a manutenção da máquina em estatísticas, sem considerar as reais condições de trabalho. Variáveis específicas da planta, tais como poeiras e sujeiras abrasivas, solicitação, condições meteorológicas, entre outros, podem influenciar na vida útil dos elementos da máquina.

Outra desvantagem desse tipo de gerência são as frequentes desmontagens para revisão e substituição de peças. Alguns componentes podem ser substituídos antes do fim da sua vida útil. Além disso, as desmontagens, por vezes desnecessárias, podem

acarretar em falhas durante a montagem e danificar peças antes saudáveis. Esse sistema, por consequência, também apresenta um custo elevado de manutenção.

2.2.3. Manutenção preditiva

Manutenção preditiva é a gerência que acompanha a saúde (*status*) da máquina sob condições reais de operação. O monitoramento de parâmetros como temperatura, vibração e vazamentos servem de subsídio para reduzir falhas inesperadas e determinar antecipadamente a necessidade de reparo ou de substituição de um elemento. Com isso, reduz-se o número de peças em estoque e as intervenções e desmontagens desnecessárias associadas às outras gerências.

Dentre os benefícios gerados pela manutenção preditiva, destacam-se a redução dos custos de manutenção e do tempo de máquina parada, o aumento da segurança operacional, o aumento da vida útil do componente e do equipamento e o aumento do grau de confiança no desempenho do equipamento.

Segundo a empresa de rolamentos NSK, a aplicação de programas de manutenção preditiva em indústrias de processo resulta em reduções na ordem de 60% de prejuízos com paradas inesperadas e 30% de economia com os gastos de manutenção. Uma pesquisa com relação a 500 fábricas a respeito dos benefícios da manutenção preditiva foi realizada por Almeida (2009?), uma divisão da Technology for Energy Corporation. Os resultados estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5 – Benefícios da manutenção preditiva (fonte: Almeida, 2009?)

Redução dos custos de manutenção	50 a 80 %
Redução de falhas nas máquinas	50 a 60 %
Redução de estoque de sobressalentes	20 a 30 %
Redução de horas extras para manutenção	20 a 50 %
Redução do tempo de parada das máquinas	50 a 80 %
Aumento na vida das máquinas	20 a 40 %
Aumento da produtividade	20 a 30 %
Aumento dos lucros	25 a 60 %

Para a manutenção preditiva, diversas técnicas são empregadas nesse tipo de gerência, tais como estudo das vibrações, análise dos óleos, análise do estado das superfícies (por líquido penetrante), análises estruturais da peça (por termografia), entre outras.

Em se tratando de máquinas vibratórias, técnicas como a análise orbital pode e deve ser empregada na análise quantitativa e qualitativa do movimento vibratório (Sousa e Prestes, 2012). Há ainda a análise síncrona no tempo com a utilização de dois ou mais canais para a comparação dos movimentos vibratórios.

2.2.4. Parâmetros

Um parâmetro de interesse para acompanhar as condições da máquina é a amplitude e frequência de vibração. Outro parâmetro igualmente importante é a temperatura. Situações de aquecimento não usuais podem ser indícios de comportamento anormal ou defeitos em um componente.

Dentro da casa de rolamentos, pode-se incluir acelerômetros ou sensores de vibração para mensurar alterações na frequência de vibração ou mesmo sensores de temperatura para medir aumentos de temperatura nesses componentes. A detecção de umidade também pode ser uma indicação de vazamentos. Pressão ou temperatura do óleo também servem de subsídios para detectar potenciais falhas.

O monitoramento das condições do eixo pode dar indícios de falha no rolamento. O acelerômetro mede o movimento vertical gerado pela vibração natural do rolamento. Uma alteração na frequência de vibração (valores pré-estabelecidos), o sensor envia um sinal para uma unidade de processamento remoto.

2.3. Nó sensor

Apresentada a manutenção preditiva e os parâmetros de análise de interesse, a captação e processamento desses dados pode ser feita por um dispositivo chamado de nó sensor.

Nós sensores são dispositivos autônomos e é o principal componente de uma rede de sensores sem fio. Ele é composto por basicamente quatro unidades: a de sensoriamento, a de processamento, a de transmissão/recepção e a de energia. A figura 9 ilustra os componentes descritos e a relação entre si. Para o sistema de colheita de energia, um componente adicional está representado em tracejado e corresponde à unidade geradora de energia.

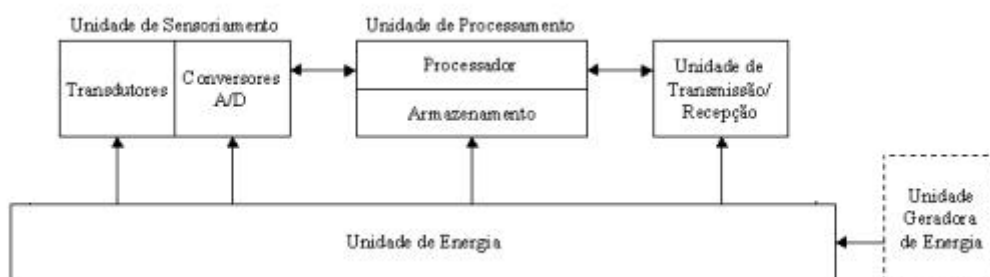


Figura 9 – Componentes principais de um nó sensor (fonte: Tavares, 2002)

Para aplicações que utilizam a colheita de energia como unidade geradora, a energia proveniente do sistema é baixa, da ordem de $1 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ a $100 \text{mW}/\text{cm}^3$. Somente com os avanços na microeletrônica dispositivos de baixíssimo consumo (*ultra low power*), tornou viável a aplicação da colheita de energia para alimentar esses dispositivos. A tabela 6 apresenta uma comparação entre um sistema típico composto por sensor, microcontrolador e transmissor sem fio convencional e um de baixíssimo consumo.

Tabela 6 – Comparação entre um sistema convencional e um de baixíssimo consumo (fonte: Handbook, 2013)

Unidade	<i>Ultra low power</i>	Convencional
Microcontrolador	160 $\mu\text{A}/\text{MHz}$	500 $\mu\text{A}/\text{MHz}$
Sensor	120 μA	> 1 mA
Transmissor de alta frequência	3 mA	15 mA
Transmissor de baixa frequência	120 μA	70 mA

Para fazer uma boa gestão da energia e reduzir o consumo para o mínimo, em geral os equipamentos presentes são alimentados apenas quando utilizados. No restante do tempo, eles trabalham no modo soneca, com consumo mínimo de energia.

A complexidade do parâmetro mensurado e a número de transmissões por segundo influenciam significativamente o consumo de energia. Segundo Torfs (2006), um nó sensor para um sensor de pulsoximetria necessita de 90 μW para seu funcionamento, processamento de dados e transmissão entre intervalos de 15 segundos. Esse exemplo representa um caso relativamente complexo e com taxas de dados altas.

Uma característica para o monitoramento de parâmetros é a sua velocidade de mudança. O ciclo de trabalho (*duty cycle*), em termos de medição e análise, é na ordem de horas e dias ao invés de segundos ou minutos. Isso porque uma alteração desses parâmetros não é imediata. Com isso, ele é feito em snapshots amostradores (*sampling*) e tem influência significativa no consumo de energia e designs do dispositivo de colheita de energia.

2.3.1. Unidade de sensoriamento

A unidade de sensoriamento é formada, basicamente, por um transdutor ou sensor e um conversor analógico-digital. Os sensores traduzem os fenômenos físicos de um ambiente para sinais elétrico.

O consumo depende do modo de operação e do tipo de grandeza medida. Dentre as fontes de consumo na unidade, mencionam-se a amostragem de sinal e conversão de sinais físicos, o condicionamento do sinal e a conversão analógico digital.

A partir de um determinado fenômeno mensurado, os sensores geram sinais analógicos. Eles são convertidos para sinais digitais pelos conversores AD (analógico digital) e que por fim são utilizados como entrada pela unidade de processamento.

A empresa IMI Sensors apresenta uma série de sensores desenvolvidos especialmente para o monitoramento da vibração de peneiras vibratórias. Como o

equipamento é projetado para operar com altos níveis de vibração, os sensores possuem uma faixa ótima de baixa sensibilidade e grande alcance (*low sensitivity high range*).

2.3.2. Unidade de processamento

A unidade de processamento (*MCU – Microcontroller Unit*), é responsável por prover inteligência ao nó sensor. É ele quem controla os sensores, a execução dos protocolos de comunicação e a execução de algoritmos para o processamento do sinal obtido da unidade de sensoriamento. Em geral, é composta por um processador e uma memória.

Os microcontroladores suportam vários modos de operação, cada um com uma característica de dissipação de energia determinada. A tabela 7 apresenta a potência consumida de diferentes microcontroladores para modos de operação próprios para cada fabricante. A não uniformidade entre as nomenclaturas para esses modos de operação torna a comparação imprecisa, porém algumas tarefas além do processamento de dados desempenhado são a mensuração e transmissão de dados como parâmetros físicos ou valores processados.

Tabela 7 – Comparação entre as potências de consumo para vários microcontroladores com diferentes modos de operação (fonte Handbook, 2013)

TEXAS INSTRUMENTS		ENERGY MICRO AS		MICROCHIP TECHNOLOGY	
MSP430F5437	3V 1 MHz	EFM32	3V 1 MHz	PIC24F16KA102	3,3V 1 MHz
		G89F128			
Modo ativo	1110 μ W	EM0	660 μ W	Operação padrão	1204 μ W
Modo de baixa potência 0	258 μ W	EM1	309 μ W	Modo ocioso	26,4 μ W
Modo de baixa potência 2	24 μ W	EM2	2,7 μ W	Modo soneca	6,6 μ W
Modo de cristal de baixa potência 3	7,8 μ W	EM3	1,77 μ W	Modo sono profundo	0,07 μ W
Modo VLO de baixa potência	5,4 μ W	EM4	0,66 μ W		
Modo de baixa potência 4	5,07 μ W				

2.3.3. Unidade de transmissão/recepção

A unidade de transmissão e recepção de dados é a unidade que apresenta o maior consumo de energia em um nó sensor. Ela inclui o sistema de transmissão e recepção, o amplificador e a antena.

A transmissão pode ser feita por meio de um dispositivo de rádio frequência ou por óptica. A primeira se baseia em ondas eletromagnéticas e o tamanho da antena deve ser de pelo menos um quarto do comprimento de onda para otimizar a comunicação. A segunda, utiliza raios laser para o envio de informação e pode ser dividida em ativa ou passiva.

O consumo de energia é influenciado por vários fatores, tais como o tipo de modulação utilizado, a taxa de dados, a potência de transmissão e o ciclo de trabalho operacional (*duty cycle*).

2.3.4. Unidade de energia

A unidade de energia é responsável por alimentar todos os componentes do nó sensor. As fontes de energia mais utilizadas são as baterias e pilhas.

Os tipos mais comuns de bateria utilizadas são a linear simples, a de lítio NR e bateria botão de lítio. Uma alternativa para o armazenamento da energia coletada é por meio do uso de supercapacitores. Alguns dos pontos positivos dessa tecnologia é que ele se carrega de forma rápida, em segundos, ele fornece correntes instantâneas, seu ciclo de vida é praticamente ilimitado e é ecologicamente correto, diferentemente da bateria que apresenta problemas quanto ao seu descarte.

Uma alternativa para a alimentação dos nós sensores é a colheita de energia. Com a redução do consumo de energia, novas oportunidades para mecanismos de colheita estão sendo desenvolvidas.

2.4. Colheita de energia

A colheita de energia é o processo pelo qual energia é captada do meio ambiente e convertida em energia elétrica destinada a alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo.

O diagrama da figura 11 apresenta um esquema simplificado de um dispositivo de monitoramento genérico que utiliza a colheita de energia para aumentar a sua autonomia. Nela estão representadas quatro fontes para a colheita de energia: a solar, a de vibração, a térmica e a de radiofrequência. A energia coletada é gerenciada pelo sistema de alimentação do dispositivo que, por sua vez, alimenta o microcontrolador (MCU – *MicroController Unit*). O sistema ainda possui sensores, um amplificador e um dispositivo para comunicação sem fio.

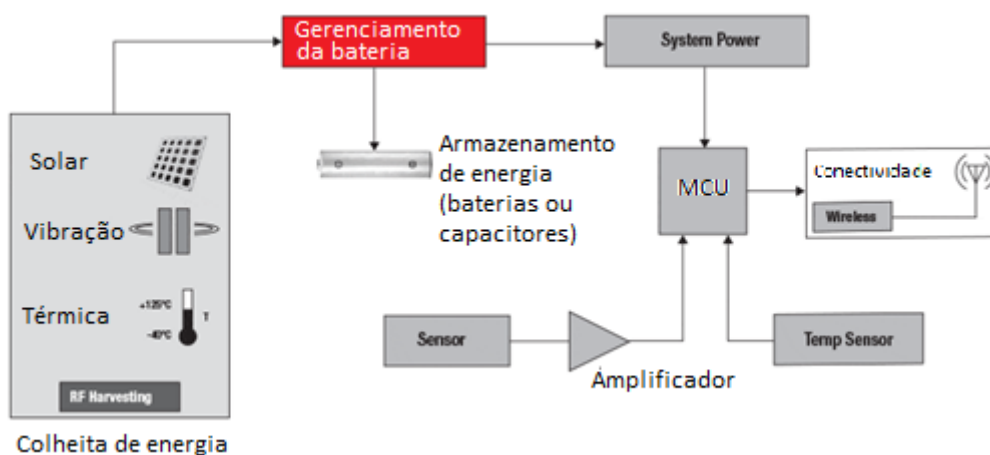


Figura 10 – Diagrama de um sistema com colheita de energia (adaptado de Texas Instruments, 20--)

A figura 11 mostra um exemplo da colheita de energia utilizada para aumentar a autonomia do dispositivo. O uso da colheita de energia pode ser direto ou indireto. Na condição de uso indireto, como no exemplo apresentado, a energia coletada é armazenada em baterias ou capacitores até que se possa ser utilizada. Já no uso direto, é possível dispensar por completo o uso de fontes de auxiliares de energia, uma vez que a energia coletada é suficiente para alimentar todos os componentes do sistema.

A configuração mais comum é o uso indireto da energia coletada, já que a energia requerida pelo dispositivo é na maioria dos casos maior que a disponível. De acordo com Depexe (2014), a determinação da condição que será aproveitada depende

de três fatores: a densidade de potência disponível, a eficiência da conversão e o comportamento da carga.

Em um sistema de colheita de energia, são importantes os transdutores, responsáveis pela conversão da energia disponível em energia elétrica e em alguns casos, os retificadores.

Modos de aproveitamento

Das fontes de energia disponíveis no meio, as principais utilizadas para dispositivos de colheita de energia são a cinética, térmica e eletromagnética. O modo de aproveitamento de cada uma delas será discutido de maneira breve a seguir.

Cinético

A energia cinética em geral está associada à vibração. Ela pode ser convertida para energia elétrica por meio de um transdutor eletromecânico. Alguns exemplos desses transdutores estão ilustrados na figura 11 e utilizam como princípio os efeitos piezelétricos, eletromagnéticos e eletroestáticos para fazer essa conversão.

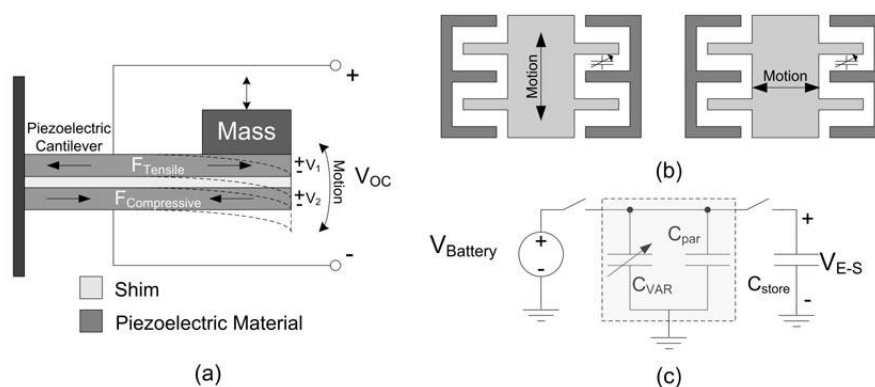


Figura 11 – Modos de aproveitamento da energia de vibração (fonte: Yildiz, 2009)
 (a) piezelétrico; (b) eletromagnético; (c) eletroestático

Piezelétrico

Esse modo de aproveitamento utiliza os princípios da piezeletricidade para converter energia mecânica em energia elétrica.

A piezeletricidade está relacionada à estrutura cristalina do cristal, a qual deve ser anisotrópica, ou seja, a resposta a um estímulo não é igual em todas as direções. Quando pressionado, os centros gravitacionais das cargas positivas e negativas de um cristal piezelétrico deixam de ser neutros, formando pequenos dipolos com esses centros gravitacionais. Essa assimetria de polarização iônica resultante gera macroscopicamente um campo elétrico na superfície do material, que pode ser usado para converter energia mecânica em elétrica. A figura 12 ilustra o efeito descrito, no qual uma molécula é comprimida e polarizada.

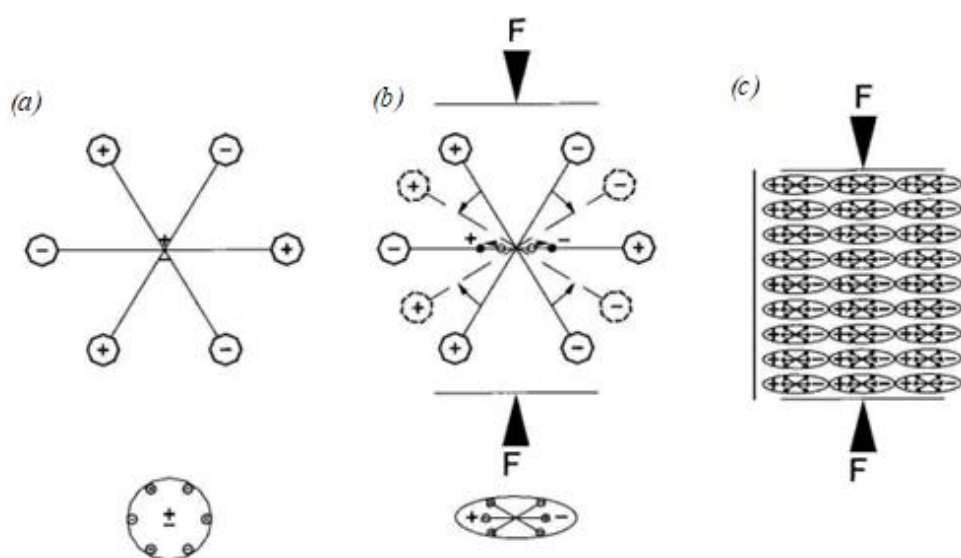


Figura 12 – Modelo molecular simples do efeito piezelétrico direto (fonte: Cotta, 20--?)

(a) Molécula sem deformação (b) Molécula sujeita a uma força (c) Efeito de polarização na superfície do metal

O efeito da piezeletricidade é uma propriedade relacionada à estrutura cristalina de alguns materiais em que eles se tornam eletricamente polarizados quando submetidos a uma tensão mecânica. Existem dois efeitos associados a essa propriedade: o efeito direto e o indireto. No efeito piezelétrico direto, aplica-se uma tensão e verifica uma polarização proporcional a essa tensão. No efeito indireto, ocorre o contrário. A aplicação de um campo elétrico num material piezelétrico gera deformações em sua estrutura física.

Dentre os materiais mais utilizados, estão o quartz, o titanato zirconato de chumbo (PZT), o nitreto de alumínio (AlN), o óxido de zinco (ZnO) e o fluoreto de polivinilideno (PVDF).

A técnica utiliza um material piezelétrico para a geração de energia elétrica. A configuração mais comum para um sistema oscilante é o material piezelétrico colado a uma viga (*cantilever*). A tensão varia com a deformação, produzindo um sinal alternado e irregular. É função do circuito retificador fazer o tratamento desse sinal de acordo com a necessidade da carga alimentada.

Eletromagnético

O princípio do aproveitamento eletromagnético é baseado na lei de Faraday. A variação do fluxo magnético por uma bobina induz uma força eletromotriz, que por sua vez, irá gerar uma corrente induzida na espira.

Existem duas configurações para a colheita de energia por meio desse método. Na primeira, a variação do fluxo é obtida com uma bobina fixa e um ímã em movimento e na segunda, o ímã é fixo e o fluxo está associado ao movimento da bobina. Em geral, é preferível a primeira configuração pois os fios elétricos estão fixos.

Os parâmetros que interferem na geração de energia são o comprimento da bobina e a aceleração envolvida. O comprimento da bobina é diretamente proporcional ao campo elétrico obtido e, conseqüentemente, à geração de energia.

Eletroestático

O aproveitamento eletrostático é feito por meio de capacitores variáveis. Inicialmente carregado, a vibração gera um movimento relativo nas placas do capacitor no campo elétrico.

Esse tipo de conversão de energia é feito por meio de capacitores variáveis. Inicialmente, o capacitor é carregado. O movimento oscilatório devido a vibração acarreta no movimento relativo entre as placas do capacitor. Com a separação das placas, a capacitância é reduzida que acarreta em um fluxo de cargas. É desse modo que a energia mecânica é convertida em energia elétrica.

Térmico

O aproveitamento térmico utiliza o efeito Seebeck para um determinado gradiente de temperatura. Geralmente esse gradiente é entre a fonte de calor, máquina, e a temperatura ambiente. O efeito Seebeck consiste na criação de um diferencial de potência quando dois materiais (metais ou semicondutores) são conectados em temperaturas diferentes.

O efeito Seebeck se baseia em dois fenômenos: a difusão de portadores de carga e o arrastamento fônon. A figura 13 é uma representação esquemática do efeito, no qual a diferença de temperaturas entre os lados quente e frio geram um fluxo de elétrons no telureto de bismuto tipo N e um fluxo de vazios no tipo P. Com isso, cria-se uma diferença de potencial e permite a passagem de corrente.

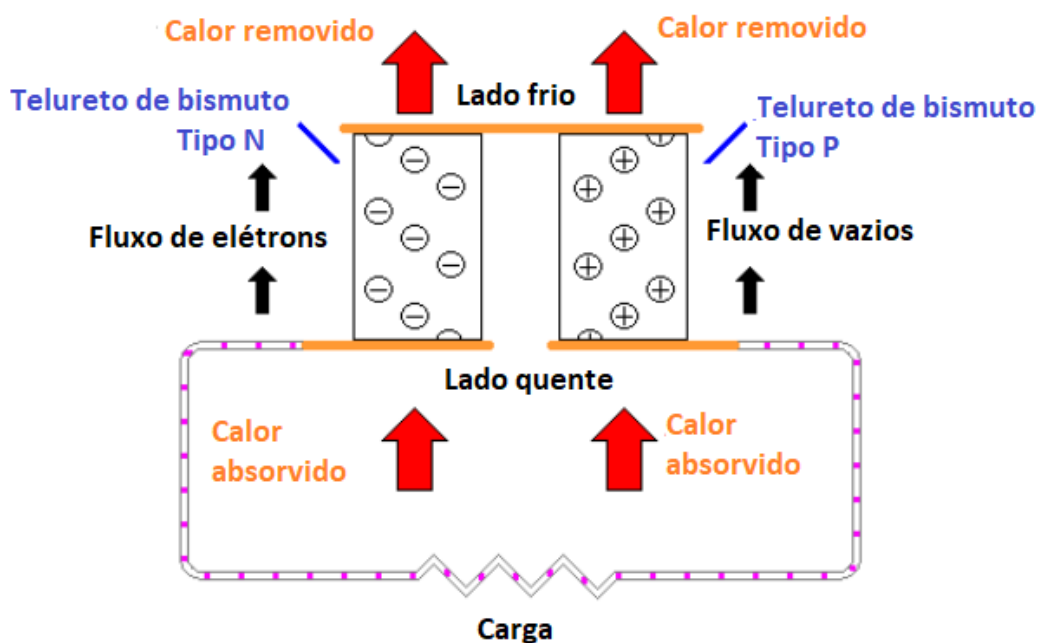


Figura 13 – Efeito Seebeck (adaptado de Yildiz, 2014)

Os geradores termelétricos (TEG) nada mais são que transdutores, como da figura 13, conectados termicamente em paralelo e eletricamente em série.

Algumas características que um bom gerador termelétrico deve apresentar são um coeficiente de Seebeck alto, para produzir a tensão desejada, um coeficiente de

condutividade elétrica alta, para reduzir o ruído térmico e uma baixa condutibilidade térmica, para reduzir perdas.

Solar

Assim como nos sistemas de macrogeração, a energia solar é coletada por meio de células fotovoltaicas. Essas células são dispositivos semicondutores que se baseiam no efeito fotovoltaico que alguns materiais apresentam. Dentre os materiais utilizados para o aproveitamento solar, destacam-se os silícios cristalino e amorfo, telureto de cádmio, os CIGS (células de filme fino fabricadas com Cu(In,Ga)Se_2), entre outros.

Nesse modo de aproveitamento, a luz absorvida por esses materiais se converte em energia, que por sua vez desloca os elétrons de suas camadas atômicas. Os elétrons livres dão origem ao surgimento de uma corrente elétrica.

Feitas de silício dopado, a criação de corrente em uma célula é feita devido à formação de pares elétrons-lacunas quando a junção PN é exposta à luz. Em ambientes internos, iluminados artificialmente, a densidade de potência coletada pode chegar a $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ e em externos, até os $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$, segundo Yildiz (2009).

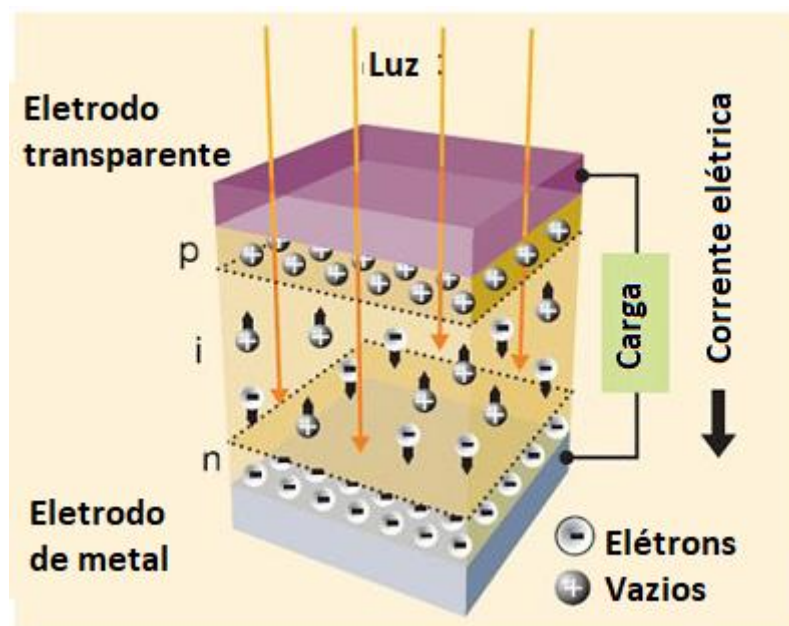


Figura 14 – Célula fotovoltaica (adaptado de Gabay, 2012)

Segundo Paradiso e Starner (2005) células fotovoltaicas de cristais policristalinos apresentam eficiência de conversão entre 16 e 17%, enquanto monocristalinos, de 20%.

Dentre as fontes, ela é a que apresenta a maior densidade de energia disponível. Além disso, as células não são submetidas a movimentos relativos, o que implica na ausência de problemas relacionados à fadiga.

Radiofrequência

O modo de aproveitamento por radiofrequência utiliza os campos eletromagnéticos para geração de energia elétrica.

Vários autores propõe a obtenção de energia elétrica da energia das ondas de radiofrequência. O espectro de frequências que compreendem as radiofrequências situa-se na faixa de 3kHz até 300 GHz. Para a captura da energia da onda presente, é utilizada um tipo particular de antena, chamado de *rectenna*. Nele, a onda é retificada para tensão contínua para então ser utilizada pelo dispositivo consumidor.

Para fins comparativos, a tabela 8 apresenta um compilado de diferentes métodos de colheita de energia e as respectivas densidades de energia obtidas. As características de como foram obtidas essas densidades estão apresentadas assim como a respectiva referência bibliográfica.

Tabela 8 – Tabela comparativa entre a densidade de potência para diferentes métodos de colheita de energia

Modo de aproveitamento	Observações	Densidade de potência	Referência
Eletrostático	Frequência de 10 Hz e amplitude de 1000 μm	15 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Suzuki (2011)
	Frequência de 20 Hz e amplitude de 1130 μm	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Miao et al (2006)
Células fotovoltaicas	Ambiente externo	15 mW/cm^3	Roundy et al (2004)
	Ambiente interno (10 W/m^2)	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Wan, Tan e Yuen (2011)
Turbina geradora eólica	Ambiente externo, ventos de 8,4 m/s	3,5 mW/cm^2	Wan, Tan e Yuen (2011)
	Ambiente externo, ventos de 5 m/s	380 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Roundy et al (2004)
Gerador termelétrico	Gradiente de temperatura de 5°C	60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Stevens (1999)
	Gradiente de temperatura de 30°C	3,5 mW/cm^2	Wan, Tan e Yuen (2011)
Microgerador	Movimento humano (Hz)	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Mitcheson et al (2004)
	Movimento de máquina (kHz)	800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	
Piezelétrico		200 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Roundy, Wright e Pister (2002)
Radiofrequência		1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Yeatman (2004)

2.5. Seleção do modo de colheita

Por se tratar de uma aplicação em ambiente externo, o dispositivo deve ser provido de uma carcaça que suporte as severas condições de trabalho. Isso deve ser levado em consideração na escolha do melhor método de colheita.

O uso de células fotovoltaicas para o caso da peneira vibratória na indústria da mineração apresenta algumas limitações práticas. Por ser um ambiente com muita poeira e sujeira, a deposição dessas partículas sobre a superfície das células é inevitável e acarreta em uma redução da energia coletada.

Calor é uma fonte interessante para grandes máquinas, como no caso da peneira vibratória. As vantagens desse tipo de energia estão na ausência de vibração nos componentes do mecanismo de colheita, não havendo, dessa forma, problemas de fadiga. Ainda, é possível trabalhar por longos períodos de tempo em ambientes severos (temperaturas elevadas).

Para dispositivos que aproveitam a energia de vibração, um desafio para os sistemas de monitoração é o casamento entre a frequência de ressonância do transdutor com a frequência de excitação da aplicação em questão.

A tabela 9, retirada do Handbook of Energy Harvesting (2013), apresenta de forma resumida as propriedades da energia disponível para diferentes aplicações.

Tabela 9 – Propriedades da energia disponível para diferentes aplicações (fonte: Handbook, 2013)

Parâmetro	Gradiente térmico	Amplitude da vibração	Frequência da vibração	Nível de luz	Data rate	Coverage
Automação predial	A/M/B	A	A	B/M/A	B	M
Monitoramento de condições	A	M/A	M/A	B/M	B/M	M
Monitoramento da saúde estrutural	B	B	A	B/M	M	M/A
Transporte	B	B/M	M	B	A	A
Logísticas	B	B/M	M	B	A	A
Consumo	B	B/M	M	M	-	B

Onde

Gradiente térmico		Amplitude de vibração g é a aceleração da gravidade		Frequência de vibração	
B	0 – 5 °C	B	< 0,1 g	B	1 – 10 Hz
M	5 – 20 °C	M	0,1 – 1 g	M	10 – 50 Hz
A	> 20 °C	A	> 1 g	A	> 50 Hz

Nível de luz		Taxa de dados e cobertura	
B	< 300 lx	B	cm
M	300 – 500 lx	M	m
A	> 500 lx	A	km

Considerando a análise qualitativa apresentada na tabela 10, tanto o aproveitamento térmico por gradiente de temperatura quanto o aproveitamento da vibração são modos interessantes para se realizar a colheita de energia. Em vista disso, a densidade de potência será fator determinante para a seleção do modo de aproveitamento a ser estudado.

A tabela 10 a seguir apresenta um comparativo entre transdutores de vibração com valores máximos de densidade de energia, principais vantagens e desvantagens.

Tabela 10 – Características de diferentes modos de aproveitamento (fonte: Roundy, 2004 e Jia, 2009)

Tipo	Equação de densidade de energia	Densidade de energia máxima (experimental)	Densidade de energia máxima (teórica)	Vantagens	Desvantagens
Piezelétrico	$U = \frac{\sigma_x^2 k^2}{2Y}$	17,7	355	Sem necessidade de fonte de tensão externa - Tensões de 2 a 10 V	-Grande impedância de saída -Fuga de corrente
Eletrostática	$U = \frac{\epsilon E^2}{2}$	4	44	- Tensões de 2 a 10 V	-Tensão externa requerida
Eletrodinâmica / Eletromagnética	$U = \frac{B^2}{2\mu_0}$	4	400	-Sem necessidade de fonte de tensão externa	-Máxima tensão de saída de 0,1 a 0,2 V
Térmica				-Longa vida útil -Pouca manutenção	-Eficiência de conversão baixa
Solar				-Fácil instalação	-Baixa eficiência

Tabela 11 – Densidade de potência para diferentes fontes de energia (fonte: Roundy, 2004)

Fonte de energia	Densidade de potência ($\mu W/cm^3$)
Solar (externa)	15.000
Solar (interna)	10
Temperatura	40 (considerando um diferencial de temperatura de 5°C)
Humana	330
Fluxo de ar	380
Variação de pressão	17
Vibração	375

A partir da tabela 11, observa-se que a densidade de potência devido a variação de temperatura é menor que a devido a vibração.

Assim, considerando que a eficiência de conversão térmica é baixa, será estudado a colheita de energia devido a vibração. A colheita será feita por transdutores piezelétricos.

Uma característica da energia gerada por esse método está associada a valores de tensão de saída da ordem de 2 a 10 V, importante e suficiente para superar as quedas devido ao diodo em um circuito retificador

3. REQUISITOS DO SISTEMA

Nessa seção, será definido os requisitos que o mecanismo de colheita deve atender. Não é objeto de estudo o desenvolvimento de um nó sensor e, por esse motivo, será selecionado um modelo presente no mercado. Os cálculos para determinar as características do mecanismo de colheita serão baseados nos requisitos desse nó.

Para determinar os requisitos do sistema, consultou-se nós sensores de diversas fabricantes. A tabela a seguir compila quatro nós sensores desenvolvidos por MEMSIC [a], Linear [b], Avanticsys [c] e BTnodes [d].

Tabela 12 – Valores típicos de alguns nós sensores presentes no mercado

	LPR2400 [a]	SmartMesh LTC5800 [b]	MTM-CM3000- MSP [c]	BTnode rev 3 [d]
Tensão de	2,7 – 3,3	2,1 – 3,8 V	2,1 – 3,6 V	2 – 3,3 V
alimentação	V			
Modo soneca	10 μ A	1,2 μ A	1 μ A	3 mA
Nominal	50 mA	-	-	25 mA
Recepção	16 mA	4,7 mA	19,7 mA	31 mA
Transmissão	17 mA	9,9 mA	17,4 mA	31 mA

O nó sensor deve possuir transmissão de dados sem fio de baixo consumo, de como apresentado na seção 3.1. Com exceção do BTnode ver 3, todos os nós sensores apresentados na tabela 11 utilizam como protocolo o IEEE 802.15.4.

A tensão de alimentação requerida pelos nós sensores situam-se na faixa entre 2 a 3,6 V. Essa será a faixa de tensão a ser fornecida pelo mecanismo de colheita.

[a] MEMSIC. LPR2400, catálogo. 20---. Disponível em:

<http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/6020-0705-01_A_LOTUS.pdf>

[b] LINEAR. SmartMesh, catálogo. 20---. Disponível em:

<<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/5800ipmfa.pdf>>

[c] ADVANTICSYS. MTM-CM3000-MSP, catálogo. 20---. Disponível em:

<<https://www.advanticsys.com/shop/mtmcm3000msp-p-6.html?zenid=920b4ce80345bd2cb7d2369b271cabf3>>

[d] BTnodes. Catálogo, 20---. Disponível em:

<<http://www.btnode.ethz.ch/Documentation/BTnodeRev3HardwareReference#ntoc4>>.

É interessante observar que embora o SmartMesh tenha como principal aplicação o monitoramento de ambientes condicionados, ou seja, fornecer as condições de temperatura, pressão e umidade para a automação do sistema de ar condicionado ou refrigeração, o nó sensor foi desenvolvido para ser operado tanto com baterias quanto com mecanismos de colheita de energia. Os outros nós sensores apresentados na tabela 11, por sua vez, sugerem como fonte de alimentação pilhas AA.

Já o nó sensor LPR2400, próprio para o monitoramento das condições de máquinas em ambientes industriais, apresenta valores de correntes nominais mais elevados que o SmartMesh. Por apresentar uma aplicação mais próxima a desse trabalho, será utilizado como referência os valores do LPR2400 (Lotus Mote).



Figura 15 – Nó sensor LPR2400 (Lotus Mote) (fonte: MEMSIC, 20--)

A figura 15 mostra uma vista do nó sensor. Ele possui dimensões de 76 x 34 x 7 mm. Como decisão de projeto, o mecanismo de colheita deverá apresentar dimensões próximas ao do nó.

Para uma condição de alimentação direta, a potência exigida pelo nó sensor no modo de operação nominal é de 135 mW.

4. MODELAGEM

Na literatura, são encontradas diferentes abordagens para a modelagem de um dispositivo de colheita de energia a partir de um material piezelétrico. Nesse trabalho, o modelo adotado foi o desenvolvido por Roundy e Wright (2004). Nele, é feita uma analogia elétrica-mecânica de modo a transformar tanto os elementos piezelétricos quanto os mecânicos em elementos de um circuito para posteriormente substituir os parâmetros em termos de entidades mecânicas.

4.1. Modelagem do gerador piezelétrico

O efeito piezelétrico acopla os movimentos mecânicos à energia elétrica em um material. Para um material linearmente piezelétrico, o acoplamento eletromecânico pode ser expresso pelas equações constitutivas (1) e (2).

$$\{S\} = [s^E]\{T\} + [d]^T\{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [d]\{T\} + [\epsilon^T]\{E\} \quad (2)$$

Onde $\{S\}$ é o vetor de dimensão 6 da deformação, $\{T\}$ é o vetor de tensão, $\{D\}$ é o vetor de dimensão 3 do deslocamento elétrico, $\{E\}$ é o vetor do campo elétrico, $[s^E]$ é a matriz 6 x 6 de compliance avaliada em campo elétrico constante, $[d]$ é a matriz 3 x 6 dos coeficientes de deformação piezelétricos e $[\epsilon^T]$ é a matriz 3 x 3 da constante dielétrica avaliada para tensão constante.

É interessante observar que a nomenclatura utilizada segue Tzou (1993), T representa a tensão devido à combinação dos efeitos mecânicos e elétricos, enquanto que σ representa a tensão devido a apenas efeitos mecânicos.

Uma hipótese adotada é que o material piezelétrico é solicitado apenas ao longo do eixo 1, conforme figura 16.

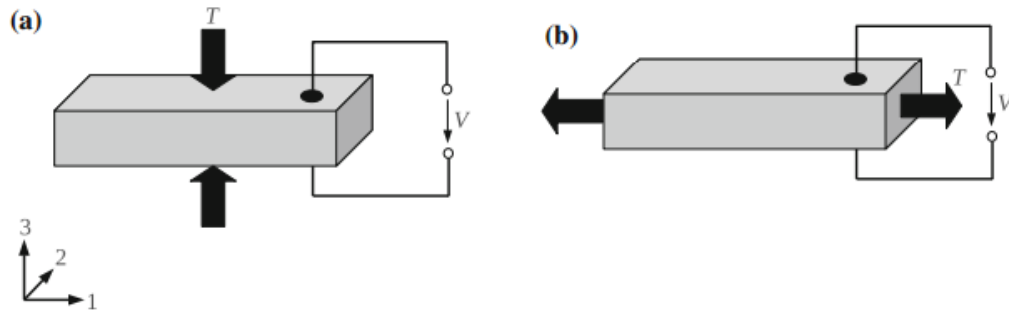


Figura 16 – Modos 33 (a) e 31 (b) (fonte: Hehn & Manoli, 2015)

Com a solicitação em apenas um sentido, as equações constitutivas (1) e (2) podem ser simplificadas para:

$$S = s T + d_{31} E \quad (3)$$

$$D = d_{31} T + \varepsilon E \quad (4)$$

A representação esquemática do modelo adotado pode ser encontrada nas figuras 17 e 18. O modelo é composto por uma viga metálica sobreposta por duas camadas de material piezelétrico (bimórfico), uma superior e uma inferior. Como a frequência no qual se irá coletar a energia é baixa, a massa de prova na ponta tem como objetivo auxiliar a sintonização da frequência natural do dispositivo com a frequência do sistema da peneira. As coordenadas x , y e z representam, respectivamente, a direção ao longo da viga, a direção da amplitude de vibração e o deslocamento da massa m .

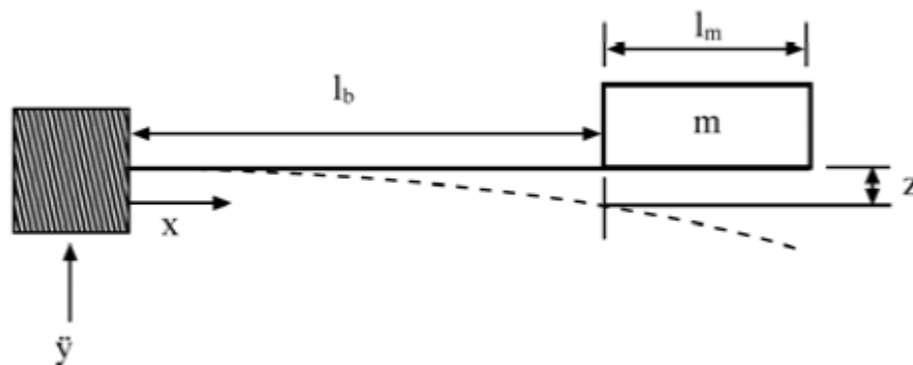


Figura 17 – Esquema do dispositivo de colheita de energia (fonte: Roundy e Wright, 2004)

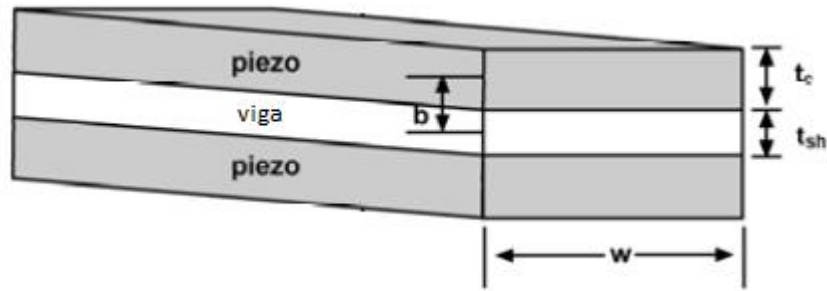


Figura 18 – Esquema da composição da viga (adaptado de Roundy e Wright, 2004)

O modelo da viga é representado pelo circuito elétrico equivalente, figura 19. Nesse modelo, L_m representa a massa de inércia, R_b representa o amortecimento mecânico, C_k representa a rigidez mecânica, σ_{in} representa a tensão devido às vibrações da peneira. n representa a relação de voltas na espira do transformador e C_b a capacitância do material piezelétrico.

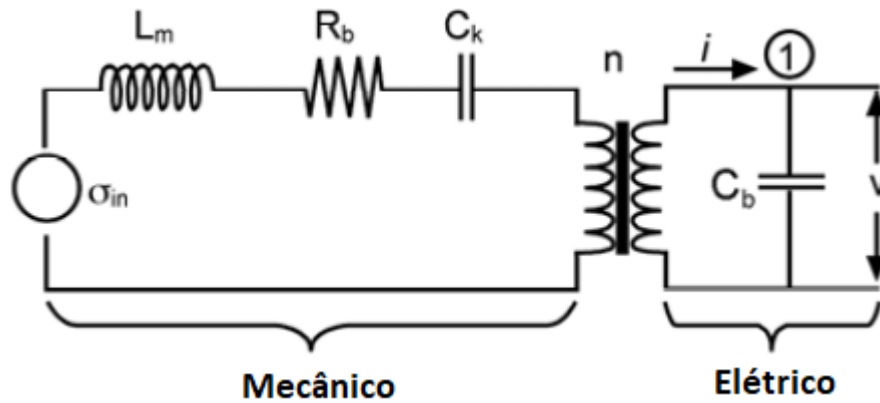


Figura 19 – Representação do circuito elétrico equivalente do gerador piezelétrico (fonte: Roundy e Wright, 2004)

A partir do circuito definido na figura 19, as equações do sistema são determinadas através da primeira e da segunda Lei de Kirchhoff. Assim:

$$\sigma_{in} = L_m \ddot{S} + R_b \dot{S} + \frac{S}{C_k} + nV \quad (5)$$

$$i = C_b \dot{V} \quad (6)$$

A determinação de expressões equivalentes para σ_{in} , L_m , R_b , C_k , n e i em função dos termos geométricos e mecânicos do sistema é importante. Roundy e Wright (2004) apresentam em seu trabalho tais expressões.

$$\sigma_{in} = k_1 m \ddot{y} \quad (7)$$

$$L_m = k_1 k_2 m \quad (8)$$

$$R_b = k_1 k_2 b_m \quad (9)$$

$$C_k = s = c_p^{-1} \quad (10)$$

$$n = -\frac{ad_{31}c_p}{2t_c} \quad (11)$$

$$i = awl_e d_{31} c_p \dot{S} \quad (12)$$

$$C_b = \frac{a^2 \epsilon w l_e}{2t_c} \quad (13)$$

$$\sigma_m = k_1 m \ddot{z} \quad (14)$$

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (15)$$

Onde a constante $a = 1$ se os eletrodos estiverem conectados em série e $a = 2$ se os eletrodos estiverem conectados em paralelo. ϵ_0 é a permissividade do vácuo, cujo valor é de aproximadamente $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. As demais constantes utilizadas nas equações (7-13) são definidas a seguir.

$$k_1 = \frac{b(2l_b + l_m - l_e)}{2I} \quad (16)$$

$$k_2 = \frac{l_b^2 \left(2l_b + \frac{3}{2}l_m\right)}{3b(2l_b + l_m - l_e)} \quad (17)$$

$$I = 2 \left(\frac{w t_c^3}{12} + w t_c b^2 \right) + \frac{\eta_s w t_{sh}^3}{12} \quad (18)$$

$$\eta_s = \frac{c_{sh}}{c_p} \quad (19)$$

$$b = \frac{t_c + t_{sh}}{2} \quad (20)$$

Substituindo adequadamente as equações (7-19) em (5) e (6), as equações do sistema em termos das variáveis S , $\dot{S}$ e V ficam:

$$\ddot{S} = -\frac{k}{m}S - \frac{b_m}{m}\dot{S} + \frac{k}{m} \frac{d_{31}a}{2t_c}V + \frac{\ddot{y}}{k_2} \quad (21)$$

$$\dot{V} = \frac{2t_c d_{31} c_p}{a\epsilon} \dot{S} \quad (22)$$

Onde

$$k = \frac{c_p}{k_1 k_2} \quad (23)$$

No espaço de estados, as equações (21) e (22) resultam em

$$\begin{bmatrix} \dot{S} \\ \ddot{S} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b_m}{m} & \frac{kd_{31}a}{2mt_c} \\ 0 & \frac{2t_c d_{31} c_p}{a\epsilon} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ \dot{S} \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{k_2} \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad (24)$$

4.2. Modelagem do gerador piezelétrico com carga resistiva

Adotando um modelo de carga resistiva, o circuito pode ser representado pela figura 20. Nesse modelo, a situação representada é o modo de colheita direta de energia, ou seja, a energia coletada pelo dispositivo atende aos requisitos do sistema.

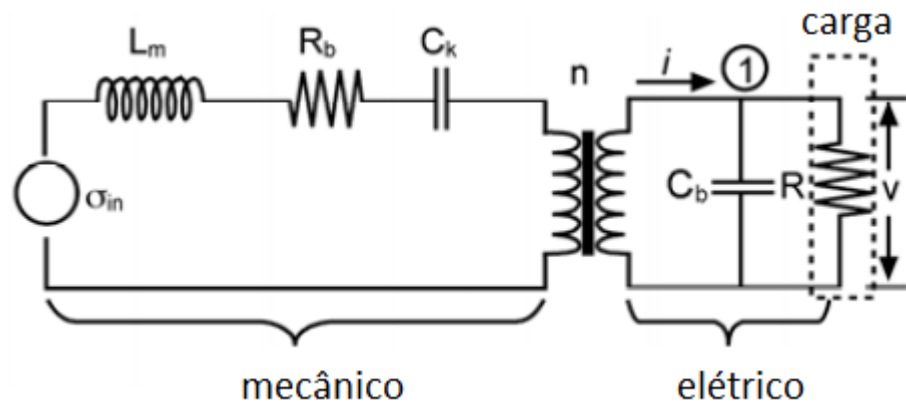


Figura 20 – Representação do circuito do gerador piezelétrico com carga resistiva (adaptado de Roundy e Wright, 2004)

O circuito mecânico permanece o mesmo em comparação ao desenvolvido no tópico anterior. É de se esperar, portanto, que a equação do circuito equivalente seja a

mesma (equação (5)). O circuito elétrico, por sua vez, apresenta em paralelo o capacitor C_b e o resistor R . Assim, a equação deve ser utilizada a equação (25).

$$\dot{V} = \frac{2t_c d_{31} c_p}{a\epsilon} \dot{S} - \frac{1}{RC_b} V \quad (25)$$

O espaço de estados para esse novo cenário fica

$$\begin{bmatrix} \dot{S} \\ \ddot{S} \\ \dot{V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k}{m} & -\frac{b_m}{m} & \frac{k d_{31} a}{2m t_c} \\ 0 & \frac{2t_c d_{31} c_p}{a\epsilon} & -\frac{1}{RC_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ \dot{S} \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{k_2} \\ 0 \end{bmatrix} \ddot{y} \quad (26)$$

Aplicando a transformada de Laplace para as equações (21) e (25), fica:

$$S \left(s^2 + \frac{b_m}{m} s + \frac{k}{m} \right) = \frac{a k d_{31}}{2m t_c} V + \frac{A_{in}}{k_2} \quad (27)$$

$$V = \frac{2t_c d_{31} c_p}{a\epsilon} S + \frac{1}{RC_b} \frac{V}{s} \quad (28)$$

$$S = \frac{a\epsilon}{c_p d_{31} t_c s} \left(s - \frac{1}{RC_b} \right) V \quad (29)$$

Substituindo (29) em (27), a expressão resultante é

$$V \left[s^3 + \left(\frac{1}{RC_b} + \frac{b_m}{m} \right) s^2 + \left(\frac{k}{m} \left(1 + \frac{d_{31}^2 c_p}{\epsilon} \right) + \frac{b_m}{m RC_b} \right) s + \frac{k}{m RC_b} \right] = \frac{2c_p d_{31} t_c}{k_2 a \epsilon} s A_{in} \quad (30)$$

Substituindo convenientemente as relações (31-34), a equação (30) pode ser representada por (35).

$$\frac{d_{31}^2 c_p}{\epsilon} = k_{31}^2 \quad (31)$$

$$s = j\omega \quad (32)$$

$$\frac{k}{m} = \omega_n^2 \quad (33)$$

$$\frac{b_m}{m} = 2\zeta\omega_n \quad (34)$$

$$V = \left\{ j\omega \frac{2c_p d_{31} t_c A_{in}}{a\varepsilon k_2} \right\} \left\{ \left[\frac{\omega_n^2}{RC_p} - \left(\frac{1}{RC_b} + 2\zeta\omega_n \right) \omega^2 \right] + j\omega \left[\omega_n^2 (1 + k_{31}^2) + \frac{2\zeta\omega_n}{RC_b} - \omega^2 \right] \right\}^{-1} \quad (35)$$

Para o caso resistivo, a potência pode ser calculada como

$$Pot = \frac{|V|^2}{2R} \quad (36)$$

4.3. Restrições

A teoria usada por Roundy e Wright (2004) é simplificada, de modo que não considera a rotação das seções transversais da viga. Segundo Meirovitch (1975), uma regra geral é que esse modelo serve para vigas onde o comprimento é pelo menos 10 vezes maior que a espessura. Com essa consideração, a flexão pode ser desconsiderada.

Uma outra abordagem que deve ser feita quanto às restrições geométricas do mecanismo está associada à relação entre comprimento e largura da viga. No caso de comprimentos muito pequenos quando comparados à largura, o mecanismo pode vibrar segundo um modelo de placa, que possui modos mais complexos de vibração. Neste trabalho, como as condições de contorno são uniformes ao longo da largura, esse problema não interfere de maneira significativa na análise.

Não se pode garantir que em condições reais de operação, um mecanismo cujas dimensões de largura sejam suficientemente maiores que o comprimento para que se considere uma placa de fato se comporte como uma viga. Devido a insuficiência de informações encontradas na literatura, não se pode obter uma relação comum para largura e comprimento que distinga o modo de vibrar como de uma placa ou como de uma viga. Assim, será utilizado o bom senso e usar proporções parecidas com atuadores piezelétricos que são comercializados, como o da figura 21.

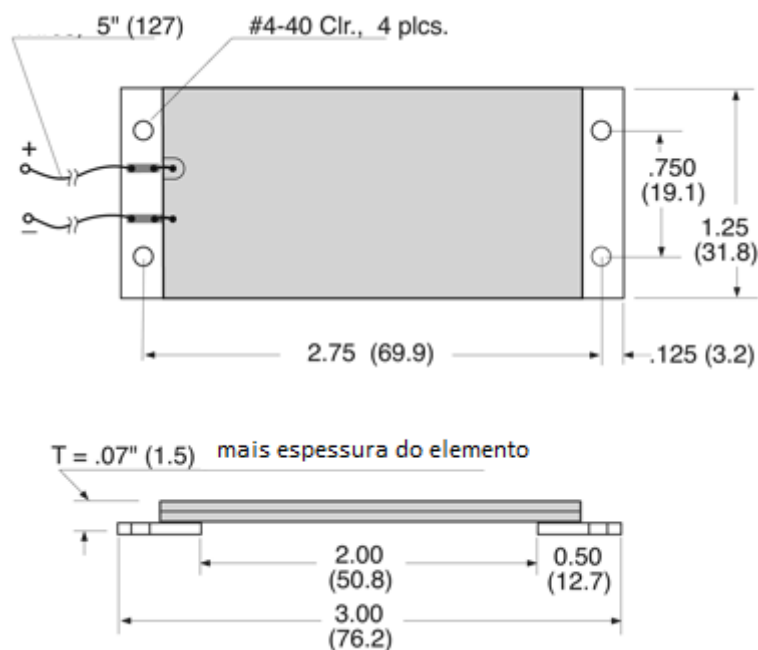


Figura 21 – Modelo de atuador piezelétrico da empresa Piezo Systems. Dimensões em parênteses em milímetros (fonte: Piezo Systems Inc., 2011).

Da figura 21, obtém -se uma relação entre a largura e o comprimento da viga de aproximadamente 40%. Assim, será utilizado essa relação como relação mínima entre a largura e o comprimento da viga para a simulação.

5. METODOLOGIA

A partir das equações definidas na seção anterior, foi desenvolvida uma planilha de cálculos no Excel. A partir dela, foi possível avaliar tanto a seleção dos materiais para o mecanismo de colheita quanto o dimensionamento do mesmo.

As fórmulas para o cálculo da frequência e da potência utilizadas na planilha estão expressas em (37) e (38). O desenvolvimento completo pode ser encontrado no apêndice.

$$\text{Pot} = l_e \left(\frac{2l_b + l_m - l_e}{l_b^2 (2l_b + 1,5 l_m)} \right)^2 \frac{36 w c_p^2 d_{31}^2 t_c A_{in}^2 b^2}{4 \varepsilon} \omega^3 \frac{K_2^2 + K_3^2}{(K_2^2 + K_3^2)^2} \frac{\sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}}{2\zeta} \quad (37)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{c_p w t_c^3 + 12 c_p w t_c b^2 + 0,5 w c_{sh} t_{sh}^3}{l_b^2 (2 l_b + 1,5 l_m) m}} \quad (38)$$

$$K_2 = -\omega^3 2\zeta \quad (39)$$

$$K_3 = \omega^3 \left(k_{31}^2 + 2\zeta \frac{\sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}}{2\zeta} \right) \quad (40)$$

De imediato, classificou-se os parâmetros presentes nas fórmulas (37) a (40) em categorias. Foram classificados em características do sistema, características do material e características geométricas.

Os parâmetros de entrada relacionados às características do sistema são aqueles que caracterizam o modo de operação da peneira. Na planilha de cálculos, esses valores foram organizados de modo a permitir ao usuário uma fácil identificação e modificação dessas características dependendo do sistema.

Tabela 13 – Características do sistema a ser preenchidas pelo usuário

Características do sistema	
A_{in}	m/s^2
a	-
Freq	Hz
ζ	-

A_{in} e Freq são respectivamente a aceleração e a frequência vibratória da peneira; ζ é a constante de amortecimento e a é uma constante relacionada à configuração do material piezelétrico. Se os eletrodos estiverem conectados em série, $a = 1$ e se os eletrodos estiverem conectados em paralelo, $a = 2$.

Para os parâmetros relacionados às características dos materiais, separou-se em características do material piezelétrico, do material da massa de prova e do material da viga. Assim como para as características do sistema, os parâmetros apresentados na tabela 14 permitem uma modificação rápida entre os materiais para comparar qual fornece os melhores resultados.

Nos apêndices, foram compiladas as características dos materiais simulados.

Tabela 14 – Características do material a ser preenchida pelo usuário

Características do material	
Material piezelétrico	
Descrição:	
K	-
d_{31}	m/V
c_p	N/m ²
k_{31}	-
Material massa de prova	
Descrição:	
ρ	kg/m ³
Material placa	
Descrição:	
c_{sh}	Pa

Para as características geométricas, a tabela 15 apresenta os parâmetros que são fixos. São elas associadas à espessura do material piezelétrico t_c e da viga t_{sh} , à largura do conjunto w , e a relação entre o comprimento do material piezelétrico e a da viga, l_e/l_b e entre o comprimento da massa de prova e da viga l_m/l_b , expressos em porcentagem.

Tabela 15 – Características geométricas

Características geométricas	
l_e/l_b	%
l_m/l_b	%
w	m
t_c	m
t_{sh}	m

5.1. Parâmetros adotados

Os valores típicos de aceleração e frequência vibratória foram apresentados na seção 2.1. Para a aceleração, adotou-se o multiplicador de 4,5 vezes a aceleração da gravidade. Para a frequência, considerando uma aplicação pesada da peneira, adotou-se uma frequência de 14 Hz.

Em relação aos parâmetros geométricos, foram adotadas três restrições. A primeira restrição está associada ao comprimento da massa de prova l_m . Foi adotado uma variação de 0 a 50% do comprimento da viga l_b . A segunda restrição está associada ao comprimento do material piezelétrico sobre a viga. Sua variação foi de 60% a 100% do comprimento da viga l_b .

Para a espessura, a terceira restrição, consultou-se o catálogo técnico da empresa Piezo Systems Inc. para verificar quais são as espessuras presentes no mercado. O material consultado foi o PSI-5H4E e os valores da espessura assim como o preço, estão expressos na tabela 16.

Tabela 16 – Espessuras e part-number das folhas piezelétricas Inc (fonte: Piezo Systems Inc., 20--?)

Part Number	Espessura (mm)	Preço
TI05-H4E-602	0,127	\$ 110
TI07-H4E-602	0,191	\$ 110
TI10-H4E-602	0,267	\$ 110

Para a espessura da placa t_c , foi utilizada como referência a espessura de 0,1 mm, conforme utilizado por Roundy e Wright (2004).

De modo a facilitar o entendimento, foi montado o fluxograma com os valores de entrada em cinza claro e os parâmetros calculados em cinza escuro.

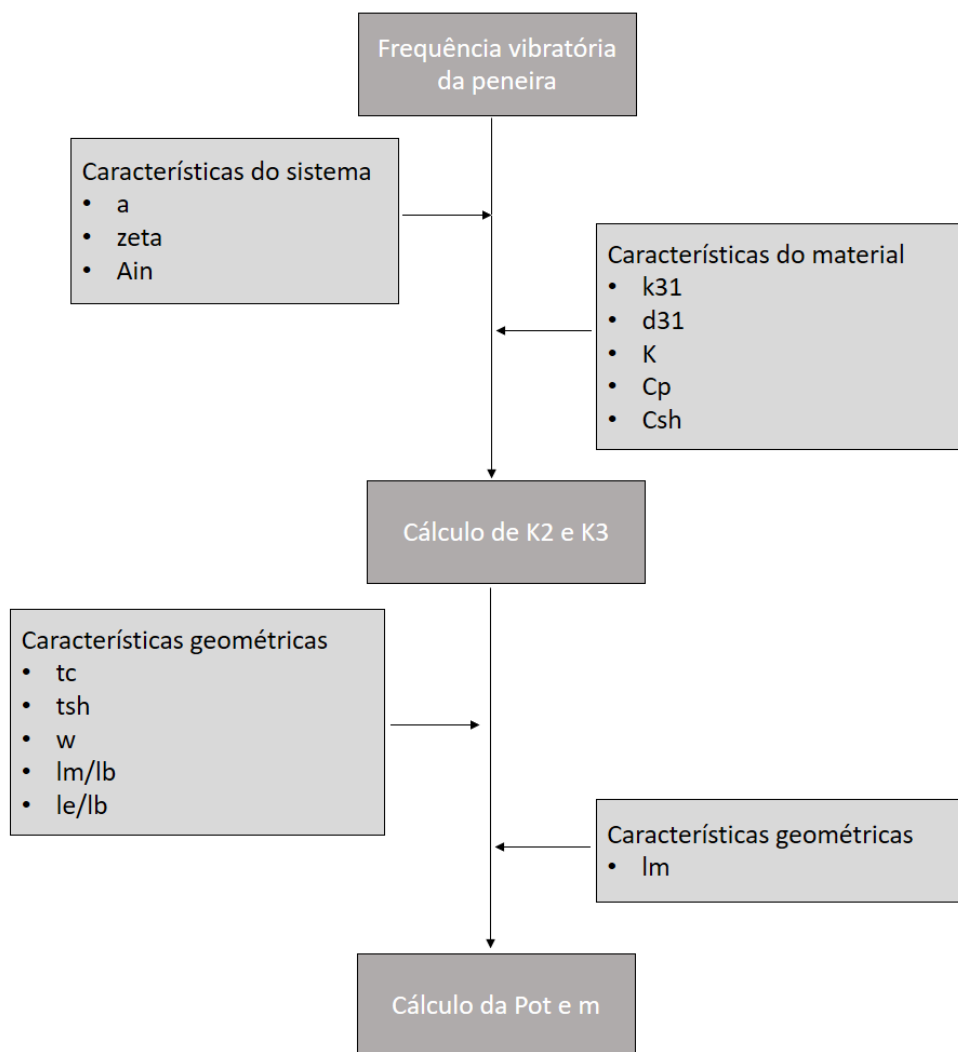


Figura 22 – Fluxograma da planilha de cálculo

Foram compiladas as fórmulas utilizadas e os parâmetros conhecidos e desconhecidos

$$\text{Pot} = l_e \left(\frac{2l_b + l_m - l_e}{l_b^2 (2l_b + 1,5 l_m)} \right)^2 \frac{9 w c_p^2 d_{31}^2 t_c A_{in}^2 b^2}{2 \varepsilon} \omega^3 \frac{K_2^2 + K_3^2}{(K_2^2 + K_3^2)^2} \sqrt{\frac{4\zeta^2 + k_{31}^4}{2\zeta}} \quad (36)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{c_p w t_c^3 + 12 c_p w t_c b^2 + 0,5 w c_{sh} t_{sh}^3}}{l_b^2 (2 l_b + 1,5 l_m) m} \quad (37)$$

Tabela 17 – Tabela com os parâmetros referentes às características do sistema, material do piezelétrico, da viga e da massa de prova

	Parâmetro	Valor	Unidade
Características do sistema	Pot desejada	0,135	W
	A _{in}	4,5 g	m/s ²
	g	9,81	m/s ²
	Freq	14	Hz
	ω	88	rad/s
	ζ	0,015	-
	a	2	-
Característica do material piezelétrico	Material	PSI-5H4E	
	ε	Equação (15)	N/V ²
	K	3800	-
	ε ₀	8,85E-12	N/V ²
	d ₃₁	3,2E-10	m/V
	c _p	6,20E+10	N/m ²
	k ₃₁	0,44	-
Característica do material da viga	Material	Aço carbono	
	c _{sh}	2,07E+11	GPa
Característica do material da massa de prova	Material	Bloco de tungstênio	-
	ρ	19.250	kg/m ³
	m	desconhecido	kg

As figuras 16 e 17 apresentadas foram replicadas nesse trecho do trabalho para facilitar a visualização dos parâmetros correspondentes.

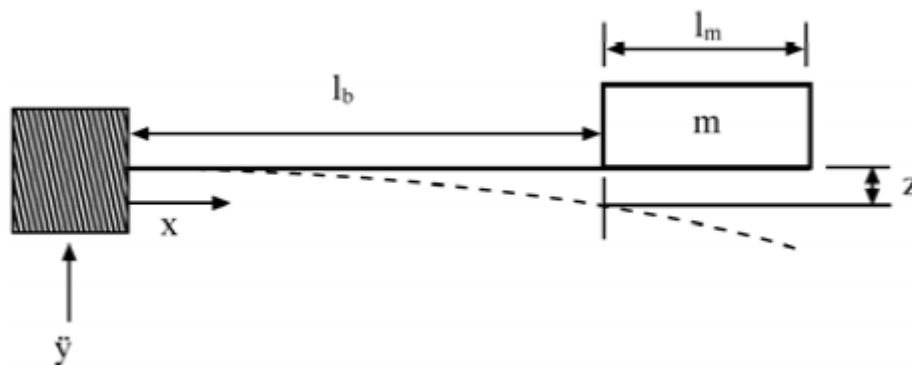


Figura 16 – Esquema do dispositivo de colheita de energia (fonte: Roundy e Wright, 2004)

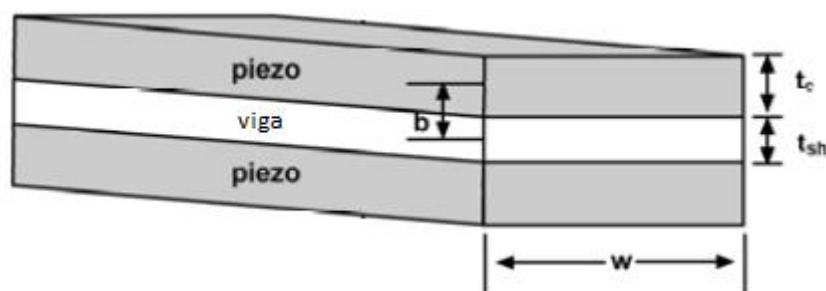


Figura 17 – Esquema da composição da viga (adaptado de Roundy e Wright, 2004)

Tabela 18 – Tabela com os parâmetros referentes às características geométricas

	Parâmetro	Valor	Unidade
Características geométricas	t_{sh}	0,1	mm
	t_c	0,127 / 0,191 / 0,267	mm
	b	Equação (20)	
	l_e	A ser determinado	m
	l_b	A ser determinado	m
	l_m	A ser determinado	m
	w	A ser determinado	m

6. RESULTADOS

Apresentados os parâmetros adotados no capítulo anterior, fez-se uma primeira simulação para verificar a influência do comprimento do material piezelétrico e do comprimento da massa de prova na potência obtida. Os resultados se aplicam apenas no primeiro modo, em flexão.

Para tanto, fixou uma largura w de 3 cm e um comprimento de viga l_b de 7,5 cm. Para a análise da potência obtida com a variação de l_e/l_b , fixou a relação de l_m/l_b em 40%.

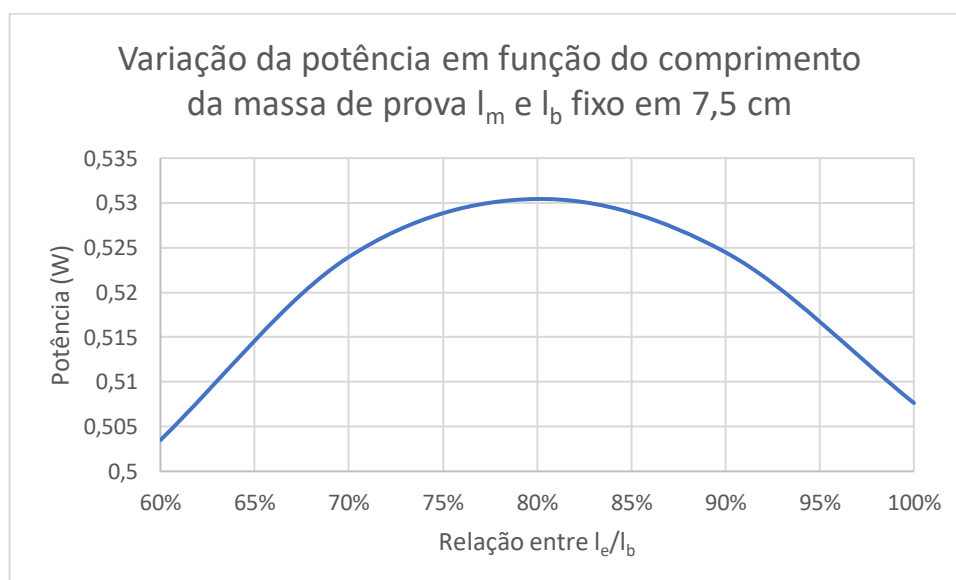


Figura 23 – Variação da potência em função de l_e/l_b

A figura 23 indica que uma maior potência pode ser retirada para uma relação de l_e/l_b de 80%. Assim, será adotada essa relação para o dimensionamento do mecanismo.

Para a relação entre o comprimento da massa de prova e o comprimento da viga, l_m/l_b , fixou-se os parâmetros de comprimento da viga e largura e adotou uma relação de l_e/l_b de 80%, conforme resultados obtidos anteriormente. Roundy (2004) não deixa explícito uma faixa de variação de l_m/l_b em seu trabalho. Como o modelo desenvolvido adota como simplificação que a massa de prova é modelada como uma massa concentra, relações de l_m/l_b muito grandes invalidam o modelo por não ser possível desprezar os efeitos do momento de inércia associados. Assim, foi adotada

uma variação de 10% a 50% de l_m/l_b , figura 24, e avaliou a variação da potência obtida com a variação de l_m/l_b .

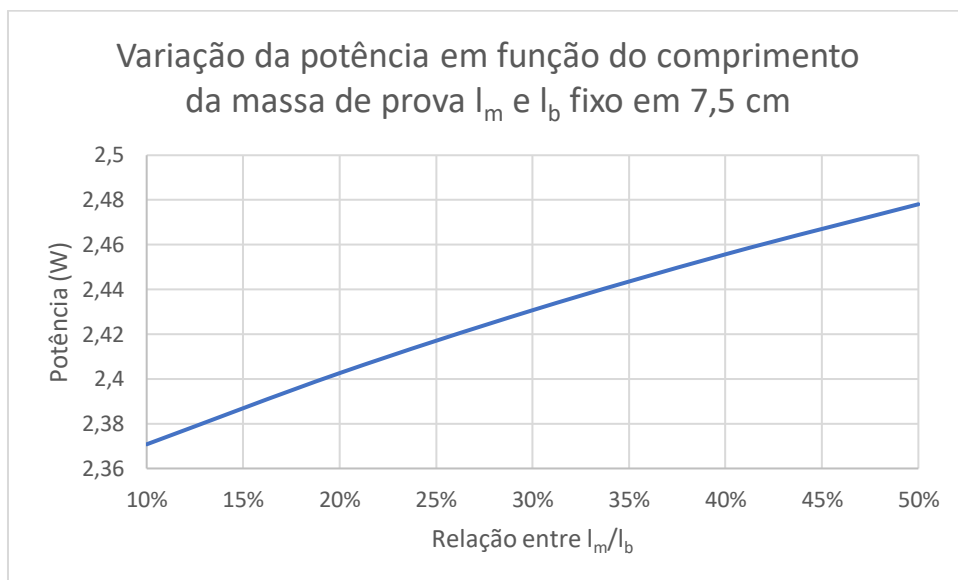


Figura 24 – Variação da potência em função de l_m/l_b

Para verificar a influência da espessura do material piezelétrico apresentado na tabela 16, obteve-se os gráficos da potência obtida e da massa de prova necessária para diferentes valores de l_b . Adotado os valores das tabelas (16) e (17), os resultados estão apresentados nos gráficos das figuras 25 e 26.

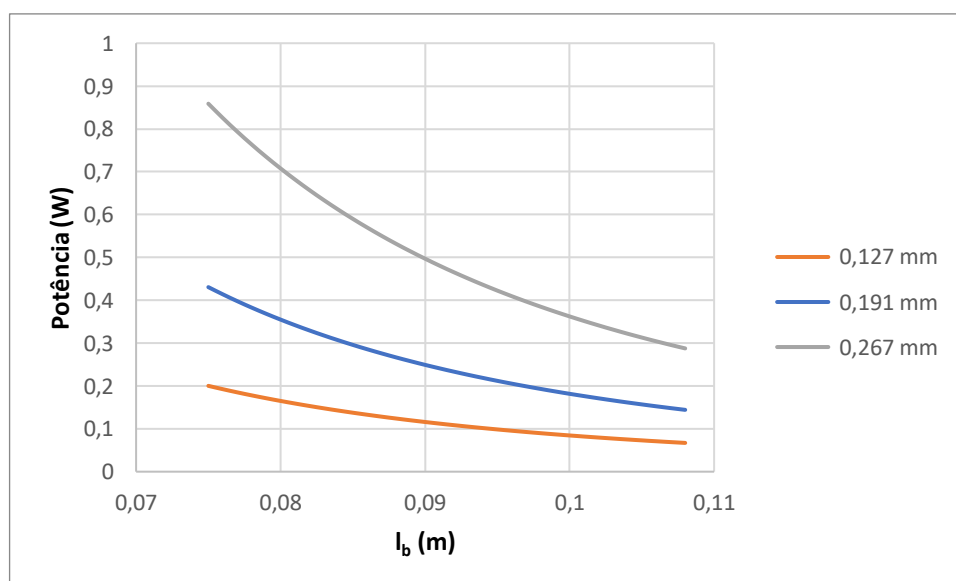


Figura 25 – Potência obtida para diferentes espessuras t_c e comprimentos de viga l_b

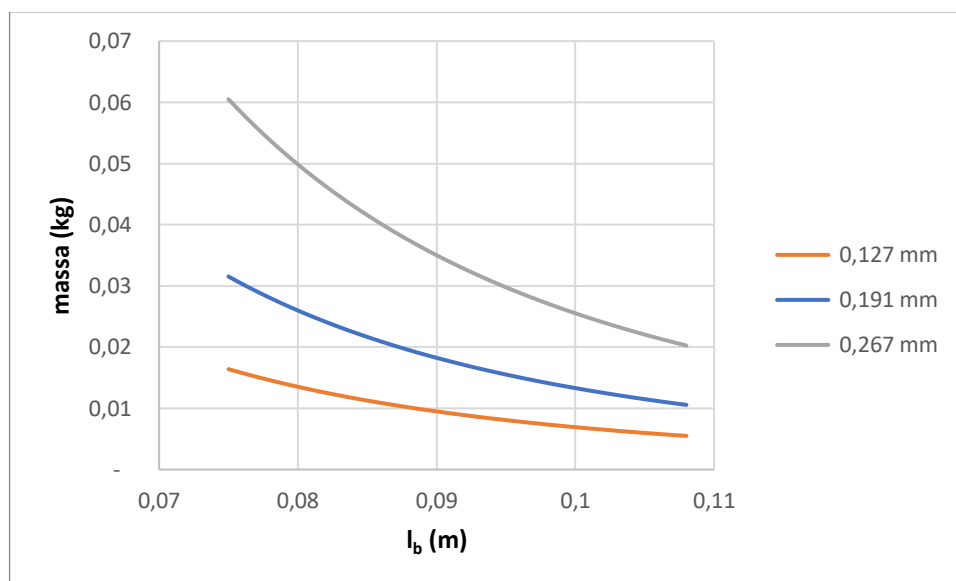


Figura 26 – Massa de prova para diferentes espessuras t_c e comprimento de viga l_b

Embora a espessura do material piezelétrico de 0,267 mm apresente as maiores potências obtidas, é também nessa espessura que são necessários os maiores valores de massa de prova. Assumindo como hipótese que a largura da massa de prova é a mesma da viga, para os valores de massa encontrados, as respectivas alturas do bloco de tungstênio estão expressas na figura 26.

Assim, a avaliação para o devido dimensionamento do mecanismo de colheita de energia deve considerar as respectivas dimensões da massa de prova.

Considerando a potência mínima do nó sensor de 135 mW, a tabela 19 apresenta os valores de massa de prova para que a frequência natural de vibração da viga seja próxima à frequência vibratória da peneira e os comprimentos de viga máximos para que a potência obtida consiga suprir os 135 mW exigidos pelo sensor. Foi considerado as larguras de 2, 3 e 4 cm para o conjunto e uma relação de comprimento do bloco pelo comprimento da viga (l_m/l_b) de 30% e uma relação de comprimento de piezelétrico pelo comprimento de viga (l_e/l_b) de 80%. Os resultados estão apresentados nas tabelas 19 a 21.

Para a largura de 2 cm, baseado nas restrições de largura e comprimento da viga, o comprimento mínimo é de 5 cm.

Tabela 19 – Valores de comprimento de viga e massa de prova para alimentação do LPR2400, com largura de 2 cm

	$t_c = 0,127 \text{ mm}$	$t_c = 0,191 \text{ mm}$	$t_c = 0,267 \text{ mm}$
$l_b \text{ max (cm)}$	6,7	8,7	10,9
$m \text{ (g)}$	12,2	10,7	10,5

Da tabela 19, observa-se que todos os dispositivos conseguem fornecer a quantidade de energia exigida pelo LPR2400 para o comprimento mínimo de 5 cm.

Considerando a largura de 3 cm, o comprimento mínimo é de 7,5 cm.

Tabela 20 – Valores de comprimento de viga e massa de prova para alimentação do LPR2400, com largura de 3 cm

	$t_c = 0,127 \text{ mm}$	$t_c = 0,191 \text{ mm}$	$t_c = 0,267 \text{ mm}$
$l_b \text{ max (cm)}$	7,7	9,9	12,5
$m \text{ (g)}$	12,1	10,9	10,4

Novamente, para as três espessuras simuladas, as três conseguem fornecer a potencia nominal para o LPR2400.

Por fim, para a largura de 4cm, o comprimento mínimo que viga tem que ter é 10 cm.

Tabela 21 – Valores de comprimento de viga e massa de prova para alimentação do LPR2400, com largura de 4 cm

	$t_c = 0,127 \text{ mm}$	$t_c = 0,191 \text{ mm}$	$t_c = 0,267 \text{ mm}$
$l_b \text{ max (cm)}$	8,5	11,0	13,8
$m \text{ (g)}$	12,0	10,6	10,3

As tabelas 19 a 21 e os gráfico da figura 25 permite fazer duas análises. Para uma mesma largura, o comprimento máximo correspondente ao fornecimento de 135mW de potência é maior quanto maior a espessura do material piezelétrico. Com o comportamento da potência pelo comprimento de viga, da figura 25, para um mesmo comprimento de viga, a potência obtida para a espessura t_c de 0,267mm é maior que a de 0,191 mm que, por sua vez é maior que a de 0,127mm. Assim, quanto maior a

espessura, maior a potência obtida. Por outro lado, essa espessura aumenta a rigidez da frequência natural de modo que para que a frequência natural seja constante e próxima da frequência de vibração, espessuras maiores acarretam em valores de massa de prova maiores.

Uma segunda análise que pode ser feita a partir das tabelas 19 a 21 e do gráfico 25 está relacionada à variação da largura para uma mesma espessura. Observa-se que para larguras maiores, o comprimento máximo da viga necessário para fornecer os 135mW são também maiores. De maneira análoga, baseado no comportamento da potência obtida da figura 25, para um mesmo comprimento de viga, quanto maior a largura, maior a energia captada do sistema.

A partir das dimensões obtidas, conclui-se que uma alternativa de alimentação por um mecanismo de colheita de energia com material piezelétrico para o nó sensor é viável. É pertinente observar que mesmo sendo capaz de alimentar o LPR2400, esse modelo de nó sensor foi concebido para operar por meio de pilhas AA. Uma solução desenvolvida para ser alimentada diretamente por um mecanismo de colheita de energia, como o SmartMesh, exigiriam menos energia ainda que o LPR2400.

7. CONCLUSÃO

O desenvolvimento tecnológico das áreas de eletrônica e comunicação sem fio criaram novas oportunidades e novas aplicações. Alguns exemplos delas são os dispositivos médicos implantáveis e as redes de sensores sem fio, seja para monitoramento ambiental, seja para a automação predial ou industrial, seja para o acompanhamento das condições de operação de uma máquina. Com dispositivos cada vez menores e que consomem cada vez menos energia, essas aplicações instigam os avanços dos mecanismos de colheita de energia.

Neste trabalho, foi abordado o dimensionamento de um mecanismo de colheita de energia a partir do efeito piezelétrico do material. A energia captada com esse mecanismo foi designada para alimentar um nó sensor responsável por monitorar as condições de operação de uma peneira vibratória. Para tanto, foi feito um levantamento dos dispositivos disponíveis no mercado e foi selecionado o nó sensor LPR2400, específico para o monitoramento das condições de uma peneira vibratória.

Para o dimensionamento do mecanismo de colheita foi feita a modelagem do sistema e a partir dela, foi desenvolvido um procedimento para dimensionar o dispositivo de captação de energia. Com base nas características de vibração e das propriedades dos materiais que compõem o mecanismo, a planilha desenvolvida permitiu dimensionar o dispositivo que atendesse o consumo de energia requisitado pelo nó selecionado.

Com os resultados da simulação, o mecanismo de colheita modelado se apresenta como uma alternativa viável para a unidade de energia do nó sensor. Uma unidade de energia que consegue alimentar de maneira adequada o nó sensor permite a sua completa independência, ou seja, não é necessária a substituição ou recarga das baterias do nó ou a conexão de fios para seu funcionamento. Como contribuição, essa independência permite que o monitoramento possa ser feito a distância, reduza a exposição a acidente por parte dos profissionais responsáveis pela manutenção e aumente a assertividade das paradas.

8. LISTA DE REFERÊNCIAS

A situação da manutenção no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS, 28., 2013, Salvador. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/Arquivos/403/403.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2017.

ABREU, A. M SOARES, I. M. SOUZA, S. T. O. **Termografia em manutenção preditiva: conceitos e aplicabilidades em máquinas e equipamentos industriais.** Bolsista de valor: revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense, 2012, v. 2, n. 1, p. 89-94. Disponível em: <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/viewFile/2398/1287>>. Acesso em: 07 abr. 2017

AKBARI, S. **Energy harvesting for wireless sensor networks review.** In: FEDERATED CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SYSTEMS, 2014, Warsaw. Annals of Computer Science and Information Systems. v.2. Warsaw, 2014. p. 987-992

ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade.** 2000. Disponível em: <<http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

ALMEIDA, M. T. **Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade.** 2009?. Disponível em: < <http://www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

ANNAMDAS, V. G. M., RADHIKA, M. A. Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures.** v. 24, n. 9, p. 1021-1042, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade. 1994

BARRIQUELLO, C. H. **Concepção de um nó sensor/atuador sem fio para uma rede de gerenciamento de iluminação pública.** 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em:
 <http://cascavel.ufsm.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=2719>. Acesso em: 02 fev. 2017

BARROS, M. O. **Gerenciamento de redes de sensores sem fio com ênfase em eficiência energética**. 2013. 13p. Departamento de informática, Universidade Federal do Paraná. 2013. Disponível em:
 <http://www.inf.ufpr.br/aldri/disc/artigos/Relatorio_Tecnico_Mauricio_Barros.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2017

BLOG VIBRATING SCREEN MACHINE. **Features of Vibrating Screen**. 2017. Disponível em: < <http://vibratingscreenmachine.blogspot.com.br/2017/05/features-of-vibrating-screen.html>>. Acesso em: 09 dez. 2017

COSTA, A. H., MARUYAMA, M. H., NETO, R. R. I. Manutenção preditiva. 2003. (Seminário da disciplina de Manutenção Industrial). Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_8.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2017

COSTA, R. A. A., MENDES, L. A. M. **Evolução das Redes Sem Fio: Um estudo comparativo entre Bluetooth e ZigBee**. 2006, 14p. Universidade Presidente Antônio Carlos. Disponível em: < <http://www.unipac.br/site/bb/tcc/tcc-a010b188f93af4c28ca9af23b9e3c476.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2017

COSTA, M. A. **Gestão estratégica da manutenção: uma oportunidade para melhorar o resultado operacional**. 2013. 104 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, 2013. Disponível em: <http://www.ufjf.br/ep/files/2014/07/2012_3_Mariana.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2017.

COTTA, G. L. **Piezoelétricidade**. 20--?. Disponível em:
 <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/GeovannaL_Cotta_RF1.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2017

DEPEXE, M. D. **Concepção de um circuito energy harvesting aplicado a rede de sensores sem fio para sistemas de iluminação**. 2014. 116 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Elétrica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2014. Disponível em:
 <http://cascavel.ufsm.br/tede//tde_arquivos/7/TDE-2015-04-16T100338Z-6224/Publico/DEPEXE,%20MARCIO%20DALCUL.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2017.

ERTUTRK, A., INMAN, D. J. **On mechanical modeling of cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters**. 2008. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 18, p. 1311-1325, 2008.

ERTURK, A. **Assumed-modes modeling of piezoelectric energy harvesters: Euler-Bernoulli, Rayleigh, and Timoshenko models with axial deformations**. 2011. Computers and Structures. v. 106-107, p. 214-227, 2012.

FILHO, R. G. N. **Fundamentos de Hardware**. 20--?. Notas de aula da disciplina Introdução ao Computador. Universidade Federal da Paraíba. Disponível em:
 <<http://www.di.ufpb.br/raimundo/ArqDI/Arq9.htm>>. Acesso em: 19 fev. 2017.

FURLAN. **Peneiras e grelhas vibratórias**. Catálogo. 20---. Disponível em:
 <http://furlan.com.br/wp-content/themes/temabase/pdf/novo_peneiras_grelhas_vibratorias.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2017

FREELAND, R. **Energy harvesting in practical applications**. 2012?. Disponível em: <<http://eh-network.org/events/eh2012/presentations/perpetuum.pdf>>. Acesso em: 14 fev. 2017.

FREITAS, L. S. **Avaliação dos minérios itabiritos compactos e semi-compactos em um circuito de britagem de Samarco Mineração S/A**. 2014. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Minas Gerais, 2014. Disponível em:
 <<http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/2088M.PDF>>. Acesso em: 23 abr. 2017

GABAY, J. **A closer look at energy harvesting: the cymbet energy harvesting development kit**. 2012. Disponível em:
 <<https://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/sep/a-closer-look-at-energy-harvesting-the-cymbet-energy-harvesting-development-kit>>. Acesso em: 09 dez. 2017

GATEC. Projeto manutenção preditiva. Análise de vibrações.

HANDBOOK. **Energy harvesting. Power supplies and applications**. CRC Press. Taylor & Francis Group. 2013. 586 p.

HEHN, T. MANOLI, Y. **CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters**. 2015. Cap. 2: Piezoelectricity and energy harvester modelling.

IIZUKA, E. K. **Análise de tensões em peneiras vibratórias através de modelagem numérica utilizando métodos dos elementos finitos e experimentalmente por extensometria**. 2006. 203 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

IMIC. Catálogo. 20--?. Disponível em: <<http://www.imic.com.br/produtos-novos/peneiras-vibratorias-horizontais/>>. Acesso em: 09 dez. 2017

INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. Pretince Hall, 2000, ed. 2

JIA, D., LIU, J. **Human power-based energy harvesting strategies for mobile electronic devices**. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, v. 3, p. 27-46, 2009

JIANG, X., POLASTRE, J., CULLER, D., **Perpetual Environmentally Powered Sensor Networks**. In: *International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 4. p. 463–468, 2005

KULAH, H., NAJAFI, K. **Energy Scavenging From Low-Frequency Vibrations by Using Frequency Up-Conversion for Wireless Sensor Applications**. *IEEE Sensors Journal*, v. 8, p. 261–268, 2008.

KUNDU, S., NEMADE, A. B. Modeling and simulation of a piezoelectric vibration energy harvester. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 568-575, 2016. In: *International Conference on Vibration Problems*, 12.

LOUREIRO, A. A. F. et al. **Rede de sensores sem fio**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

LU, F., LEE, H. P., LIM, S. P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-eletromechanical-systems applications. **Smart Materials and Structures**, v. 13, p. 57-63, 2003.

LUDLOW, C. **Top 3 Vibration Energy Harvesting Applications**. 2016. Disponível em: <<http://blog.mide.com/top-5-vibration-energy-harvesting-applications>>. Acesso em: 10 mar. 2017

LUZ, A. B., SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.

MARQUES, D. E. T. **Projeto e análise de viabilidade de coletores piezelétricos de energia em ferrovias**. 2013. 46 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013

MAVI. **Como escolher motovibradores Vimot**. 20--. Disponível em: <http://www.mavi.com.br/produto.php?subpag_id=12>. Acesso em: 19 nov. 2017

MEIROVITCH, L. **Elements of Vibration Analysis**. Singapore: McGraw-Hill, 1975, ed. 2, 560 p.

METSO. **Peneira vibratória modelo CBS**. Catálogo. 20--. Disponível em: <[http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050607-2256F-5B382/\\$File/Peneiras_CBS.pdf](http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050607-2256F-5B382/$File/Peneiras_CBS.pdf)>. Acesso em: 17 jan. 2017

METSO. Metso Service. 2008. Ed. 8. Disponível em: <[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/368568C97DA39A99C2257E8C0062F682/\\$File/service-tips-metso-agregados_peneira-vibratoria.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/368568C97DA39A99C2257E8C0062F682/$File/service-tips-metso-agregados_peneira-vibratoria.pdf)>. Acesso em: 09 dez. 2017

MEYERS, K. E., YEKNIK, M. **Fault detection for mining and mineral processing equipment**. 2001. Disponível em: <<http://evolution.skf.com/us/fault-detection-for-mining-and-mineral-processing-equipment/>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

MIAO, P. et al. **Mems inertial power generators for biomedical applications**, *Microsyst Technol.* v. 12, p. 1079–1083, 2006. Disponível em:

<<http://www3.imperial.ac.uk/pls/portallive/docs/1/32213696.PDF>>. Acesso em: 05 mar. 2017

MICHAUD D. **Screening**: The complete guide. 2016. Disponível em: <<https://www.911metallurgist.com/blog/screening>>. Acesso em 07 mai. 2017

MINETO, A. T. **Geração de energia através da vibração estrutural de dispositivos piezelétricos não lineares**. 2013. 167 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MINETO, A. T. et al. **Modeling of a cantilever beam for piezoelectric energy harvesting**. In: Proceedings of the Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications, 9. 20103

MITCHESON, P. D., et al. **Architectures for vibration-driven micropower generators**. 2004. Journal of Microelectromechanical Systems, 13.

NASCIF, J. **Manutenção preditiva: caminho para a excelência**. 20---. Disponível em: <http://tecem.com.br/site/downloads/artigos/manutencao_preditiva_caminho_para_a_excelecia.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2017.

NECHIBVUTE, A., AKANDE, A. R., LUHANGA, P. V. C. Modelling of a PZT beam for voltage generation. **Pertanika Journal of Science and Technology**. v. 19, n. 2, p. 259-271, 2011. Disponível em: <[http://www.pertanika2.upm.edu.my/Pertanika%20PAPERS/JST%20Vol.%2019%20\(2\)%20Jul.%202011/6.pdf](http://www.pertanika2.upm.edu.my/Pertanika%20PAPERS/JST%20Vol.%2019%20(2)%20Jul.%202011/6.pdf)>. Acesso em: 31 mai. 2017

PARADISO, J. A., STARNER, T. **Energy scavenging for mobile and wireless electronics**. IEEE Pervasive Computing, v. 4, n. 1, p. 18-27, 2005.

PARK, C., CHOU, P. AmbiMax: **Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes**. 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, v. 1, p. 168–177, 2006.

PHIPPS, A. G. **Modeling and characterization of piezoelectric energy harvesting systems with the pulsed resonant converter**. 2010. 297 p. Dissertação (Doutorado

em Filosofia). Universidade de Florida. Disponível em:

<http://etd.fcla.edu/UF/UFE0041409/hipps_a.pdf>. Acesso em: 27 mai. 2017

PIEZO SYSTEMS INC. Catálogo de folhas de material piezelétrico PSI-5H4E, 20--?. Disponível em: <<http://www.piezo.com/catalog8.pdf%20files/Cat8.28.pdf>>.

Acesso em 20 nov. 2017

PIEZO SYSTEMS INC. **Piezoelectric energy harvesting kit**. 2011. Disponível em:

<<http://www.piezo.com/prodproto4EHkit.html>>. Acesso em: 09 dez. 2017.

PIMENTEL, D. MUSILEK, P. **Power management with energy harvesting devices**. In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 23, 2010.

PORTO, T. B. MENDONÇA, B. Q. CARVALHO, L. S. G. **Basic design requirements for structures subjected to dynamic action**. 2012. Mecânica Computacional. v. 31. p. 2547-2560.

PROTASIO, C. **Teste de circuitos integrados**. 20--?. Material de disciplina de pós-graduação. Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <<http://app.cear.ufpb.br/~protasio/TEEE-CE/TEEE-CE-Introducao.pdf>>. Acesso em: 04 mar. 2017.

RAGHUNATHAN, V., et al. **Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems**. In: International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 4. p. 457–462, 2005.

RANGEL, R. F. **Caracterização de uma célula tubular piezelétrica para geração de energia elétrica**. 2014. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2014 Disponível em: <<http://tede.biblioteca.ufpb.br/bitstream/tede/5295/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2017

RIVERO, I. A. S. **Rede de sensores sem fio para monitoramento de equipamentos eletrônicos**. 2011. 102 p. Dissertação (Mestrado em Informática) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011. Disponível

em: <http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/Informatica_RiveroIAS_1.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2017.

ROUNDY, S., WRIGHT, P., PISTER, K. **Micro-electrostatic vibration to electricity converters**. In: Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2002, 2002, v. 220, p 17-22.

ROUNDY, S. et al. **Power sources for wireless sensor networks**. In: Wireless Sensor Networks. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, v. 2920, cap. 1, p. 1-17.

ROUNDY, S., WRIGHT, P. K., & RABAEY J. **Energy scavenging for wireless sensor networks with special focus on vibrations**. New York: Springer US, 2004.

SALIM, C. A. EMÍDIO, A. R. C. ROCHA, P. M. W. **Identificação, mensuração e análise dos acidentes, doenças e mortes no setor mineral: construção de modelo de monitoramento das condições de trabalho e saúde dos trabalhadores das minerações**. Belo Horizonte: FUNDACENTRO/CNTI, 2013, 304 p. Relatório técnico. Disponível em:

<http://ftp.medicina.ufmg.br/osat/arquivos/RelatorioAt_30092014.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2017

SHENCK, N., PARADISO, J. **Energy scavenging with shoe-mounted Piezoelectrics**. IEEE Micro, v. 21, n. 3, p. 30–42, 2001.

SILVA, I. M. D. **Redes de sensores sem fio aplicadas em ambientes industriais de petróleo e gás**. 2006. 92 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Computação). Centro de Tecnologia - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2006. Disponível em:

<http://www.anp.gov.br/CapitalHumano/Arquivos/PRH22/Ivanovitch-Medeiros-Dantas-da-Silva_PRH22_UFRN_G.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2017

SILVA, L. R. T., SEVERINO, M. R. **Análise do papel estratégico da gestão da manutenção na indústria de mineração**. XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Fortaleza, 2015. Disponível em:

<http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_206_224_27847.pdf>. Acesso em 14 ago. 2017

SOUSA, P., PRESTES, L. **Técnicas de análise de vibrações em máquinas vibratórias na indústria de mineração**. Seminário de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamentos, 18. 2012.

SPAMER, F. R. **Técnicas preditivas de manutenção para máquinas rotativas**. 2009. 254 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

Disponível em:

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000900.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

STARNER, T. **Human-powered Wearable Computing**. IBM Systems Journal., v. 35, n. 3-4, p. 618–629, 1996. Disponível em:

<<http://www.cc.gatech.edu/~thad/p/journal/human-powered-wearable-computing.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2017.

STEMiNC. **Piezo Material Properties**. Catálogo, 20--?. Disponível em:

<<https://www.steminc.com/PZT/en/piezo-materials-properties>>. Acesso em 07 out. 2017

STEYN J. **Fatigue failure of deck support beams on a vibrating screen**.

International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 61, n. 2-3, p. 315-327, 1995.

SUDEVALAYAM, S. KULKARNI, P. **Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications**. IEEE Communications Surveys & Tutorials. v. 13, n 3, p. 443-461, 2011.

SUZUKI, Y. **Recent progress in MEMS electret generator for energy harvesting**, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, v. 6, n. 2, p. 101-111, 2011.

SWART, J. W. **Evolução de microeletrônica, regras de escalonamento e limites**. Apresentação. 2013? Disponível em:

<http://www.ccs.unicamp.br/novosite/ie521/files/2013/08/evolucao_2s04.pdf>. Acesso em 20 nov. 2017

TAVARES, P. L. **Redes de sensores sem fio**. 2002. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<https://www.gta.ufrj.br/grad/02_2/Redes%20de%20sensores/Redes%20de%20Sensores%20Sem-fio.htm>. Acesso em: 3 out. 2016

TEXAS INSTRUMENT. **Energy harvesting**. From low power to no power, TI is the driving force behind today's energy harvesting applications. 20---. Disponível em:

<<http://www.ti.com/ww/en/apps/energy-harvesting/>>. Acesso em: 09 dez. 2017

THOMSON, W. T., DAHLEH, M. D. **Theory of vibration with applications**. 5th ed. Pearson, 1997. Cap 9, p. 258-286.

TIMKEN. **Como otimizar o desempenho dos rolamentos de peneira vibratória**.

20--?. Disponível em: <<http://www.timken.com/pt-br/products/bearings/productlist/roller/Spherical/Pages/HowtoOptimizeShakerScreenBearingPerformance.aspx>>. Acesso em 17 fev. 2017.

TORFS, T., LEONOV, V., HOOFF, C. V. Bert gyselinckx body-heat powered autonomous pulse oximeter. In: **IEEE Conference on sensors**, 5, p. 427-430, 2006

TORRES, E. O., RINCÓN-MORA, G. A. **Energy-harvesting chips and the quest for everlasting life**. Electronic Engineering Times. 30 jun. 2005. Disponível em <http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273025>. Acesso em: 05 mar. 2017.

TZOU, H. S. Piezoelectric shells. **Distributed Sensing and Scavenging Control of Continua**. 1993

VISÃO. **Rolamentos para o segmento de mineração e siderurgia**. 20--?.

Disponível em: <<http://www.visaorolamentos.com.br/rolamentos-mineracao-siderurgia.php>>.

WAN, Z.G., TAN, Y. K., YUEN, C. Review on Energy Harvesting and Energy Management for Sustainable Wireless Sensor Networks. In: **International Conference on Communication Technology**, 13, 2011

XAVIER, J. N. **Indicadores de manutenção**. Apostila virtual da disciplina Manutenção Elétrica Industrial. Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio

Grande Do Norte, 2012. Disponível em:

<<http://www.dee.ufrn.br/~joao/manut/15%20-%20Cap%EDtulo%2013.pdf>>. Acesso em: 17 fev. 2017.

YEATMAN, E. M. **Advances in power sources for wireless sensor nodes.**

Proceedings of International Workshop on Body Sensor Networks, 1, London:

Imperial College London, 2004, p. 20–21. Disponível em:

<<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.108.9901&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em 03 mar. 2017.

YILDIZ, F. **Potential ambient energy harvesting sources and techniques.** The

Journal of Technology Studies, Virginia, v. 35, n. 1. 2009. Disponível em:

<<https://scholar.lib.vt.edu/ejournals/JOTS/v35/v35n1/yildiz.html>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

YILDIZ, F. **Low power energy harvesting with a thermoelectric generator**

through an air conditioning condenser. ASEE Annual Conference & Exposition, 121, Indianapolis. 2014, 12 p.

APÊNDICE I

Valores para o material que constitui a viga

Tabela 22 – Propriedades do material constituinte da viga (adaptado de Annamdas e Radhika, 2013)

	ASTM A500-03 (aço)	AI 606 I-T6 (alumínio)
Densidade (kg/m ³)	7800	2715
Módulo de Young (GPa)	207	68,95
Coeficiente de Poisson	0,30	0,33

Propriedades típicas para alguns materiais piezelétricos podem ser encontrados na tabela 20.

Tabela 23 - Propriedades do material piezelétrico (fonte: STEMiNC, 20--?)

Símbolo	3195STD	3195HD	3221HD	3203STD	3203HD
K	1800	1900	3450	3250	3800
d₃₁ (x 10 ⁻¹² m/V)	-175	-190	-300	-275	-320
c_p (x 10 ¹⁰ N/m ²)	6,9	6,7	6,2	6,3	6,2
k₃₁	0,35	0,36	0,44	0,41	0,43

APÊNDICE II

Para uma carga resistiva, a potência pode ser calculada por

$$Pot = \frac{|V|^2}{2R} \quad (36)$$

Onde

$$V = \frac{j\omega \frac{2c_p d_{31} t_c A_{in}}{a\epsilon k_2}}{\left[\frac{\omega_n^2}{RC_b} - \left(\frac{1}{RC_b} + 2\zeta\omega_n \right) \omega^2 \right] + j\omega \left[\omega_n^2 (1 + k_{31}^2) + \frac{2\zeta\omega_n}{RC_b} - \omega^2 \right]} \quad (35)$$

Definindo K_1 , K_2 e K_3 como

$$K_1 = \omega \frac{2c_p d_{31} t_c A_{in}}{a\epsilon k_2} \quad (41)$$

$$K_2 = \frac{\omega_n^2}{RC_b} - \left(\frac{1}{RC_b} + 2\zeta\omega_n \right) \omega^2 \quad (42)$$

$$K_3 = \omega \left[\omega_n^2 (1 + k_{31}^2) + \frac{2\zeta\omega_n}{RC_b} - \omega^2 \right] \quad (43)$$

Substituindo (41), (42) e (43) em (35), podemos reescrever a expressão da tensão (35) como

$$V = \frac{j K_1}{K_2 + j K_3} \quad (44)$$

Transformando a expressão (44) complexa para a forma padrão, tem-se

$$V = \frac{j K_1}{K_2 + j K_3} * \frac{K_2 - j K_3}{K_2 - j K_3} \quad (45)$$

$$V = \frac{K_1 K_3 + j K_1 K_2}{(K_2)^2 + (K_3)^2} = \frac{K_1 K_3}{K_2^2 + K_3^2} + j \frac{K_1 K_2}{K_2^2 + K_3^2} \quad (46)$$

Sabendo agora que

$$S = P + jQ \quad (47)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (48)$$

$$|S|^2 = P^2 + Q^2 \quad (49)$$

Assim, (36) fica:

$$|V|^2 = \left(\frac{K_1 K_3}{K_2^2 + K_3^2} \right)^2 + \left(\frac{K_1 K_2}{K_2^2 + K_3^2} \right)^2 \quad (50)$$

Sabendo que o valor da resistência ótima pode ser expresso por (51), o cálculo da potência, equação (36), em termos das incógnitas K_1 , K_2 e K_3 fica

$$R_{opt} = \frac{1}{\omega C_b} \frac{2\zeta}{\sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}} \quad (51)$$

$$k_2 = \frac{l_b^2}{3b} \frac{(2l_b + \frac{3}{2}l_m)}{(2l_b + l_m - l_e)} \quad (52)$$

Substituindo (51) e (52) em (41), (42) e (43)

$$K_1 = \omega \frac{2c_p d_{31} t_c A_{in}}{a\epsilon} \frac{3b(2l_b + l_m - l_e)}{l_b^2 (2l_b + \frac{3}{2}l_m)} \quad (53)$$

$$K_2 = -2\zeta\omega^3 \quad (54)$$

$$K_3 = \omega^3 \left(k_{31}^2 + 2\zeta \frac{\sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}}{2\zeta} \right) \quad (55)$$

Sabe-se que

$$C_b = \frac{a^2 \epsilon w l_e}{2t_c} \quad (56)$$

Rearranjando (37), temos

$$\text{Pot} = \frac{1}{2 R_{\text{opt}}} K_1^2 \frac{K_2^2 + K_3^2}{(K_2^2 + K_3^2)^2} \quad (57)$$

Para facilitar a avaliação da expressão (57), ordenou entre os parâmetros conhecidos e as incógnitas desconhecidas na expressão (59)

$$\text{Pot} = \frac{1}{2} \frac{\omega C_b \sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}}{2\zeta} \left(\omega \frac{2c_p d_{31} t_c A_{\text{in}}}{a\varepsilon} \frac{3b(2l_b + l_m - l_e)}{l_b^2(2l_b + 1,5 l_m)} \right)^2 \frac{K_2^2 + K_3^2}{(K_2^2 + K_3^2)^2} \quad (58)$$

$$\text{Pot} = l_e \left(\frac{2l_b + l_m - l_e}{l_b^2(2l_b + \frac{3}{2}l_m)} \right)^2 \frac{36 w c_p^2 d_{31}^2 t_c A_{\text{in}}^2 b^2}{4 \varepsilon} \omega^3 \frac{K_2^2 + K_3^2}{(K_2^2 + K_3^2)^2} \frac{\sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}}{2\zeta} \quad (59)$$

Onde a parcela com as incógnitas conhecidas é

$$\omega^3 \frac{9 w c_p^2 d_{31}^2 t_c A_{\text{in}}^2 b^2}{4 \varepsilon} \frac{K_2^2 + K_3^2}{(K_2^2 + K_3^2)^2} \frac{\sqrt{4\zeta^2 + k_{31}^4}}{2\zeta} \quad (60)$$

E as desconhecidas

$$l_e \left(\frac{2l_b + l_m - l_e}{l_b^2(2l_b + \frac{3}{2}l_m)} \right)^2 \quad (61)$$